



**Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Centro de Tecnologia  
Escola de Química**

**Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos**

**André Luiz Felisberto França**

**MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DA  
GERAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS  
EM SIDERURGIA**

Rio de Janeiro  
2012

André Luiz Felisberto França

**MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DA  
GERAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS  
EM SIDERURGIA**

Dissertação submetida ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientadores

Professor Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.  
Professora Fabiana Valéria da Fonseca Araújo, D.Sc.

Rio de Janeiro  
2012

FRANÇA, ANDRÉ LUIZ FELISBERTO  
MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DA GERAÇÃO DE EFLUENTES  
LÍQUIDOS EM SIDERURGIA.

[Rio de Janeiro] 2012

xii, 173 p., 29,7 cm (EQ/UFRJ, M.Sc., Tecnologia de Processos Químicos e  
Bioquímicos, 2012)

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, EQ

1. Integração de Processos; 2. Reúso de água e efluentes industriais; 3.  
Minimização; Estações de tratamento de efluentes; 5. Uso racional de recursos  
hídricos

I. EQ/UFRJ

II. Título (Série)

André Luiz Felisberto França

# **MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DA GERAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EM SIDERURGIA**

Dissertação submetida ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Aprovada por:

---

Professor Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

---

Professora Fabiana Valéria da Fonseca Araújo, D.Sc.

---

Professor Carlos Augusto Guimarães Perlingeiro, D.Sc.

---

Professor Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

---

Professor Tito Lívio Moitinho Alves, D.Sc.

Rio de Janeiro  
2012

Dedicatória

*Às três mulheres que são verdadeiros pilares em minha vida:  
Minha mãe querida Anita Albuquerque França (in memoriam),  
Minha tia Neyde Felisberto Martins Ribeiro (in memoriam),  
Minha esposa amada Keila Klem Rodrigues.*

## Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade da vida e de aprendizado constante e por ter permitido o convívio com familiares e amigos tão especiais.

Aos meus pais Alberto Felisberto e Anita Albuquerque França, que estarão sempre vivos em minhas lembranças. Agradeço pela oportunidade de ter pessoas tão especiais em minha vida.

A minha tia Neyde Felisberto Martins Ribeiro, principal incentivadora e mentora intelectual.

A minha esposa Keila Klem Rodrigues, pelo amor e dedicação nos bons momentos e nos demais momentos de aprendizado.

Aos meus orientadores Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Fabiana Valéria da Fonseca Araújo, pela amizade, compreensão, colaboração e aprendizado.

Aos meus irmãos Érika Albuquerque Penha, Diego França Penha, Lauro França Fernandes, Isabela Albuquerque Fernandes, pelo carinho e amizade.

Aos familiares e amigos de Valença, em especial da Família Monteiro Fernandes (Laurentino (*in memorian*), Dona Marina (*in memorian*), Ana Maria, Antônio, Diana, Silma, Kátia, Mônica, Sandro, Vicente, Fátima, Marina, José e demais que sempre me incentivaram).

Aos meus primos Bruno, Flávia e Aline Felisberto Martins Ribeiro, pela amizade e pelos exemplos que me levaram sempre a valorizar as oportunidades de aprendizado.

Aos amigos da família Klem e Rodrigues, em especial, Daura, Manoel, Sheila, Cláudio, Natália, Lívia e Mariana.

Ao amigo Cauê Torres, pelos anos de amizade, convívio, diálogos e companherismo.

Aos amigos do Grupo de Integração de Processos Químicos (GIPQ), pelos momentos de convivência e aprendizado.

Aos amigos do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), pelo companherismo e aprendizado neste instituto do qual tanto me orgulho de ser um servidor.

Aos amigos do Grupo Espírita André Luiz (GEAL), pelos momentos felizes vividos.

Aos amigos mais próximos que me acompanharam no desenvolvimento desta dissertação, Reinaldo Mirre, Ana Mehl, Dona Maria (LADEQ) e Solange Vianna e Beto do DAEQ.

Aos demais amigos de todos os planos da vida pelo incentivo, inspiração, paciência, amizade e compreensão.



“A água faz parte do patrimônio do planeta. Cada continente, cada povo, cada nação, cada região, cada cidade, cada cidadão, é plenamente responsável aos olhos de todos.”

Princípio 1 da Declaração Universal dos Direitos da Água (ONU, 1992)



FRANÇA, André Luiz Felisberto. **MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DA GERAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EM SIDERURGIA**. Rio de Janeiro, 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia Química). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

## RESUMO

Nos últimos anos, vem aumentando a consciência sobre a importância do uso racional dos recursos hídricos e a preocupação com a poluição das águas no mundo. Neste sentido, o aumento na demanda deste recurso tornará o reúso e o reciclo contínuo de água e efluentes um assunto imperativo na siderurgia, assim como em outras indústrias, onde novas abordagens em direção a resultados com maior sustentabilidade devem ser desenvolvidas. O objetivo deste trabalho é aplicar o procedimento algorítmico-heurístico Diagrama de Fontes de Água (DFA) à siderurgia, visando à minimização do consumo de água e do descarte de efluentes líquidos. Foram formulados 20 cenários considerando reúso e reciclo de correntes, incluindo processos regenerativos. Os cenários foram analisados quanto ao seu desempenho técnico e econômico. Alguns se revelaram promissores. A comparação dos mesmos revelou que o cenário ambientalmente mais sustentável é também o economicamente mais atraente.

Palavras-chave: minimização do consumo de água; minimização da geração de efluentes líquidos; reúso de água e efluentes líquidos industriais; diagrama de fontes de água (DFA).

FRANÇA, André Luiz Felisberto. **MINIMIZATION OF FRESHWATER CONSUMPTION AND WASTEWATER DISCHARGE IN STEELWORKS**. Rio de Janeiro, 2012. Thesis (Master in Science). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

#### ABSTRACT

During recent years there has been increasing awareness of importance of sustainable exploitation of water resources and concern about water pollution all over the world. In this way, increasing demands for water resources will make continued reuse and recycling of water and wastewater imperative in the steel industry as well as other industries, where new approaches towards achieving results with more sustainability should be developed. The objective of this work is to apply the heuristic algorithmic procedure Water Sources Diagram (WSD) to steelworks, towards the minimization of freshwater consumption and wastewater discharge. Twenty scenarios have been proposed considering reuse and recycle of streams, including regenerative processes. The results were compared in terms of technical performance and economic evaluation. Some of them revealed to be greatly promising. The results have showed that the most environmentally sustainable scenario is also the most economically viable.

Keywords: freshwater consumption minimization wastewater minimization; industrial water and wastewater reuse; water sources diagram (WSD).

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação - A importância do recurso água	2
1.2 Objetivos e descrição dos capítulos	5
<b>Capítulo 2. CONSUMO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS NOS PROCESSOS SIDERÚRGICOS.....</b>	<b>6</b>
2.1 O aço e o desenvolvimento das sociedades	8
2.2 Desempenho do setor siderúrgico no mundo	10
2.3 Desempenho do setor siderúrgico no Brasil	16
2.4 Processo industrial de fabricação de aço	19
2.4.1 Preparação de cargas	26
2.4.1.1 Armazenamento e beneficiamento de matérias primas	26
2.4.1.2 Armazenamento e beneficiamento de carvão e coque	28
2.4.1.3 Calcinação	30
2.4.1.4 Coqueificação	32
2.4.1.5 Sinterização	46
2.4.2 Redução	49
2.4.3 Conversão e Refino	57
2.4.4 Lingotamento	64
2.4.5 Laminação e Acabamento	68
2.4.6 Unidades Auxiliares	79
2.4.7 Conclusões	79
2.5 Aspectos legais referentes a recursos hídricos	79
2.6 Reutilização de águas e de efluentes líquidos	85
<b>Capítulo 3. METODOLOGIA.....</b>	<b>88</b>
3.1 Avaliação Técnica - Algoritmo Diagrama de Fontes de Água (DFA)	89
3.2 Avaliação Econômica	92
<b>Capítulo 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>98</b>
4.1 Cenário base	99
4.2 Cenário 1	100
4.3 Cenário 2	105
4.4 Cenário 3	108

4.5	Cenário 4	111
4.6	Cenário 5	118
4.7	Cenário 6	120
4.8	Cenário 7	123
4.9	Cenário 8	125
4.10	Cenário 9	127
4.11	Cenário 10	129
4.12	Cenário 11	131
4.13	Cenário 12	133
4.14	Cenário 13	136
4.15	Cenário 14	139
4.16	Cenário 15	142
4.17	Cenário 16	144
4.18	Cenário 17	147
4.19	Cenário 18	150
4.20	Cenário 19	152
4.21	Cenário 20	155
4.22	Conclusões parciais	157
<b>Capítulo 5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>162</b>
5.1	Conclusões	163
5.2	Sugestões	164
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>166</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

“A água pode existir sem os seres humanos, mas nós só conseguimos sobreviver sem água por poucos dias.”

Wallenstein

## 1.1 Motivação - A importância do recurso água

Água. Poderia ser o nome do nosso planeta se o homem tivesse outrora conhecimento da imagem contemplada pelo Major Iuri Alekseievitch Gagarin, em 12 de abril de 1961. Muitas vezes teve seu valor subestimado e já foi considerada um recurso praticamente infinito. A importância da água para o desenvolvimento da vida é inquestionável e ao mesmo tempo em que aumenta a consciência sobre a sua importância reduz-se, por diversos processos, dentre os quais se destacam a poluição dos corpos hídricos, o acesso a este bem tão valioso.

A água é a substância mais abundante da biosfera, compondo majoritariamente os seres vivos, variando de 65 a 95% de massa de grande parte destes, nos quais, devido às suas características físico-químicas, representa um indispensável componente biológico. Embora seja uma das substâncias mais simples, também é uma das mais importantes, constituindo meio sobre o qual se processam as mais importantes reações em nosso organismo, além de ser essencial para permitir um adequado funcionamento de proteínas, enzimas, membranas, mitocôndrias e hormônios. Além disso, a água atua como solvente universal de líquidos orgânicos, fase dispersante do material citoplasmático, transporte de substâncias entre os meios intra e extracelular, componente imprescindível para as reações de hidrólise e na manutenção da temperatura corporal, devido ao seu elevado calor específico (MACEDO, 2007).

Enfim, pode-se dizer que sem água não existiria vida em nosso planeta, ao passo que este poderia existir sem a presença de vida. Este é o motivo, inclusive, da água ser uma das primeiras substâncias procuradas pelas agências de pesquisas espaciais em outros planetas, como principal indicador da existência de vida, ainda que pretérita.

No planeta azul, os oceanos, rios, lagos, geleiras, calotas polares, pântanos e alagados cobrem uma área de 354.200 km<sup>2</sup> e ocupam um volume de 1,386 bilhão km<sup>3</sup>. Apesar de inicialmente estes números parecerem representar uma grande disponibilidade de água, é necessário lembrar que, deste total, 97,5% é de água salgada dos oceanos e mares, portanto imprópria para consumo humano, 2,493% é de água doce, mas se encontra em geleiras ou são águas subterrâneas de difícil acesso, e apenas 0,007% é de água doce, adequada para o consumo humano e de fácil acesso em rios, lagos e águas subterrâneas pouco profundas. Este número não

parece tão grande se avaliarmos que o consumo médio anual de uma pessoa adulta é de 5 a 10 vezes a massa de seu corpo, o que representa, em média, 450 L/ano. A distribuição desigual dos recursos hídricos constitui um importante desafio, muitas vezes ainda sem solução. O Brasil, por exemplo, que possui 53% da água doce da América do Sul e 12% da água doce do mundo, o que representa, em média anual, 36.000 m<sup>3</sup> por habitante, apresenta 80% desta água na Amazônia, onde vivem apenas 5% da população brasileira. A realidade no nordeste brasileiro é bem diferente, uma vez que nesta região, um terço da população brasileira vive com apenas 3,3% da disponibilidade hídrica do país (MACEDO, 2007). No mundo, a desigual distribuição de água vem gerando cada vez mais conflitos entre países, uma vez que 33 nações possuem mais de 95% do total de rios, das 263 bacias hidrográficas existentes, em seu território (UNEP, 2012).

Muito mudou desde os primeiros contatos do homem com a água, que segundo estimativas ocorreu há aproximadamente 11.000 anos, quando potes de barro eram cozidos com o propósito de armazenamento de água. Poços eram escavados em cidades fortificadas para protegê-los contra ataques há 10.000 anos. Há 7.000 anos uma verdadeira revolução aconteceu, quando a água foi utilizada pela primeira vez em canais de drenagem, com propósitos de irrigação, na Mesopotâmia e no Egito. O desenvolvimento da agricultura permitiu a fixação de povos nômades e o estabelecimento das primeiras cidades.

Com o crescimento das cidades, logo se precisou proceder ao gerenciamento dos esgotos, sendo o registro mais antigo de galerias para este propósito o da cidade de Nippur, na Índia, em 3.750 a.C. O desenvolvimento das tubulações para conexão de instalações sanitárias e a rede coletora de esgotos já era empregado no Vale do Indo e no palácio do faraó Cheóps, em 3.200 a.C. Há cinco mil anos muitas cidades já estavam estabelecidas próximas aos grandes mananciais de água. Desde então, o homem vem desenvolvendo obras para controle de enchentes e da oferta de água para abastecimento da população e para a agricultura, o que culminou na construção da primeira represa em 2.000 a.C., pelo faraó Menes, para abastecer a capital do Egito, Memphis. Da mesma época é o primeiro registro da utilização de sulfato de alumínio para clarificação da água de abastecimento e o uso de filtros constituídos por carvão, areia e cascalho (EMARP, 2004, SILVA, 1998, REBOUÇAS, BRAGA e TUNDISI, 2002 *apud* MACEDO, 2007).

Viajando no curso da História da Humanidade, passando pelas primeiras bombas, o primeiro processo de dessalinização, proposto por Aristóteles, os aquedutos romanos, e outros tantos feitos, até os tempos modernos percebe-se que muitas soluções atuais, apresentadas como de alta tecnologia, têm suas origens em tempos mais remotos do que se imagina *a priori*. Curioso também é perceber que as primeiras sociedades já possuíam sofisticadas estratégias para permitir o fluxo de água nas cidades e nos campos e a retirada de efluentes sanitários. Infelizmente, apesar do imenso avanço tecnológico acumulado ao longo dos séculos, o crescimento não ordenado das cidades coloca atualmente muitas destas mesmas regiões em condições sanitárias piores do que as registradas em tempos longínquos pelos nossos ancestrais.

A reflexão sobre o que teria se perdido ao longo do desenvolvimento das sociedades para permitir que em pleno século XXI bilhões de pessoas não possuam acesso à água potável e tampouco à coleta e tratamento apropriado de efluentes, o que repercute na morte anual de milhões de pessoas, é, no mínimo, intrigante. Igualmente importante é pensar sobre que valores e características possuíam estas sociedades, classificadas pelo homem moderno como primitivas, que permitiam uma vida mais equilibrada com o ambiente onde as mesmas estavam inseridas. Um olhar atento para o passado pode nos ensinar muito sobre a tão perseguida sustentabilidade, que buscamos no mundo atual.

O documento final da Conferência Internacional sobre Água e Desenvolvimento Sustentável, ocorrido em Paris, em 1998, concluiu que 25% da população mundial não tem acesso à água potável e que mais da metade não dispõe de saneamento adequado. Além disso, a baixa qualidade da água e a falta de higiene representam as principais causas de enfermidades, levando, diariamente, 6.000 crianças a óbito no mundo. Ao mesmo tempo, as inundações, as secas, a pobreza, o tratamento inadequado dos rejeitos e a insuficiência da infra-estrutura representam sérias ameaças ao desenvolvimento econômico e social, à saúde humana, à segurança alimentar mundial e ao meio ambiente (MACEDO, 2007; UNEP, 2012).



## 1.2 Objetivos e descrição dos capítulos

O objetivo deste trabalho é propor e avaliar sistemas alternativos, denominados Cenários, visando à redução do consumo de água e da geração de efluentes líquidos em processos siderúrgicos. A sua relevância é justificada pelo emprego de dados reais de uma usina siderúrgica e pelo uso do procedimento Diagrama de Fontes de Água (DFA), que vem se mostrando bastante eficaz em diversas outras aplicações.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre o setor siderúrgico, com breve histórico e desempenho atual nos cenários nacional e internacional. Além disso, é apresentada descrição das unidades de uma indústria siderúrgica integrada, visto que o entendimento das operações que a compõe é indispensável para a identificação dos principais pontos consumidores de água e, por consequência, dos mais significativos geradores de efluentes líquidos industriais, bem como das potenciais possibilidades de sistemas de tratamento para cada fonte geradora.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia adotada na proposição e na avaliação dos 20 Cenários alternativos considerados na busca do melhor sistema.

No capítulo 4 são apresentados os resultados da aplicação das metodologias para avaliação técnica e econômica, apresentadas nos capítulos 3 e 4, respectivamente. São desenvolvidos diversos cenários de reutilização, seja por meio de reúso ou reciclo, incluindo, em parte dos cenários, o estudo da regeneração de correntes. Uma avaliação comparativa técnica e econômica é realizada ao final do capítulo.

O capítulo 5 é reservado para as conclusões do trabalho, baseada em uma avaliação crítica entre os resultados alcançados e os esperados. São listadas também diversas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros, que não foram desenvolvidos no presente trabalho devido à abrangência estabelecida no planejamento e execução, mas que apresentam grande potencial para o desenvolvimento e obtenção de futuros estudos.

## Capítulo 2

# CONSUMO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS NOS PROCESSOS SIDERÚRGICOS

---

“A água é o veículo da natureza.”

Leonardo da Vinci

(1452-1519)

Este capítulo objetiva apresentar um breve histórico da utilização do ferro e do aço, seguido de uma contextualização do setor siderúrgico, no âmbito mundial e nacional, e uma descrição das principais etapas do processo de fabricação do aço, de uma forma objetiva e integrada, estabelecendo quais são as principais demandas de água e os principais pontos que geram efluentes líquidos industriais. Entende-se que o conhecimento do processo industrial é essencial para o pleno entendimento dos pontos que demandam o consumo de água e dos efluentes líquidos industriais gerados, assim como as possibilidades de tratamento e reutilização. Finalmente são apresentados os principais aspectos legais referentes a recursos hídricos e aspectos relevantes sobre a reutilização de água e de efluentes líquidos, com destaque para o algoritmo Diagrama de Fontes de Água (DFA).

Didaticamente, pode-se dividir a produção do aço, em uma indústria siderúrgica integrada, em cinco grandes etapas, quais sejam, preparação de cargas, redução, conversão e refino, lingotamento e laminação, conforme ilustrado na Figura 2.1.

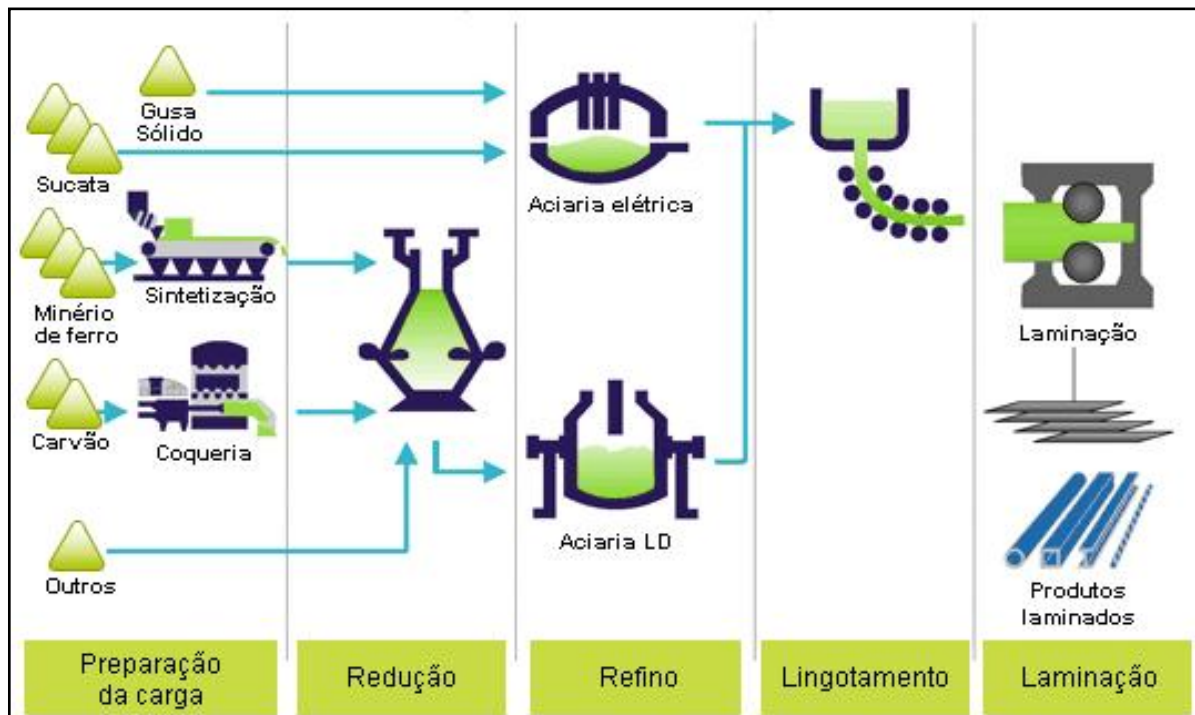


Figura 2.1 – Representação esquemática das etapas de produção do aço via siderúrgica integrada e semi-integrada (IABR, 2012).

Tal como muitas indústrias, as usinas siderúrgicas utilizam grandes quantidades de água em suas atividades, sendo o volume de água empregado bastante variável, conforme a configuração, a integração e a complexidade de seus processos constituintes, a capacidade de reutilização e a localização.

A geração de efluentes líquidos industriais está intrinsecamente ligada às quantidades e à maneira com que a água é consumida nas diversas operações siderúrgicas. Embora grande parte do consumo de água esteja associada às demandas por resfriamento de equipamentos, a vazão de efluentes líquidos gerados é grande e os contaminantes nele contidos podem comprometer a qualidade dos corpos receptores, caso não haja tratamento apropriado.

## 2.1 O aço e o desenvolvimento das sociedades

A seguir será apresentado um breve histórico sobre o ferro e aço e a importância destes materiais no desenvolvimento das sociedades. As informações e datas históricas deste subcapítulo apresentam como referência o Instituto Aço Brasil (IABR, 2012), salvo quando apresentada outra referência.

Há cerca de 4.500 anos, o ferro metálico usado pelo homem era encontrado em meteoritos recolhidos por tribos nômades nos desertos da Ásia Menor. Analisando a etimologia do termo siderurgia, observa-se a curiosa relação com esta referência histórica, visto que o radical *sider* significa estrela, astro. Acredita-se que a primeira produção de ferro pelo homem tenha sido acidental, quando ainda no período Neolítico, pedras de minério, que circundavam as fogueiras utilizadas para aquecimento nas cavernas, entraram em contato com a madeira carbonizada, sendo reduzidas a metal, pela ação do calor (ARAÚJO, 1997).

Com o tempo, aumentou-se gradativamente o uso do ferro, sendo a exploração regular de jazidas iniciada em torno de 1.500 a.C, provavelmente no Oriente Médio, de onde o metal teria sido importado por assírios e fenícios.

Com a Idade do Ferro, houve a substituição gradativa das armas e utensílios de bronze pelo ferro obtido em fornos primitivos, denominados fornos de lupa. Um dado histórico interessante mostra que, dentre as civilizações antigas, a China, que atualmente é a maior produtora mundial de aço, foi uma das últimas civilizações a iniciar a Idade do Metal, no ano de 600 a.C., enquanto na Europa e Oriente Médio, este marco ocorrera cerca de 600 anos antes.

De uma forma geral, o uso do ferro promoveu grandes mudanças na sociedade, permitindo um rápido desenvolvimento da agricultura e a conquista de novos territórios, a partir do desenvolvimento de armas mais modernas, com maior dureza e mais resistentes à corrosão.

A evolução do forno de lupa foi a forja catalã, que surgiu na Espanha após a queda do Império Romano e foi utilizada durante toda a Idade Média. A forja catalã, considerada o embrião dos altos fornos utilizados atualmente, consistia basicamente em uma lareira de pedra e foles manuais que inflavam a forja de ar, necessário para a combustão do carvão e a redução do minério. A forja original passou por sucessivas melhorias, com evolução dos foles manuais para foles mecânicos

acionados por servos ou cavalos, e posteriormente, no século XII, por rodas d'água. O ferro, antes obtido em estado pastoso, pode então ser obtido na forma líquida, possibilitando o surgimento da técnica de fundição, que logo resultou na fabricação de vários produtos, dos pacíficos sinos de igrejas às belicosas balas de canhão.

A utilização de altos fornos, iniciada no século XV, permitiu o alcance de mais altas temperaturas, resultando em ligas de ferro com maior resistência e dureza. Uma representação do primeiro alto forno utilizado na região que hoje constitui a Alemanha é apresentado na Figura 2.1.



Figura 2.2 – Miniatura do primeiro alto forno da Alemanha (WIKIMEDIA, 2012).

Com a Revolução Industrial, no final do século XVIII, modificações nos fornos permitiram a fabricação de um produto mais resistente e com menos impurezas, que logo se tornou o metal mais consumido por uma civilização cada vez mais urbana e industrial e menos agrária.

O aço, tal como conhecemos hoje foi desenvolvido no século XIX e substituiu o ferro fundido em muitas aplicações, servindo como matéria prima para muitas indústrias. A partir do século XX, as siderúrgicas intensificaram os investimentos em tecnologia para aumentar a eficiência da produção e proporcionar melhorias ocupacionais e ambientais.

A análise que fazemos da importância do aço, no início do século XXI, é de que este material está presente em muitas ferramentas e processos indispensáveis para a vida moderna. Tão importante é a produção de aço que atua como indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país, uma vez que seu consumo está relacionado à construção de diversos utensílios, equipamentos, edifícios, dentre outros. O aço destaca-se ainda por ser o produto mais reciclável e mais reciclado do mundo. Diariamente, carros, geladeiras, fogões, latas, barras e arames tornam-se sucatas, que alimentam os fornos das usinas, produzindo novamente aço, sem prejuízos no que diz respeito à qualidade demandada.

## 2.2 Desempenho do setor siderúrgico no mundo

A produção mundial de aço no mundo em 2011 foi de 1,49 bilhão de toneladas, de acordo com relatório divulgado pela World Steel Association (WSA, 2012). Analisando-se a evolução temporal da produção, percebe-se que, na última década, a produção vem aumentando gradativamente, exceto durante período de crise que atingiu praticamente todos os mercados entre os anos de 2008 e 2009, como pode ser verificado na Figura 2.3.

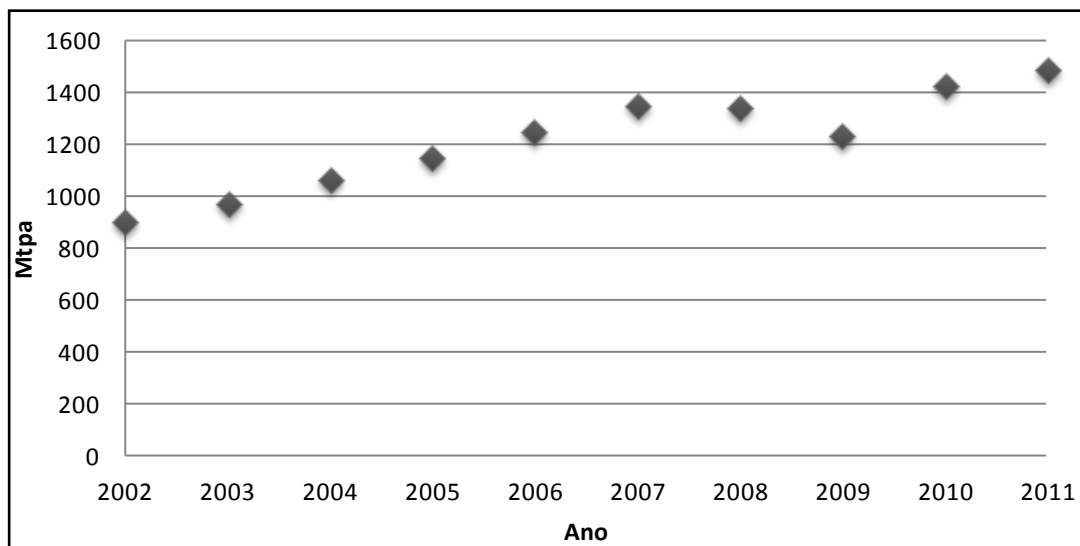


Figura 2.3 – Evolução histórica da produção de mundial de aço (WSA, 2012)

Trabalhando-se os dados mundiais de produção de aço bruto divulgados pela World Steel Association (2012), referentes ao ano base de 2011, observa-se que a Ásia apresenta-se como principal produtor de aço no mundo, com 64% do total,

seguida da União Europeia, América do Norte e Comunidade dos Estados Independentes (C.E.I), com 12%, 8% e 8%, respectivamente, como pode ser observado na Figura 2.4.

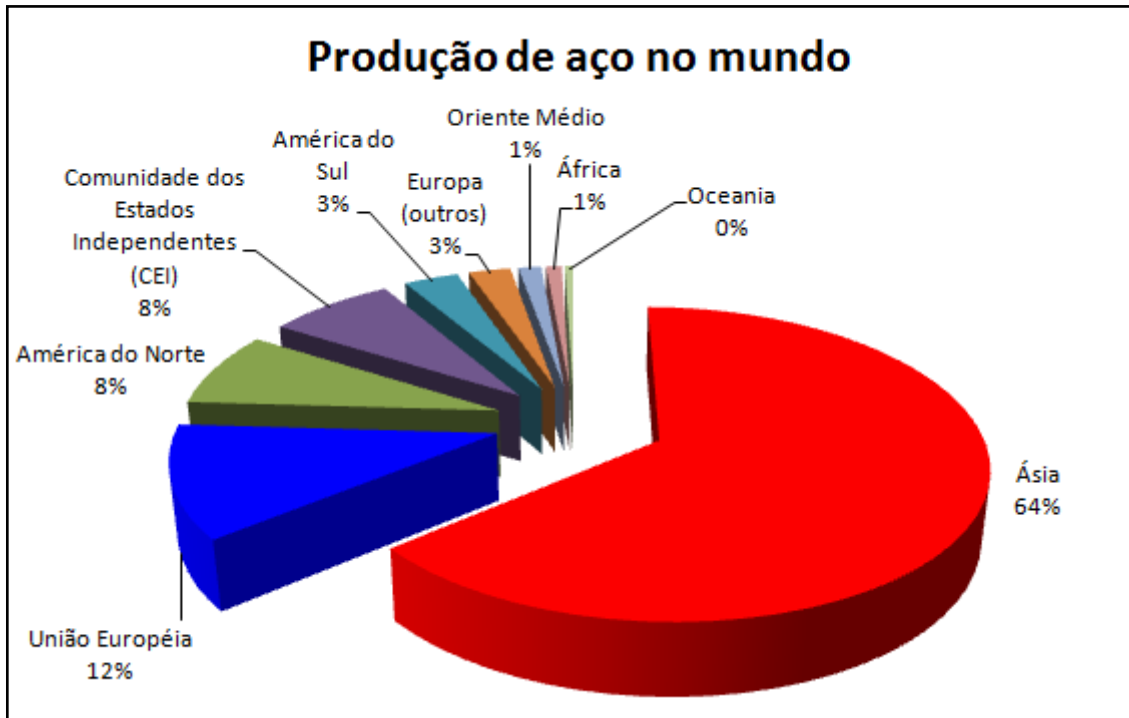


Figura 2.4 – Distribuição da produção de aço no mundo em 2011 (WSA, 2012).

Utilizando-se os mesmos dados para avaliar a distribuição da fabricação de aço entre os maiores produtores mundiais tem-se o resultado mostrado nas Figuras 2.5 e 2.6, cuja análise indica que os dez maiores produtores de aço são responsáveis por mais de 80% da produção mundial, sendo que o destaque da produção asiática deve-se, sobretudo, ao grande desempenho da China, que produz mais do que os outros nove maiores produtores juntos. O segundo colocado na lista é o Japão, com 9% do montante, seguido de Estados Unidos, Índia e Rússia, com 7%, 6% e 5%, respectivamente. O Brasil é o único país da América Latina presente, com 3% da produção dos dez maiores produtores, o que significa 2,36% da produção mundial. Outro destaque da lista é a Turquia que superou a produção de aço da Itália, um tradicional produtor mundial de aço.

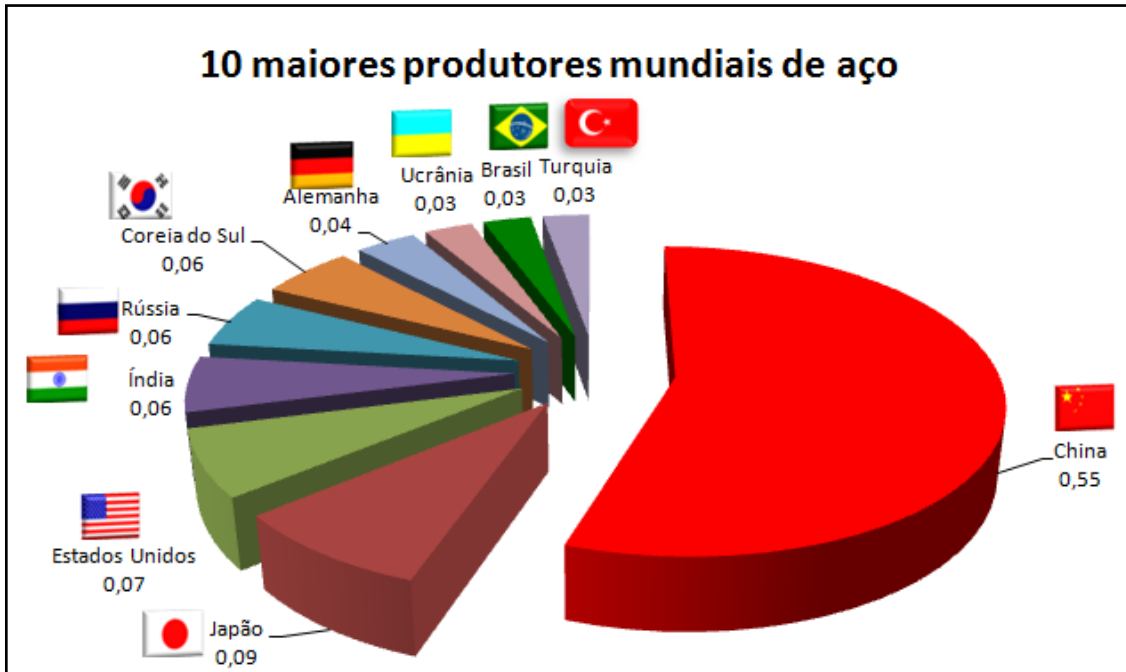


Figura 2.5 – Distribuição da produção de aço entre os dez maiores produtores mundiais (WSA, 2012)

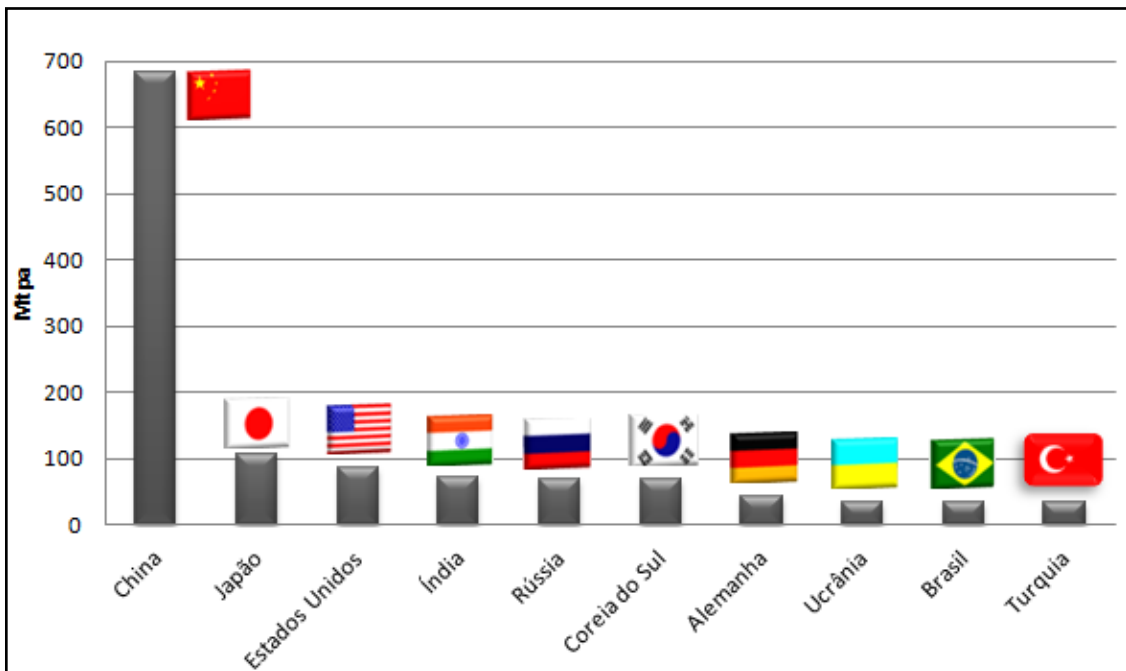


Figura 2.6 – Os 10 maiores produtores mundiais de aço (WSA, 2012).

Apenas a China foi responsável, no ano de 2011, por 46% da produção mundial de aço, que foi de 1,49 bilhão de toneladas, como é ilustrado na Figura 2.7. Esta desproporção é mais evidente ainda quando se analisa a distribuição entre os chamados BRICS, conjunto de países em desenvolvimento constituído pelo Brasil,



Rússia, Índia, China e, desde 2011, África do Sul, como pode ser observado na Figura 2.8. Analisando-se sob este prisma, a China possui quase 80% da produção total, seguidos de Índia e Rússia, com, aproximadamente, 8% cada, e Brasil, com cerca de 4%. A produção da África do Sul é pouco significativa, não chegando a 1% da produção dos BRICS.

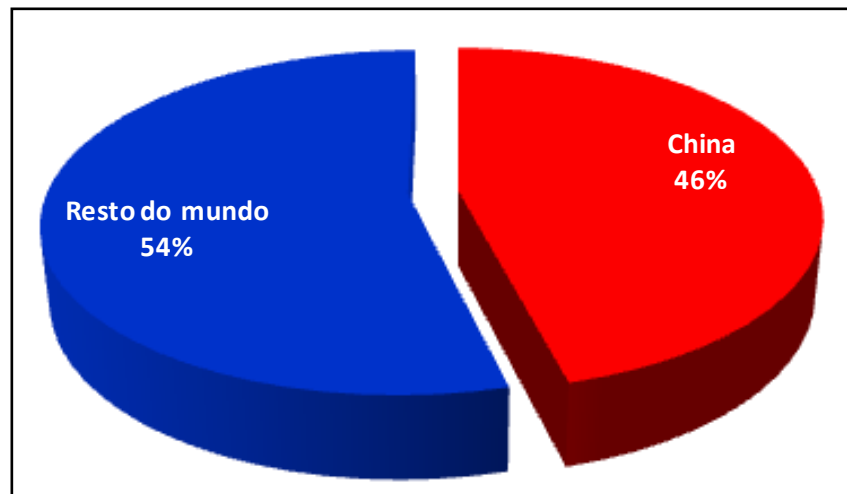


Figura 2.7 – A liderança da China na produção mundial de aço (WSA, 2012).

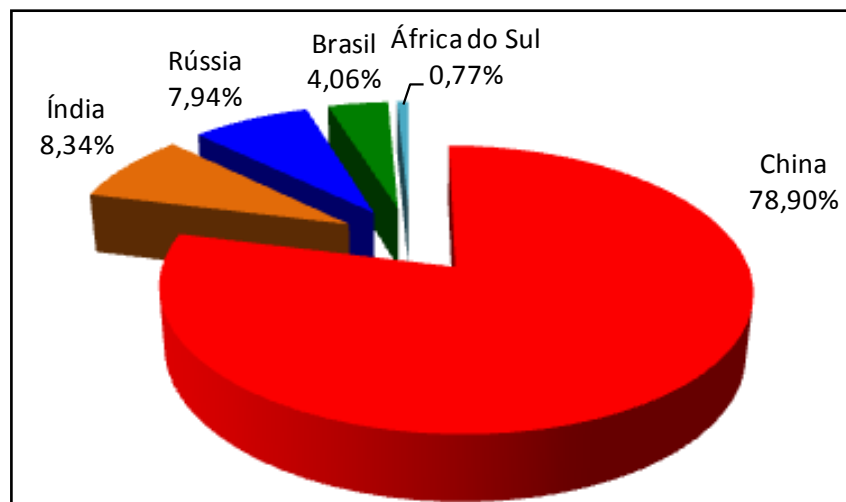


Figura 2.8 – Distribuição da produção de aço entre os BRICS (WSA, 2012).

De acordo com estudo divulgado pela Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM, 2008), devido à grande expansão da produção de aço na China, e conseqüentemente na demanda de minério de ferro, países como Brasil e Austrália tiveram um aumento muito grande no nível de produção desta *commodity*. Contudo,

segundo o mesmo estudo, ao contrário do que muitos especulam este crescimento não se sustentará por muito tempo. As reservas conhecidas e declaradas nos países exportadores e as caracterizadas como medida mais indicada são suficientes para suportar as operações de produção em um horizonte de apenas 20 anos, o que demandará a busca por outros recursos minerais que contenham ferro na sua composição. Neste sentido, a distribuição da produção mundial de aço nas próximas décadas poderá ter um perfil bastante distinto do apresentado hoje. Muito dependerá, a semelhança do que vem ocorrendo nos campos de exploração de petróleo, do quanto se investiu em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para exploração de jazidas de pior qualidade ou de mais difícil acesso, considerando as formas tradicionais de lavra.

Analisando-se o perfil de produção por companhias, conforme apresentado na Figura 2.9, tem-se que o maior produtor mundial foi o grupo ArcelorMittal, com quase 100 Mtpa, seguido de quatro grupos com produção próxima de 40 Mtpa e cinco grupos com produção de cerca de 30 Mtpa. A presença de grandes corporações asiáticas na lista das dez maiores companhias produtoras de aço está intrinsicamente ligada ao desempenho de países como China e Japão no cenário mundial.

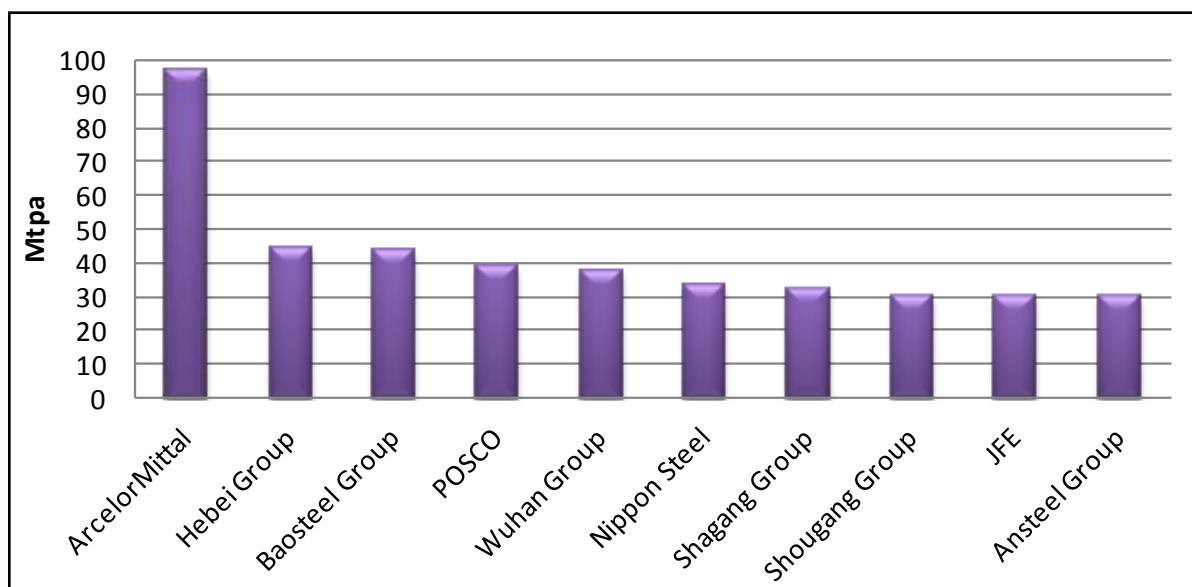


Figura 2.9 – As 10 maiores companhias produtoras de aço no mundo em 2011 (elaborado a partir do relatório de produção anual da WSA, 2012).

Procedendo-se a uma avaliação mais regional, percebe-se que, em relação a produção de aço, o Brasil apresenta na América do Sul, desempenho semelhante ao da China, comparada aos demais países BRICS, com 73% da produção, seguido de Argentina, Venezuela e Chile, com 12%, 6% e 3%, respectivamente (Figura 2.10). A desproporção é ainda maior quando analisada a produção de aço do MERCOSUL, onde a produção brasileira é responsável por 86% da produção do bloco, seguida da Argentina, com aproximadamente 14%. Uruguai e Paraguai não apresentam produção significativa (Figura 2.11).

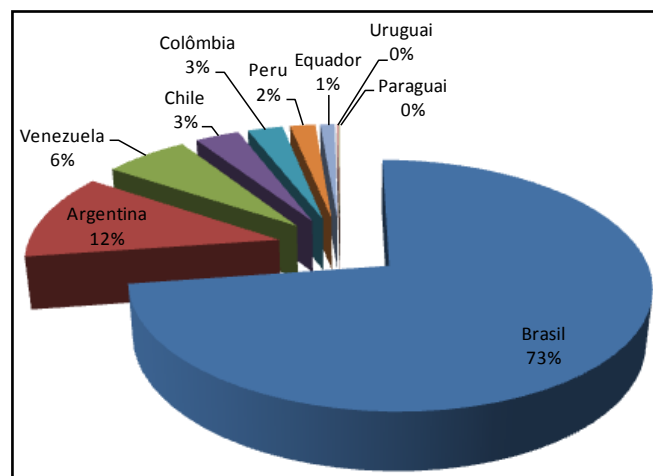


Figura 2.10 – Distribuição da produção de aço entre países da América do Sul (WSA, 2012).

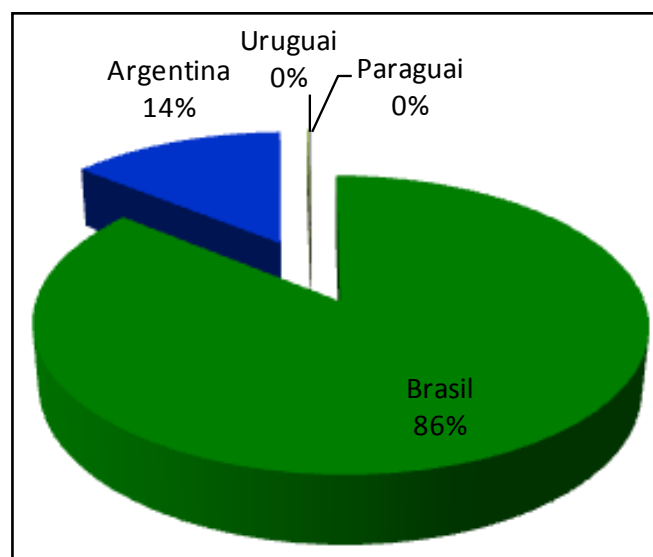


Figura 2.11 – Distribuição da produção de aço entre os países integrantes do Mercosul (WSA, 2012)

### 2.3 Desempenho do setor siderúrgico no Brasil

O setor siderúrgico brasileiro teve um marco importante a partir da privatização das empresas, no início dos anos 90. A partir de então muitas empresas produtoras passaram a integrar grupos industriais e/ou financeiros com interesses não apenas na siderurgia, como também nas atividades associadas. A competitividade estimulou a busca pela otimização de produção e a modernização do parque siderúrgico aconteceu naturalmente, com um afluxo expressivo de capitais, enquanto o setor buscava alcançar uma economia de escala (IABR, 2012).

De acordo com dados do Instituto Aço Brasil (2012), considerando como cenário o ano de 2011, o país possui um parque produtor de aço composto por 29 usinas, que são administradas por 11 grupos empresariais, e juntas possuem uma capacidade instalada de 47,8 milhões de toneladas de aço bruto por ano (Mtpa). Esta capacidade instalada foi resultado do investimento de US\$ 36,4 bilhões, que ocorreu entre 1994 e 2011. Apesar do grande investimento realizado, o parque produtor passa por um processo de atualização tecnológica constante. A figura 2.12 apresenta a distribuição do parque siderúrgico brasileiro.

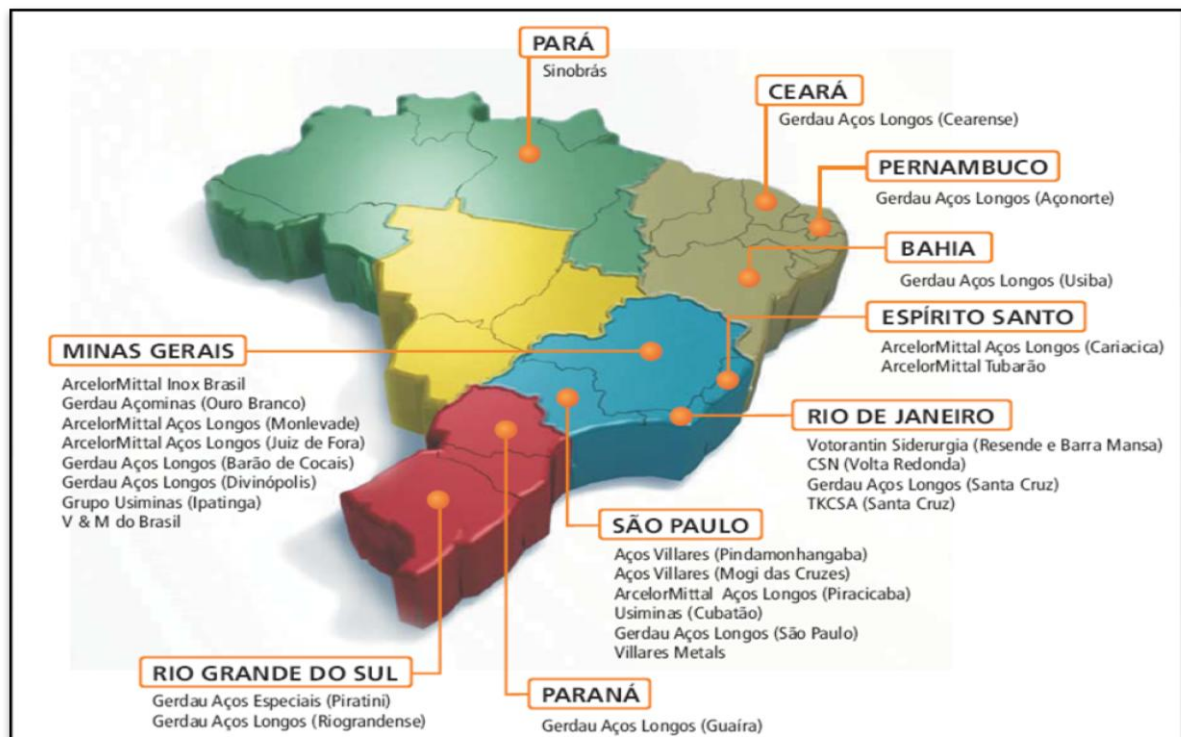


Figura 2.12 – Parque siderúrgico brasileiro (IABR, 2012).

A produção de aço bruto é de 35,2 Mtpa, dos quais 33,3 Mtpa resultam em produtos siderúrgicos. O consumo aparente, que é o resultante da soma da produção nacional com as importações, subtraídas as exportações, é de 25 Mtpa. O faturamento líquido da indústria brasileira do aço em 2011 foi de R\$ 65,6 bilhões, resultando em uma arrecadação de impostos de R\$ 13,9 bilhões. A figura 2.13 apresenta a produção de aço bruto por grupo.

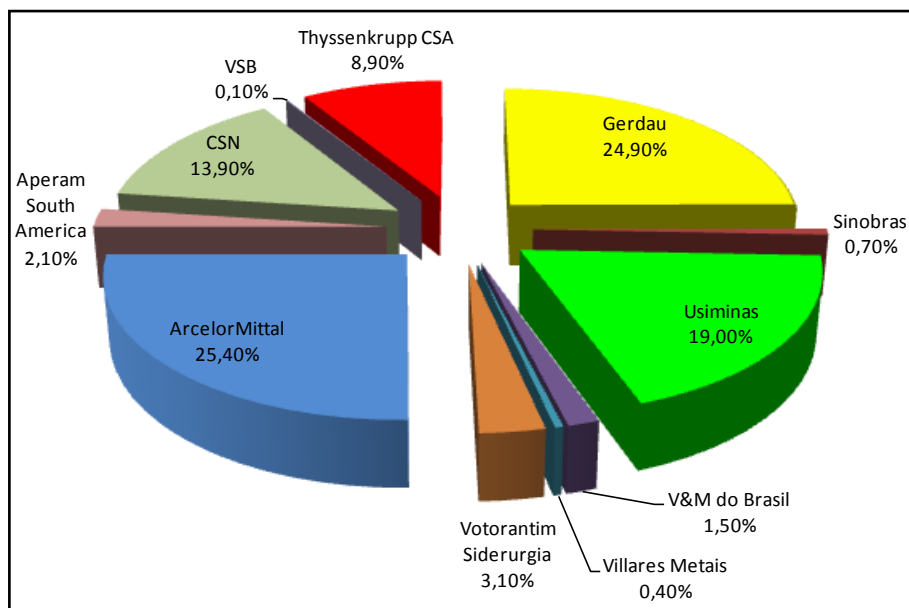


Figura 2.13 – Produção de aço bruto no Brasil por grupo (%) (IABR, 2012)

De acordo com o IABr, o setor siderúrgico emprega 137.134 colaboradores e exporta aço para mais de 100 países, sendo o 12º exportador mundial de aço (exportações diretas) e o 5º maior exportador líquido de aço (diferença entre exportação e importação), com 7,1 Mtpa. O país ainda exporta 2,9 Mtpa de forma indireta, na forma do aço contido nos bens exportados. Estes números representam um saldo comercial de US\$ 3,9 bilhões, que representam 13,0% do saldo comercial do país. Na Figura 2.14 são apresentados os principais destinos das exportações de produtos siderúrgicos brasileiros, em toneladas, em 2011.

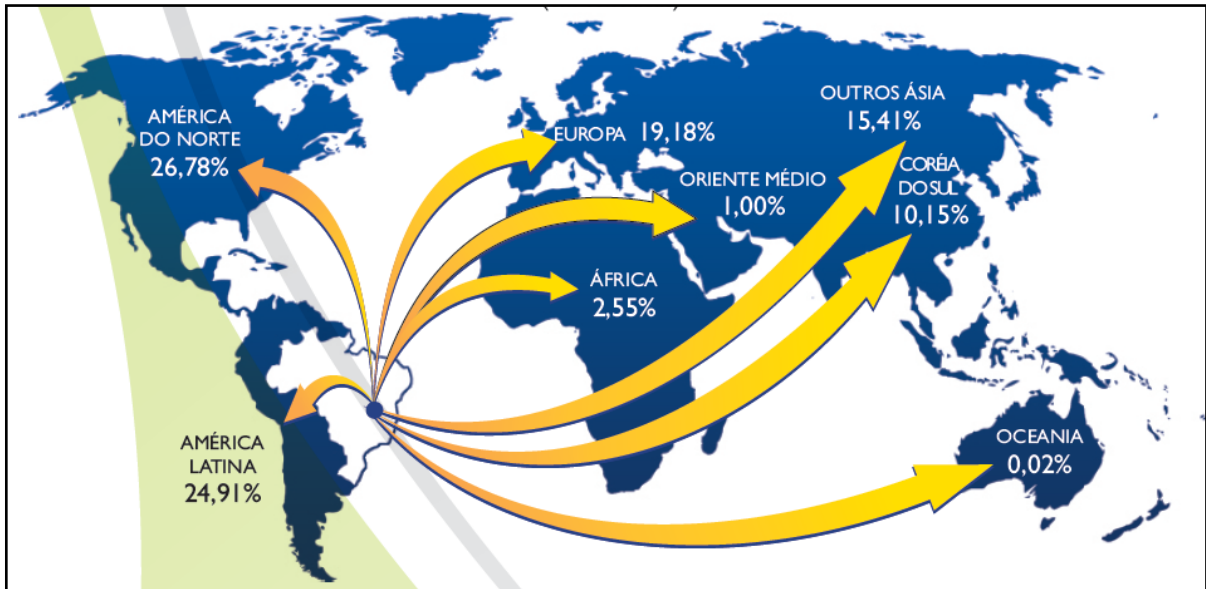


Figura 2.14 – Destino das exportações de produtos siderúrgicos em 2011 (em ton.) (IABR, 2012).

A participação do setor produtor de aço no PIB do Brasil é de 4%, considerando efeitos econômicos diretos, indiretos e induzidos (Fundação Getúlio Vargas (FGV) *apud* IABR, 2012).

Os principais setores consumidores de aço são: construção civil; automotivo; bens de capital, máquinas e equipamentos (incluindo agrícolas); utilidades domésticas e comerciais. A Figura 2.15 apresenta a distribuição setorial do consumo aparente de aço no Brasil, tendo como referência o ano de 2010:

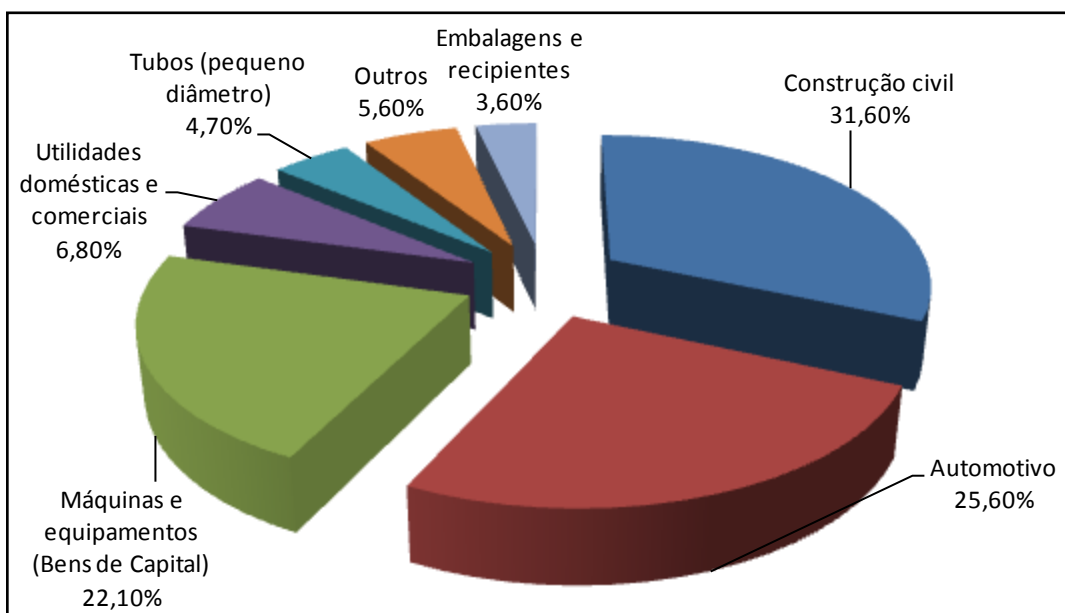


Figura 2.15 – Distribuição setorial do consumo aparente de aço no Brasil (IABR, 2012).

O consumo per capita de aço no Brasil foi 145 quilos de aço bruto/habitante, no ano de 2011 (IABR, 2012). Este valor é consideravelmente baixo quando comparado a países como China e Turquia, onde o consumo per capita é de 466 (REVISTA PORTOS E NAVIOS, 2012) e 322 kg/hab/ano (INDIA-BRAZIL CHAMBER, 2012), respectivamente. Segundo a Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCM), esta diferença é explicada por um conjunto de fatores, dentre os quais se destaca o fator histórico, visto que a construção no país sempre foi tradicionalmente dependente do concreto, mesmo depois da consolidação do setor siderúrgico no país. Segundo a ABCM, isto ocorre devido à abundância de mão de obra barata para se construir com alvenaria somada ao pouco conhecimento sobre os materiais, o que resultou em uma tradição cultural de construir com concreto, a despeito da maior sustentabilidade das construções com estruturas metálicas, que podem ser integralmente recicladas.

Quanto às incertezas apresentadas quanto à oferta de aço no mundo nos próximos anos pelo setor de construção civil, de acordo com estudo desenvolvido por Mourão (2008), a siderurgia brasileira estará garantida quanto ao suprimento do melhor minério de ferro e pelotas existentes no mercado mundial. O autor relata que altos investimentos estão sendo realizados, tanto na mineração, que atingirá cerca de 632 milhões de toneladas por ano, em 2012, quanto na pelletização e em logística, visando ao atendimento da expansão do setor siderúrgico no país.

O Estado do Rio de Janeiro, neste contexto, devido à sua localização estratégica e ao grande investimento que vem realizando no setor portuário, apresenta grande potencial para ser, até 2020, o maior produto de aço do país.

#### 2.4 Processo industrial de fabricação de aço

A fabricação do aço em uma indústria siderúrgica pode ocorrer por meio de dois processos principais: o processo integrado e o processo semi-integrado. A principal diferença entre estes dois processos é que o primeiro parte do minério de ferro, enquanto o segundo parte da sucata metálica e, em menor proporção, do ferro gusa. Nesta dissertação, será abordado o processo integrado, por ser este mais complexo e com maior apelo para a minimização do consumo de água e da geração de efluentes líquidos industriais.

A siderurgia integrada envolve basicamente cinco etapas: preparação de cargas, redução, conversão e refino, lingotamento e laminação. Uma representação esquemática dos processos integrado e semi-integrado é apresentada na Figura 2.16. Uma apresentação mais detalhada dos processos é realizada na Figura 2.17.

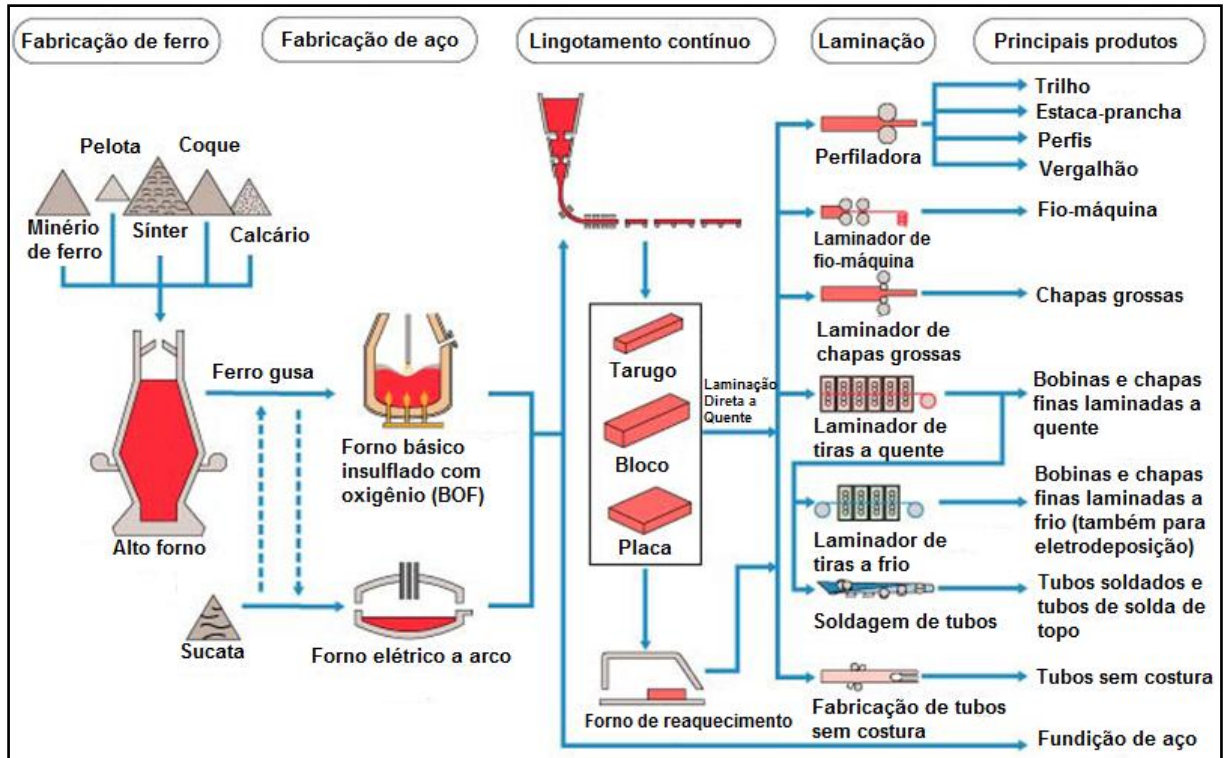


Figura 2.16 – Processo de fabricação de aço (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

Apesar da simplicidade aparente, a operação de uma siderúrgica integrada é caracterizada por uma série de complexas suboperações. Desta forma, entende-se que, o conhecimento do desenvolvimento deste processo é imprescindível para a correta identificação dos principais pontos de consumo de água e de geração de efluentes líquidos.



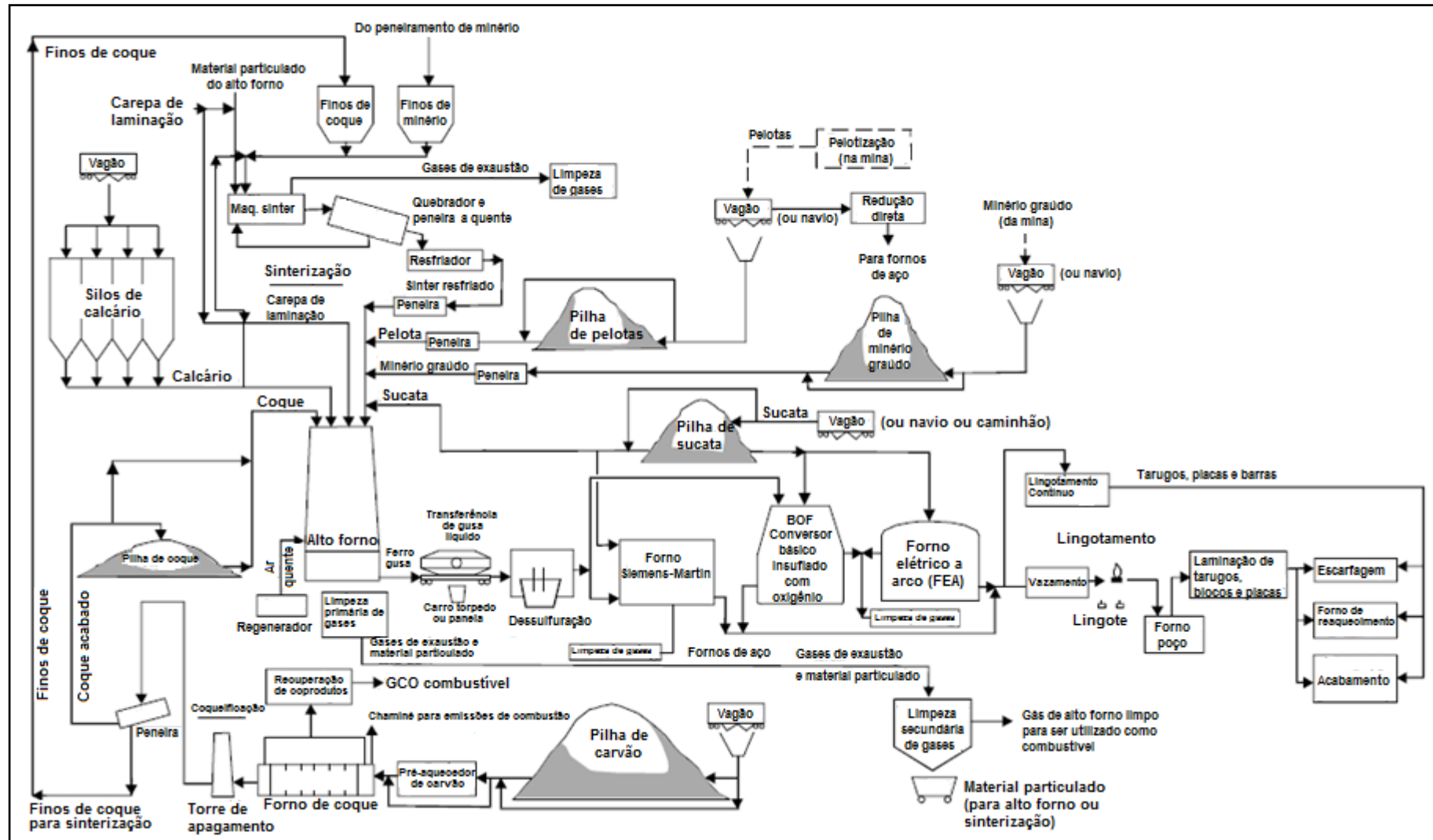


Figura 2.17 – Diagrama geral de fluxos em uma indústria siderúrgica (EPA, 2012).

Embora não esteja presente na composição do aço, o processo de fabricação deste produto demanda grande quantidade de água, ao mesmo tempo em que, em proporções que variam em cada usina, também gera grandes quantidades de efluentes líquidos industriais e, em menor quantidade, sanitários, de forma que a disponibilidade de água apresenta-se como fator decisivo para o desenvolvimento da atividade siderúrgica. Suvio (2012) avaliou dados de gerenciamento do consumo de água em siderurgia, referentes a 29 usinas, que representam 8% (111 Mtpa) da produção mundial de aço. Os resultados mostraram que o consumo de água em diferentes siderúrgicas varia entre menos de 1 e 150 m<sup>3</sup> por tonelada de aço produzido, dos quais 82% são utilizados com propósito de resfriamento. Dentre os principais fatores que determinam a quantidade e qualidade da água utilizada e dos efluentes líquidos descartados destacam-se a configuração da siderúrgica, a localização geográfica e a legislação vigente.

De uma forma geral a qualidade de água requerida é atendida com processos de tratamento simples, tais como, filtração, clarificação e neutralização. A reutilização de correntes aquosas pode ser obtida, portanto, a partir de técnicas físicas, químicas e físico-químicas, visando minimizar a formação de incrustações, reduzir os processos de corrosão e controlar o desenvolvimento microbiológico. A água destinada à geração de vapor deve ser adicionalmente submetida aos processos de descarbonatação, desmineralização e desaeração, de forma a reduzir a formação de películas isolantes ou pontos de corrosão nas tubulações que compõe a caldeira, que comprometeriam, por conseguinte, a sua integridade mecânica.

A utilização da água em unidades siderúrgicas varia consideravelmente de acordo com os requerimentos de processo. De uma maneira geral, a água é utilizada para três propósitos principais (JOHNSON, 2003):

- Transferência de calor – Representa o principal consumo de água em uma usina siderúrgica integrada. A obtenção de ferro gusa e, posteriormente, do aço, ocorre por meio de aquecimento das matérias primas a temperaturas da ordem de 1.425 a 1.650 °C, necessariamente superiores à temperatura de fusão do ferro, enquanto que operações de laminação a quente requerem o aquecimento de placas de aço a temperaturas entre 1.150 e 1.260 °C. Os equipamentos de processo são protegidos por uma combinação de revestimento refratário e resfriamento com água do refratário e da carcaça metálica do equipamento.

- Controle de poluição do ar e condicionamento de gases – As principais correntes de gases formados no processo siderúrgico integrado, quais sejam, gás de coqueria, gás de alto forno e gás de aciaria devem ser tratados, por meio de lavadores de gases, para remoção de poluentes do ar. São cada vez mais comuns plantas que reutilizam estas correntes de gases como alternativa a combustíveis fósseis em caldeiras para a cogeração de vapor e eletricidade. A água também é utilizada para a absorção de gases nas operações de acabamento.

- Condicionamento de materiais – em menor quantidade que nos dois casos anteriores, utiliza-se água com propósitos diversos, para melhorar a qualidade de matérias primas e produtos ao longo da produção do aço. Dentre os principais exemplos podem ser citados os seguintes usos: como elemento aglomerante na mistura a sinterizar; na granulação de escória gerada pelos altos fornos; na remoção de carepa na laminação a quente; como solvente para ácido nas operações de decapagem; rinsagem nas operações de limpeza e como solvente nos banhos de deposição eletrolítica, nas operações de acabamento.

Segundo Johnson (2003), de uma forma geral, 75% do uso de água está associado a operações de transferência de calor, 13% ao controle de poluição do ar e 12% ao condicionamento de materiais. Um detalhamento do consumo de água por unidade siderúrgica é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Uso de água para várias unidades de operação em siderurgia (JOHNSON, 2003).

Processo	Condicionamento de materiais (galão/t produto)	Controle de poluição do ar (galão/t produto)	Transferência de calor (galão/t produto)	Consumo de energia (MM Btu/t produto) <sup>(1)</sup>	Fração reciclada/ Reusada (%)
Coqueificação	200	250-300	8.000-8.500	5,1	0 <sup>(2)</sup>
Caldeiras <sup>(3)</sup>	-	-	40.000-120.000	7,5 <sup>(4)</sup>	- <sup>(5)</sup>
Sinterização	20-30	900-1.000	200	2,2	80
Alto forno	100-200	800-1.000	2.500-3.000	15,48	90
Caldeiras <sup>(6)</sup>	-	-	20.000-60.000	3,2 <sup>(7)</sup>	- <sup>(5)</sup>
Aciaria BOF	100-200	800-1.000	2.500-3.000	1,17	50
Processo de Redução Direta (DRI)	70-80	Desprezível	200-250	8,3	80
Forno elétrico	Desprezível	Desprezível	2.000-2.500	5,65	80

a arco (FEA)					
Lingotamento Contínuo	Desprezível	Desprezível	3.000-3.500	0,15	70
Laminação de chapas grossas	1.000-2.000	Desprezível	7.000-8.000	3,0	30
Laminação de tiras a quente	400-600	Desprezível	7.000-8.000	2,2	60
Decapagem ácida	30-40	80-100	20-30	0,2	70
Laminação de tiras a frio	50-100	Desprezível	2.500-3.000	4,2	90
Revestimento	60-70	1-10	1.200-1.800	5 – 8 <sup>(8)</sup>	80

(1) MM Btu significa  $1 \times 10^6$  British Thermal Units.

(2) Plantas novas podem reciclar água de resfriamento.

(3) Caldeiras para conversão de gás de coqueria, alcatrão e óleos leves.

(4) Energia exportada na forma de gás, alcatrão e óleos leves.

(5) Varia de acordo com a idade das caldeiras.

(6) Caldeiras para conversão do gás de alto forno.

(7) Energia exportada na forma de gás de alto forno.

(8) Dependendo do processo ou produto.

Analisando-se a tabela 2.1, observa-se que dentre as unidades de processo as que mais consomem água em média são: coqueificação, laminação, redução e conversão. Dentre as unidades auxiliares, destacam-se as caldeiras integrantes das termelétricas que aproveitam o conteúdo energético dos gases siderúrgicos para a produção de vapor e eletricidade.

Ao mesmo tempo, o processo siderúrgico é caracterizado por elevadas perdas de água por evaporação, que ocorrem em operações como granulação de escória nos altos fornos e aciaria, apagamento de coque, aspersão de água para resfriamento de aço no lingotamento e laminação, além de perdas por evaporação e respingos em torres de resfriamento, utilizadas amplamente em sistemas de resfriamento tanto por contato direto como por contato indireto (JOHNSON, 2003). A Tabela 2.2 apresenta as perdas por evaporação e geração de efluentes líquidos para várias operações siderúrgicas.

Tabela 2.2 – Perdas por evaporação e geração de efluentes para várias operações siderúrgicas (JOHNSON, 2003).

Processo	Reposição (galão/t produto)	Evaporação (galão/t produto)	Descarte de água de contato (galão/t produto)	Descarte de água de não contato (galão/t produto)	Taxa de reciclo/reúso (galão/t produto)
Coqueificação	8.800	230	260	8.310	- <sup>(1)</sup>
Sinterização	240	100	140	Desprezível	1.000
Alto forno	350	70	25	260	3.500
Aciaria BOF	2.100	120	140	1.840	2.050
Processo de Redução Direta (DRI)	290	20	Desprezível	270	1.000
Forno elétrico a arco (FEA)	250	Desprezível	Desprezível	250	2.000
Lingotamento Contínuo	1.000	10	10	980	2.200
Laminação de chapas grossas	6.700	30	2.300	3.000	2.700
Laminação de tiras a quente	3.100	30	1.750	15	4.700
Decapagem ácida	60	15	15	30	120
Laminação de tiras a frio	80	4	1	75	3.000
Revestimento	250	10	60	180	1.400

<sup>(1)</sup> Desprezível a significante, dependendo da idade da planta.

As correntes aquosas que abastecem as diferentes operações siderúrgicas podem ser tratadas e reutilizadas ou lançadas no corpo receptor, desde que atendam às leis e regulamentos vigentes, que via de regra, têm se tornado cada vez mais restritivos. Na maioria dos casos apresentados, o consumo de água e a geração de efluentes líquidos industriais podem ser reduzidos drasticamente a partir de estratégias de reutilização, seja por meio do reúso ou do reciclo destas correntes.

Nos itens a seguir serão apresentadas em maiores detalhes as unidades siderúrgicas, com o objetivo de, a partir de um entendimento mais claro dos diversos processos, ser possível identificar as operações que demandam o consumo de água, a qualidade requerida, os pontos de geração de efluentes líquidos industriais e

suas características e possibilidades de tratamento visando o desenvolvimento de estratégias de reúso, levando-se em consideração dados obtidos de uma usina siderúrgica.

#### 2.4.1 Preparação de cargas

A preparação de cargas compreende diversas operações, dentre as quais se destacam: armazenamento e beneficiamento de matérias primas; armazenamento e beneficiamento de carvão e coque; coqueificação; calcinação e sinterização. Cada uma destas operações será detalhada a seguir.

##### 2.4.1.1 Armazenamento e beneficiamento de matérias primas

As matérias primas podem chegar a uma indústria siderúrgica de várias formas, sendo mais comuns o transporte marítimo e o ferroviário e, em menor proporção o transporte rodoviário, o que irá depender da localização da planta. Estes materiais são armazenados em grandes pátios, usualmente constituídos por diversas pistas, onde após o recebimento, as matérias primas são dispostas em pilhas, com base e altura máxima projetados para possibilitar um apropriado manuseio e a recuperação de materiais.

O padrão de empilhamento depende das características físico-químicas dos materiais estocados. Além do minério de ferro, matéria prima principal, outros materiais são armazenados nestes pátios, tais como fundentes e escorificantes, dentre os quais podem ser citados o calcário, o dolomito, a fluorita. A principal função destes materiais no processo consiste em facilitar a fusão de impurezas contidas no minério de ferro, tais como sílica e alumina, e fornecer substâncias que combinem preferencialmente com estas impurezas, de forma a retirá-las do metal, tornando a escória mais fluida (ARAÚJO, 1997).

As matérias primas deixam os pátios através de retomadoras e correias transportadoras que as conduzem aos silos de armazenamento e para posterior beneficiamento para serem utilizadas nas operações siderúrgicas subsequentes.

O consumo de água nesta unidade está associado à necessidade de aspersão das pilhas de material pulverulento, para controle de emissões de material particulado por arraste eólico. A Figura 2.18 mostra uma imagem desta operação.



Figura 2.18 – Operação de aspersão de pilhas em pátios de matérias primas (ABM, 2012).

Os efluentes líquidos gerados neste processo constituem-se da água de percolação das pilhas, seja por meio da aspersão visando o controle de emissões atmosféricas ou devido às precipitações pluviométricas, além de eventual contribuição de sistemas de aspersão em pontos de transferência entre correias e estações de descarregamento de materiais.

Em geral, recomenda-se que estes pátios possuam um sistema de drenagem superficial e subsuperficial que permita o reaproveitamento de água pluvial, com o duplo benefício de redução de consumo de água acompanhada pela redução do descarte de efluentes líquidos contendo partículas finas que são arrastadas destes materiais.

Complementarmente ao sistema de drenagem superficial, o reaproveitamento destas correntes aquosas demanda a presença de uma bacia de decantação, para sedimentação gravitacional dos sólidos em suspensão. Contudo, cabe observar que a remoção alcançada apenas com a bacia de decantação, mesmo quando esta é bem projetada e operada, é limitada (WOODROW, 2001).

Considerando as características deste efluente, entende-se que o mesmo pode apresentar um resultado final consideravelmente superior se enviado para uma estação de tratamento de efluentes líquidos por método físico-químico. Este método, já universalmente consagrado, é composto pelas etapas de coagulação, floculação e sedimentação, podendo ser complementados com filtração e/ou centrifugação.

O uso de coagulantes primários como sulfato de alumínio, cloreto de cálcio e cloreto férrico é um dos métodos mais empregados no tratamento de efluentes contendo metais pesados (WOODROW, 2001). Contudo, deve-se ressaltar que o sucesso da aplicação destes coagulantes depende diretamente da eficiência da etapa de equalização, uma vez que a precipitação de metais ocorre em faixas específicas de pH.

Objetivando uma abordagem o mais realista possível dos processos ora em estudo, foram obtidos dados de caracterização de uma indústria siderúrgica integrada típica, que, embora apresente tratamento adequado para a maioria de seus efluentes e um índice de reutilização de correntes aquosas relativamente alto, solicitou que não fosse identificada nesta dissertação. Os dados mostram que a operação dos pátios de matérias primas demandam uma vazão operacional média de 379 t/h, uma vazão relativamente alta comparada a outros processos industriais, mas relativamente baixa quando comparado a outras operações siderúrgicas. Os efluentes líquidos dos pátios de matérias primas apresentam uma concentração média de 73 mg SST/L e o tratamento proporcionado pela bacia de decantação é suficiente para a redução desta concentração para 22 mg SST/L. Outros parâmetros importantes para o controle são pH, temperatura, DQO, ferro e materiais sedimentáveis.

Mesmo sem desenvolver os cenários de reúso, já é possível apontar o potencial da utilização da regeneração complementar das correntes aquosas oriundas da operação dos pátios de matérias primas como forma de minimizar o consumo de água e a geração de efluentes líquidos industriais nesta operação.

#### 2.4.1.2 Armazenamento e beneficiamento de carvão e coque

De forma similar ao processo descrito anteriormente, o armazenamento de carvão e coque também ocorre em pátios de estocagem, e o seu manuseio é realizado utilizando-se máquinas retomadoras e correias transportadoras. Entretanto, enquanto o circuito no pátio de matérias primas compreende as unidades de sinterização e calcinação, o principal destino do carvão armazenado é uma unidade denominada coqueria, que como o nome indica, é responsável pela transformação do carvão mineral em coque, com as propriedades metalúrgicas adequadas para possibilitar a ocorrência de altas temperaturas no alto forno, da



ordem de 1500 °C, necessária para a fusão do ferro, e também para a reação de redução do minério, na qual, basicamente, ocorre a associação dos átomos de oxigênio do minério com o carbono do coque, liberando o ferro metálico.

Devido à exaustão dos depósitos de carvão com médio teor de voláteis, tornou-se necessário misturar diferentes tipos de carvão para, com a combinação de suas propriedades, procurar reconstituir as características de um carvão de médio teor. Ao passo que um carvão com alto teor de voláteis, carvão AV, torna-se muito plástico durante o aquecimento, produzindo um coque demasiadamente poroso, com muitas trincas e fissuras, um carvão com baixo teor de voláteis, carvão BV, devido à alta expansividade, pode causar danos às paredes da coqueria pela pressão excessiva (ARAÚJO, 1997).

O consumo de água nesta unidade também está associado à necessidade de aspersão das pilhas visando o controle de emissões de material particulado, e também a uma questão de segurança de processo, dadas as características combustíveis dos materiais armazenados.

Embora os efluentes líquidos apresentem características distintas, a composição de sólidos em suspensão totais é próxima a registrada nas águas de percolação do pátio de matérias primas, com uma concentração de 87 mg SST/L.

A regeneração destas correntes aquosas depende de um eficiente sistema de drenagem superficial e subsuperficial que direcione as águas drenadas e as águas percoladas para uma bacia de decantação e, posteriormente, para uma estação de tratamento de efluentes por método físico-químico.

Os resultados de caracterização nesta operação mostram que o pátio de carvão demanda uma vazão operacional de 82 t/h, valor consideravelmente inferior ao observado para o pátio de matérias primas, o que pode ser explicado pelas diferentes características dos materiais. A concentração dos efluentes conduzidos pelo sistema de drenagem é de 87 mg SST/L, valor quase 20% superior ao encontrado nas águas residuárias do pátio de matérias primas.

A condução desta corrente para uma estação de tratamento por método físico-químico resulta em um efluente tratado com concentração igual a 19 mg SST/L, de acordo com dados obtidos de uma planta real, o que sinaliza para a possibilidade de reúso desta corrente. Parâmetros como DQO, cianetos, fenol, manganês, nitrogênio amoniacal, materiais sedimentáveis, sólidos dissolvidos totais, pH e temperatura, também devem ser controlados.



O coração da planta de cal é o forno, sendo o tipo predominante o forno rotativo, que é responsável pela produção de 90% da cal nos Estados Unidos (EPA, 2012). O forno rotativo é longo, cilíndrico e levemente inclinado e conta com paredes refratárias, através das quais o calcário e os gases quentes de exaustão passam em contracorrente. Seu diâmetro varia, conforme a produção, entre 1,8 e 5,0 m, e o comprimento entre 18 e 80 m, sendo a rotação da ordem de 5 a 6 rpm. Como a reação de calcinação é endotérmica, faz-se necessário o aquecimento do forno rotativo. Os principais combustíveis utilizados são carvão, óleo combustível e gás natural. A reação de calcinação ocorre entre 900°C e 1200°C, sendo necessários entre 900 e 1.200 kcal/kg, embora o consumo teórico seja de 750 kcal/kg. De acordo com a estequiometria da reação de calcinação, são necessários 1.785 kg de calcário para a fabricação de 1.000 kg de cal (ARAÚJO, 1997). Resfriadores de produtos e preaquecedores de matérias primas dos fornos rotativos podem ser configurados de forma a permitir uma integração energética, baseada na recuperação do calor contido na cal aquecida e nos gases quentes de exaustão.

Como visto anteriormente, a cal é utilizada com fundente em siderurgia. As impurezas que acompanham os minérios fundem acima de 1.710°C ( $\text{SiO}_2$ ) até 2.030°C ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo necessária a adição de materiais que combinem com a ganga do minério, formando uma escória de baixo ponto de fusão (ARAÚJO, 1997).

De acordo com o mesmo autor, na sinterização a cal é adicionada sob a forma de calcário, em uma proporção de 4 a 10% e granulometria de 0 a 3 mm, sendo calcinada durante a operação. Ela funciona como ligante através de uma fase líquida formada pela reação da cal com a sílica e com os óxidos de ferro, reduzindo ou eliminando a necessidade de adição de carbonato de cálcio no alto forno. Na pelletização, a cal atua como ligante, conferindo resistência às pelotas cruas durante o manuseio até o endurecimento por aquecimento. O consumo é da ordem de 22 a 30 kg/t na forma de cal hidratada. No alto forno a cal é necessária para a solubilização da ganga do minério em uma escória fluida, que se separa do ferro gusa. Esta escória apresenta composição de 30% de  $\text{SiO}_2$ , 15% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e 45%  $\text{CaO}$ . A granulometria para utilização no alto forno varia entre 50 e 100 mm. Outra importante aplicação do  $\text{CaO}$  é na operação de dessulfuração de gusa, que ocorre antes da etapa de conversão do mesmo em aço. Na dessulfuração, a parcela de ferro contida na forma de sulfeto de ferro é reduzida a ferro metálico por meio da seguinte reação:  $2 \text{FeS} + 2 \text{CaO} + \text{Si} \rightarrow 2 \text{CaS} + \text{SiO}_2 + 2 \text{Fe}$ . O consumo de cal viva

nesta operação é de 20 a 30 kg/t, sendo as dimensões apropriadas de 15 a 65 mm. Na aciaria L.D., tipo mais comumente encontrado na siderurgia integrada, utiliza-se cal virgem na proporção de 50 a 75 kg/t e granulometria na faixa de 8 a 40 mm.

Os principais pontos consumidores de água, que ocasionam a geração de efluentes líquidos, são a operação de hidratação de cal virgem, a operação de lavadores de gases dos calcinadores e a aspersão para abatimento a úmido de material particulado no descarregamento, armazenamento e operação de materiais.

Um tratamento tipicamente utilizado consiste na remoção de sólidos em suspensão totais por meio de sedimentação gravitacional seguida de neutralização, visto que os efluentes líquidos são alcalinos, devido às características dos materiais processados. A análise de uma planta siderúrgica indica que a operação de calcinação demanda uma vazão operacional de 23 t/h. O efluente final apresenta 38 mg SST/L, podendo ser reduzido para 14,4 mg SST/L, empregando-se tratamento físico químico. Outros parâmetros que devem ser controlados são dureza, sílica, cloretos, DQO, óleos e graxas, metais, materiais sedimentáveis e turbidez.

#### 2.4.1.4 Coqueificação

A coqueificação consiste no processo de remoção de compostos voláteis do carvão, em geral carvão betuminoso, por meio de aquecimento a altas temperaturas (900 – 1100°C) e em atmosfera deficiente em oxigênio, podendo durar de 16 a 18 horas, e objetiva concentrar o carbono. O produto desta destilação seca é um produto sólido poroso denominado coque, que ao final do processo deixa os fornos da coqueria e é conduzido para uma torre de apagamento e, na sequência para a moagem e peneiramento, para posterior utilização na sinterização e no alto forno (STEEL UNIVERSITY, 2012).

O coque é uma importante matéria prima na siderurgia, sendo utilizado como fonte de carbono, permitindo a redução do minério no alto forno e como fonte de energia para aquecimento e fusão dos materiais carregados. O coque utilizado no alto forno deve ter um teor alto de carbono e baixo de cinzas e enxofre e deve ter uma porosidade apropriada, assim como boa resistência, para garantir que ele forneça boa reatividade e não pulverize ao chocar-se com a corrente de gás em contracorrente no alto forno, mesmo em altas temperaturas (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012). A admissão de coque de alta qualidade no alto forno resulta em

uma taxa de consumo de coque mais baixa, maior produtividade e menor custo de metal quente (AISI, 2012). Uma especificação típica de qualidade para coque mostra que a umidade deve ser de no máximo 0,1 a 0,2% quando utilizado apagamento a seco e 2 a 5% quando utilizado apagamento a úmido. O teor de cinzas deve ficar entre 11 e 12% e o material volátil entre 0,5 e 0,6% (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

De uma forma geral, o processo de coqueificação pode ser dividido em duas categorias, quais sejam coqueificação sem recuperação de coprodutos ou com recuperação de energia (*heat recovery coke plant*) e coqueificação com recuperação de coprodutos (*by-products recovery*).

#### Coqueificação com recuperação de energia (*heat recovery*)

Em coquerias com recuperação de energia o carvão é coqueificado em grandes fornos, que apresentam base em formato retangular e topo arqueado, como é mostrado na Figura 2.20. As dimensões típicas de uma planta americana são comprimento x largura x altura iguais a 14 x 3,5 x 2,4 m, que podem receber até 45 toneladas de carvão por carregamento. O processo de coqueificação com recuperação de calor tem sido operado com sucesso nos Estados Unidos desde 1998 (IPCC, 2010).



Figura 2.20 – Coqueria com caldeira para recuperação de calor (AISI, 2012).

As coqueiras com recuperação de calor são derivadas de fornos colméia, que não possuem utilização/limpeza dos gases de combustão, ainda em operação na China (IPCC, 2010). A base para os atuais fornos com recuperação de calor é o forno Jewell-Thompson, em que vários fornos são agrupados, formando longas baterias (Figura 2.21).

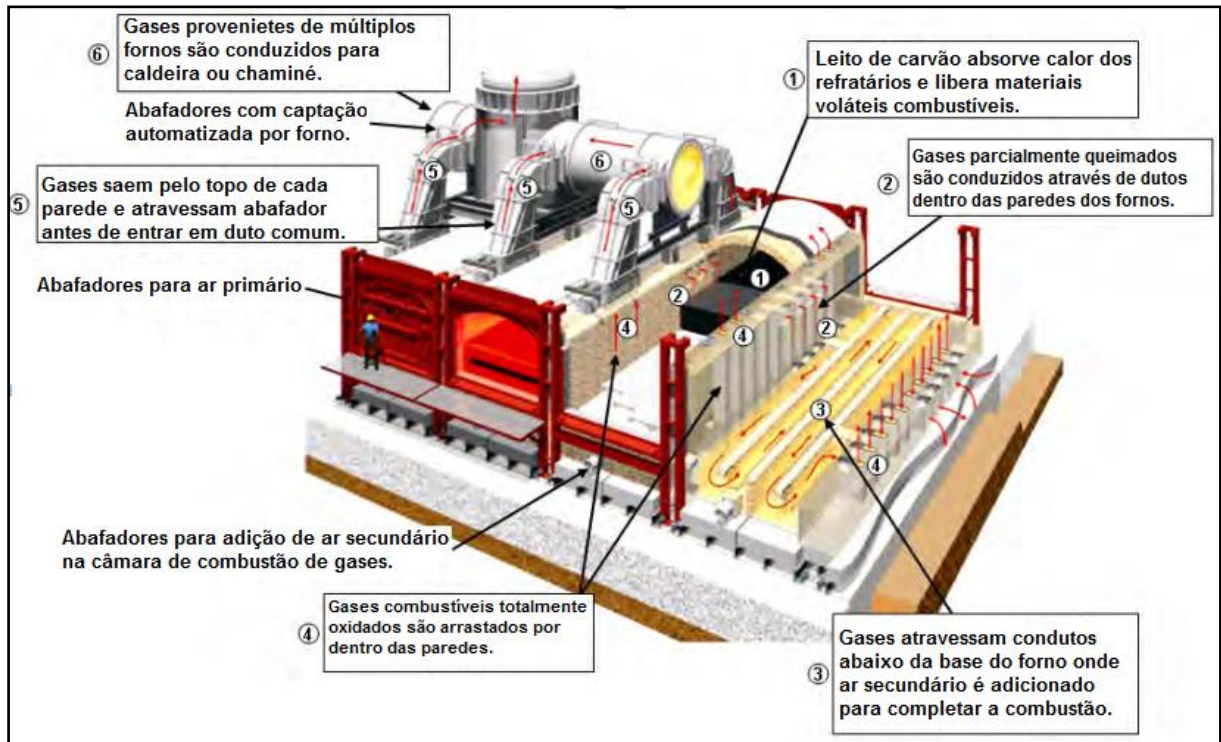


Figura 2.21 – Forno Jewell-Thompson e coqueira com recuperação de calor (IPCC, 2010).

A coqueificação ocorre a partir do topo do forno por transferência de calor por radiação e a partir do fundo do forno por condução através da base do forno. Ar primário para combustão é introduzido na câmara do forno através de vários orifícios localizados acima do nível da carga em ambos os lados do forno, de entrada do carvão (*pusher side*) e saída de coque (*coke side*). Gases parcialmente queimados deixam o topo da câmara através de tubos de escoamento descendente (*down comer*) na parede do forno e entram na câmara de combustão de gases sob o piso do forno, onde são queimados a temperaturas entre 1.200 e 1.400 °C, aquecendo-o e fornecendo calor para a coqueificação da carga de carvão. Os gases de combustão são coletados e conduzidos para uma caldeira, que converte o excesso de calor em vapor para a geração de energia elétrica (UNITED STATES STEEL, 1985, IPCC, 2010 e AISI, 2012). Por este motivo o processo é chamado de

coqueificação com recuperação de calor. Após passar pela caldeira os gases são lançados na atmosfera, após, geralmente, passar por um sistema de controle para abatimento de dióxido de enxofre.

### Coqueificação com recuperação de coprodutos (*by-products recovery*)

Nesta dissertação, será considerada para desenvolvimento dos cenários a coqueria com recuperação de coprodutos por dois motivos principais. Em primeiro lugar, por ser a tecnologia convencionalmente empregada no Brasil e mesmo em outros países, como, por exemplo, países da Europa. Em segundo lugar, por estar presente na maior parte das usinas siderúrgicas mais antigas, que são justamente aquelas que apresentam maior dificuldade de desenvolver e aplicar estudos de reúso, devido a limitações impostas pelo arranjo original de suas unidades. A representação esquemática de uma coqueria com recuperação de coprodutos é apresentada na Figura 2.20.

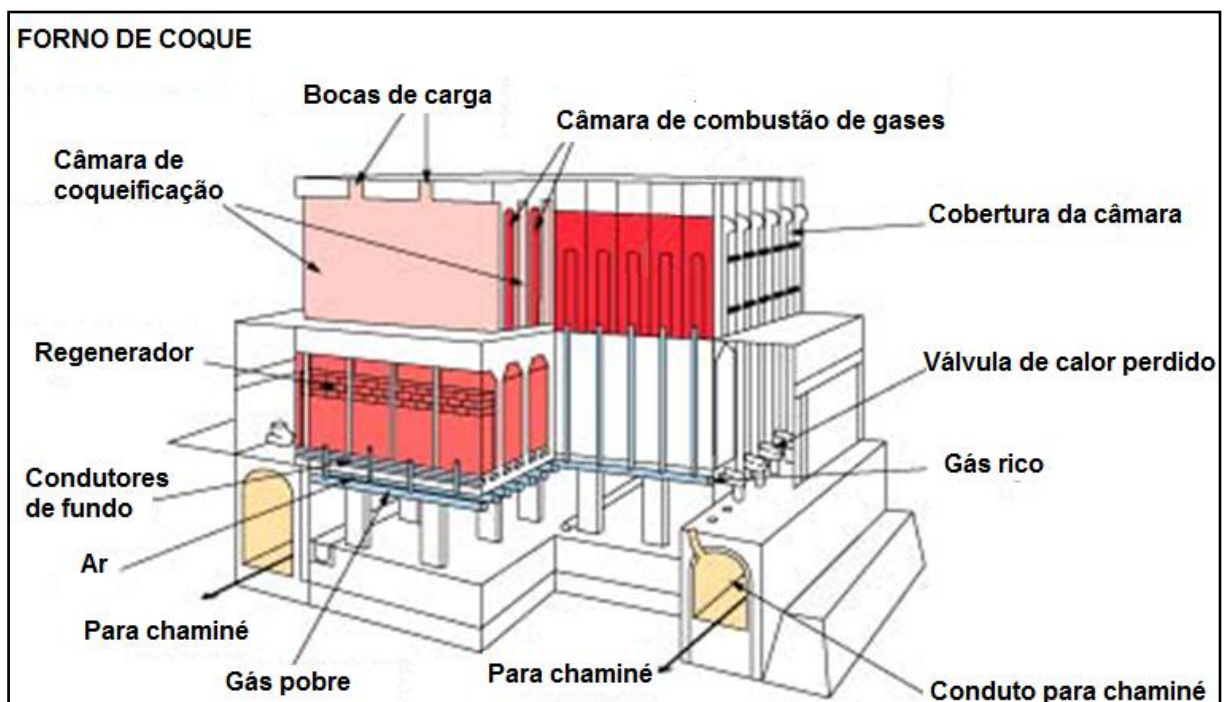


Figura 2.22 – Representação esquemática de um forno de coqueificação com recuperação de coprodutos (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

Após a seleção e mistura apropriada de diferentes tipos de carvão, este é carregado pelo topo dos fornos da bateria, com auxílio de uma máquina

enfornadora. As baterias podem conter mais de 70 fornos com dimensões típicas de 14 m de comprimento, 6 m de altura e largura variando entre 0,3 e 0,6 m, podendo receber acima de 30 toneladas de carvão por carregamento (IPCC, 2010).

Após o nivelamento do carvão e o fechamento do topo do forno, tem-se início a coqueificação, que ocorre em atmosfera redutora, sendo os gases residuais coletados e enviados para uma unidade de limpeza de gás de coqueria e recuperação de coprodutos (AISI, 2012).

De acordo com a AISI (2012), a transformação do carvão em coque, que em verdade é uma pirólise seca do carvão, com o calor sendo transferido das paredes refratárias aquecidas para a carga de carvão, ocorre em três etapas: De 375°C a 475°C, o carvão se decompõe formando camadas plásticas próximo de cada parede. De cerca de 475°C a 600°C, há uma marcada evolução de alcatrão e compostos orgânicos voláteis, seguida de resolidificação da massa plástica em semicoque. Entre 600°C e 1100°C, a estabilização da fase coque se inicia. Esta etapa é caracterizada pela contração da massa de coque, desenvolvimento estrutural do coque e evolução final de hidrogênio. Uma vez que as camadas plásticas tenham encontrado o centro do forno, a totalidade da massa terá sido coqueificada, como pode ser observado na Figura 2.23.

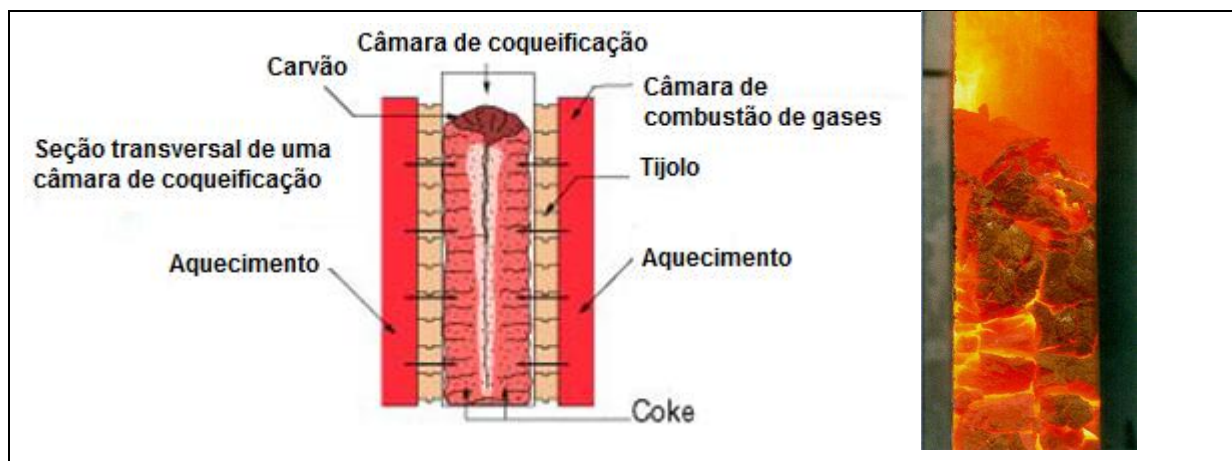


Figura 2.23 – Visualização em corte de um forno de coqueificação (AISI, 2012).

A massa de coque incandescente é empurrada do forno e, em seguida, segue para apagamento úmido, com água, ou seco, com nitrogênio, antes de ser beneficiada e destinada para o alto forno. A Figura 2.24 mostra as operações de descarregamento (*esq.*) e apagamento úmido (*dir.*) de coque.





Figura 2.24: Bateria de fornos de uma coqueria, com coque incandescente recém-descarregado (esq.) (AISI, 2012) e torre de apagamento úmido de coque (dir.) (GLOWIMAGES, 2012).

O principal consumo de água da coqueria está relacionado à torre de apagamento, quando é realizado o apagamento úmido de coque. Informações de uma planta típica indicam que a demanda pode chegar a 807 t/h, dos quais 161 t/h são perdidos por evaporação durante o apagamento.

Os efluentes gerados nesta operação são as águas residuárias das torres de apagamento de coque e as águas residuárias provenientes das áreas no entorno das baterias da coqueria. Esta última contribuição é resultante do arraste de finos de carvão ou de coque, que podem ser resultantes do arraste eólico no carregamento e no descarregamento, respectivamente, ou ainda, arrastados pelo vapor durante a própria operação de apagamento e depositados posteriormente por sedimentação gravitacional nas proximidades das baterias. Estas águas residuárias podem apresentar concentração de SST, um importante parâmetro global para controle e monitoramento, de 229 mg/L. Parâmetros como pH, temperatura, fenóis, DQO, amônia, cianetos e materiais sedimentáveis também devem ser controlados. O tratamento convencional utilizado é a sedimentação gravitacional em bacias de decantação, seguida de filtros, para remoção adicional de sólidos, que resulta em um efluente com 69 mg SST/L. O tratamento físico-químico apresenta-se como uma alternativa ao tratamento convencionalmente utilizado, podendo possibilitar a redução de SST para 11 mg/L.

## Tratamento de gases e recuperação de coprodutos

O gás de coqueria é formado pela corrente de voláteis que deixa os fornos da coqueria pelo tubo de ascensão e coletor principal. Apesar de a sua composição variar de acordo com o tipo de carvão utilizado e o tempo de coqueificação empregado, pode-se dizer que apresenta a seguinte composição típica: H<sub>2</sub> (46-52%v), CH<sub>4</sub> (27-35%v), CO (6-10%v), C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> (3-4%v), CO<sub>2</sub> (2-3%v) e N<sub>2</sub> (3-5%v) (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012). Como se pode perceber, o gás de coqueria é um excelente combustível, apresentando poder calorífico igual a 18.000 kJ/Nm<sup>3</sup>, valor correspondente à metade do poder calorífico do gás natural e cinco vezes superior ao poder calorífico do gás de alto forno. Nas usinas siderúrgicas integradas, este gás, após ser limpo, é totalmente utilizado para aquecimento na própria coqueria, parte do pré-aquecimento de ar no alto forno e nos fornos de reaquecimento da laminação (MOURÃO, 2007). Uma outra possibilidade é usar o gás de coqueria limpo como matéria prima na síntese química de metanol ou para separação de hidrogênio. Na China esta rota vem sendo constantemente desenvolvida, contando o país com 10 instalações em operação, que podem produzir entre 70 e 200.000 t metanol/ano (IPCC, 2010).

A limpeza do gás de coqueria está associada à remoção de diversas frações voláteis que, após serem destiladas, darão origem a uma série de produtos, dentre os quais se destacam alcatrão, óleo leve (constituído principalmente de benzeno, tolueno e xileno), enxofre e amônia. Esta complexa operação de limpeza do gás de coqueria (GCO) e recuperação dos diversos coprodutos ocorre em uma unidade denominada carboquímica, sendo as principais etapas apresentadas a seguir.

### Resfriamento

Os gases quentes contendo compostos voláteis provenientes dos fornos passam pelos tubos de ascensão a temperatura de aproximadamente 1000 °C, sendo resfriados por um jato de licor amoniacal para a temperatura necessária para saturação dos vapores de interesse, cerca de 80 °C. Esta operação demanda de 2 a 4 m<sup>3</sup> de licor amoniacal para cada tonelada de carvão coqueificado. A fase líquida obtida pelo uso do licor amoniacal e o condensado da umidade do carvão é conduzida para o separador água/alcatrão, enquanto a fase gasosa é levada para os

resfriadores primários, que podem operar em sistemas abertos ou fechados, onde a temperatura é reduzida para abaixo de 20 °C, e ocorre condensação de uma fração adicional de condensados, que também são conduzidos para o separador de água/alcatrão. Em seguida, o gás passa por exaustor e por precipitador eletrostático, onde gotículas e partículas são separadas do gás e direcionadas para o separador água/alcatrão, enquanto o gás segue para as unidades de absorção de amônia, que pode ocorrer de forma combinada com a remoção de sulfeto de hidrogênio. Finalmente, a corrente gasosa limpa passa por um resfriador final e por uma unidade de recuperação de óleos leves, sendo a seguir estocada em gasômetro para posterior uso nas diversas operações siderúrgicas. O diagrama de blocos com a sequência destas operações é mostrado na Figura 2.25 (UNITED STATES STEEL, 1985, EUROFER, 2007 *apud* IPCC, 2010).

Os principais pontos geradores de efluentes nesta operação são: drenos dos diversos equipamentos das plantas; eventual vazamento no resfriador primário; excesso de licor amoniacal proveniente do destilador de amônia; e efluente resultante do resfriamento por contato direto no resfriador final, quando utilizado.

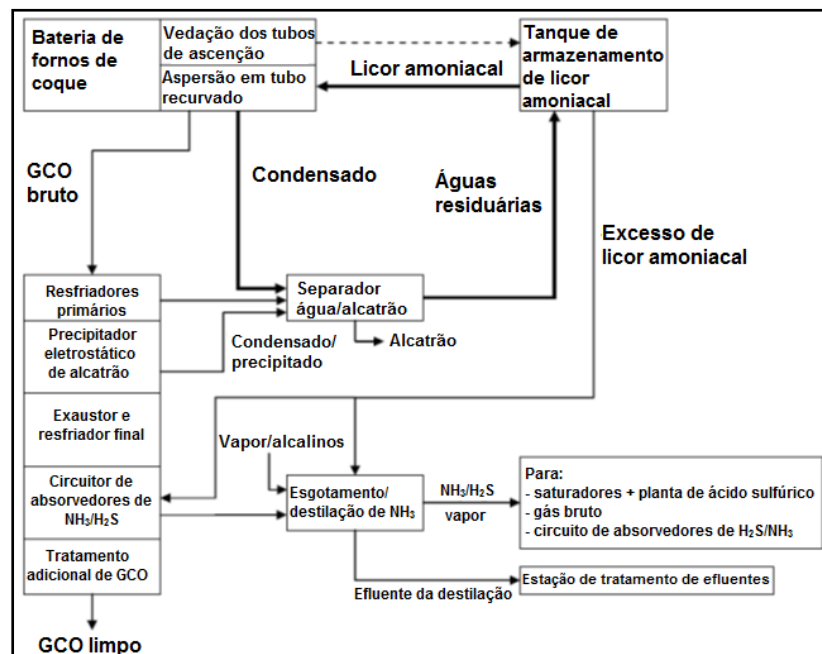


Figura 2.25 – Diagrama esquemático com os fluxos de água em uma unidade carboquímica (IPCC, 2010).

### Recuperação de alcatrão

Como visto anteriormente, a maior parte da água e dos hidrocarbonetos com alta temperatura de ebulição são condensados durante o resfriamento de gás, tanto nos tubos de escoamento descendente (*downcomer*) quanto no precipitador eletrostático, e levados para um separador de água/alcatrão. Neste equipamento separam-se as fases licor amoniacal, alcatrão e borras, sendo esta última removida por meio de raspadores. Parte do licor amoniacal é reutilizado no resfriamento do gás de coqueria, sendo o excedente conduzido para as operações de destilação e absorção de amônia ou para os absorvedores de H<sub>2</sub>S, antes de seguir para um sistema de tratamento de efluentes e posterior descarte no corpo receptor ou reúso (EUROFER, 2007 *apud* IPCC, 2010, STEEL UNIVERSITY, 2012).

Para cada tonelada de coque produzido, aproximadamente 25 a 45 kg de alcatrão podem ser recuperados (US EPA, 2001). O alcatrão recuperado pode ainda ser destilado para obtenção de diversos cortes de interesse, dentre os quais se destacam piche, naftaleno, óleo antracênico, óleo desinfetante, óleo creosoto e alcatrão para pavimentação.

As principais contribuições de efluentes líquidos desta unidade são provenientes dos drenos dos equipamentos.

### Dessulfurização

O gás de coqueria contém sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e vários compostos organosulfurados, tais como dissulfeto de carbono (CS<sub>2</sub>), oxissulfeto de carbono (COS) e mercaptanas. Estes compostos causam corrosão em tubulações e equipamentos e, por isso, devem ser removidos. Para cada tonelada de coque produzido são gerados 2,5 kg de H<sub>2</sub>S.

Existem diversas formas de se promover a remoção destes compostos do gás de coqueria. De uma forma geral, as técnicas úmidas de dessulfurização são altamente eficientes para remoção de H<sub>2</sub>S, no entanto são menos eficientes para a remoção dos demais compostos organosulfurados. Comercialmente, os processos de dessulfurização podem ser divididos em processo de oxidação úmida para produzir enxofre elementar e processo com absorção de H<sub>2</sub>S para posterior conversão em ácido sulfúrico ou enxofre elementar, sendo a eficiência de remoção

deste último processo inferior a do primeiro. Uma configuração possível é a remoção combinada de enxofre e amônia em absorvedores de gases, que será detalhada a seguir.

As fontes de geração de efluentes líquidos são as drenagens de diversos equipamentos (tanques, desidratador, decantadores, evaporador, dentre outros).

### Recuperação de amônia

A amônia formada durante a coqueificação aparece tanto no gás de coqueria quanto nos condensados que resultarão no licor amoniacal. Da mesma forma que o  $H_2S$ , a amônia causa corrosão em tubulações e equipamentos, além de impactos ambientais se queimada junto com o GCO, o que justifica a sua remoção. Para cada tonelada de coque produzido são gerados 3 kg de amônia. Comercialmente se destacam as seguintes alternativas de remoção de amônia do gás de coqueria (NEUWIRTH *et al.*, 2003, EUROFER, 2007, UN-ECE, 1990 *apud* IPCC, 2010):

- remoção combinada de  $NH_3/H_2S$ : neste processo a amônia é removida do gás de coqueria em um absorvedor utilizando água ou licor diluído como líquido de absorção. O efluente do absorvedor de amônia é utilizado como líquido de absorção no absorvedor de sulfeto de hidrogênio. O efluente deste absorvedor, por sua vez, contendo amônia e sulfeto de hidrogênio é levado a um absorvedor de amônia e a uma coluna de destilação (NEUWIRTH *et al.*, 2003, EUROFER, 2007 *apud* IPCC 2010);

- recuperação com sulfato de amônio: pode ser obtido passando-se o gás de coqueria por uma solução diluída de ácido sulfúrico;

- recuperação direta de amônia anidra: processo desenvolvido pela United States Steel Corporation sob o nome USS PHOSAM. Neste processo, a amônia é absorvida em uma solução fraca de ácido fosfórico, resultando em fosfato de amônia que se concentra na solução. Em seguida, o ácido fosfórico é recuperado em uma coluna de esgotamento, utilizando-se vapor d'água, que libera a amônia, que é conduzida para uma coluna de fracionamento, onde se obtém amônia anidra (UN-ECE, 1990 *apud* IPCC, 2010). Outra parcela que contém amônia é a de sais de amônia na solução. A recuperação de amônia, neste caso, também ocorre em colunas de fracionamento, utilizando-se, todavia solução alcalina.

Existem várias razões para se promover a recuperação da amônia e evitar o seu descarte no sistema de tratamento de efluentes ou no ambiente. Além da vantagem econômica da recuperação deste valioso coproduto, sempre desejada pelo setor produtivo, a amônia apresenta alta toxicidade para ecossistemas aquáticos, incluindo o sistema biológico da estação de tratamento de efluentes líquidos. Além disso, a amônia apresenta uma alta demanda específica de oxigênio, requerendo 4,5 vezes sua própria massa para oxidação a nitratos, o que representa um risco de redução da concentração de oxigênio dissolvido no corpo receptor caso o efluente seja lançado sem tratamento. Por estas razões processos de recuperação de amônia estão presentes em quase todas as coquearias atualmente em operação.

As principais contribuições de efluentes líquidos desta unidade são constituintes dos drenos dos equipamentos.

#### Recuperação de óleos leves

O gás de coquearia que deixa os absorvedores de amônia contém óleo leve, que é uma mistura de mais de cem constituintes do gás de coquearia que possuem temperatura de ebulição entre 0 e 200 °C. Apesar da grande quantidade de substâncias presentes, a maior parte destas, devido às baixas concentrações encontradas não apresenta recuperação viável. Os principais constituintes utilizáveis são benzeno (60-80%), tolueno (6-17%), xileno (1-7%) e nafta solvente (0,5-3%). Mais de 15 kg de óleo leve podem ser recuperados de cada tonelada de coque produzida. Três são os principais métodos utilizados para a recuperação de óleos leves (IPCC, 2010): refrigeração e compressão; adsorção em carvão ativado seguida de recuperação de óleos leve por aquecimento; absorção em solventes, tais como óleo mineral, seguida de destilação do líquido absorvente para recuperação do óleo leve.

As fontes de geração de efluentes líquidos desta etapa são: separador de água/óleo leve, dreno dos diversos equipamentos e condensador de água/óleo de absorção.

A Figura 2.26 apresenta um diagrama de blocos típico de uma unidade carboquímica para limpeza de gás de coquearia e recuperação de coprodutos, contemplando as operações descritas nesta seção.

### Consumo de água e geração de efluentes líquidos em carboquímica

A principal demanda por água está associada à necessidade de resfriamento de gases, seja por contato direto ou indireto. Quando é possível se proceder ao resfriamento por contato indireto, a demanda de água é reduzida à reposição das quantidades perdidas por evaporação e respingos ou pelas purgas contínuas, necessárias para manter as torres de resfriamento em ciclos de concentração apropriados para sua operação. Quando utilizado o sistema aberto de resfriamento, uma quantidade de efluentes significativa é gerada. Conforme apresentado previamente e ilustrado na Figura 2.25, os efluentes líquidos gerados no processo de limpeza de gases são, em sua grande maioria, resultantes da condensação de água contida no gás de coqueria e da água utilizada para resfriamento com contato direto, com especial destaque para a fração descartada de licor amoniacal.

Os efluentes podem ser tratados biologicamente e quimicamente, sendo bastante frequente a utilização de sistema biológico com lodos ativados. Neste último caso, há necessidade de se remover o alcatrão, usualmente por processo físico-químico, e de se equalizar o efluente bruto para prevenir a inibição de bactérias nitrificantes devido a contaminantes notadamente tóxicos presentes. O efluente equalizado deve ter concentração limitada de componentes como sulfetos, mercaptanas e amônia, assim como componentes tóxicos ao processo biológico, como, por exemplo, fenóis e cianetos. Deve-se garantir também que não tenha camada de óleo no efluente, pois isto prejudicaria a absorção de oxigênio no processo biológico.

De uma forma geral, no tratamento biológico os compostos orgânicos biodegradáveis são oxidados a dióxido de carbono, enquanto outros compostos de nitrogênio são transformados em nitrato, via nitrito. Um exemplo de tratamento biológico é o tratamento nitrificante em um estágio, onde bactérias heterotróficas decompõem as substâncias orgânicas, enquanto as bactérias autotróficas decompõem a amônia.

Uma estrutura típica de tratamento é composta por:

- tanque de sedimentação, para remoção de óleos e alcatrão, com auxílio de polímeros;
- separador de água/óleo;

- filtros, para remoção de partículas de óleo e alcatrão, que contém hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, dentre os quais se destaca o benzo-a-pireno;
- colunas de destilação e colunas de esgotamento, para remoção de amônia;
- tanques de equalização;
- tanques de emergência;
- tanque de aeração, com lodos ativados: promove a nitrificação de águas residuárias da coqueria utilizando-se bactérias do gênero Nitrosomonas e Nitrobacter, para a conversão do nitrogênio orgânico e da amônia em nitratos, em ambiente aeróbio. Durante a nitrificação aeróbia, outras bactérias oxidam os compostos orgânicos presentes, podendo-se citar fenóis, benzeno, dentre outros.
- tanque anóxico; promove a desnitrificação e remoção adicional da carga orgânica. A desnitrificação emprega bactérias do gênero Pseudomonas, Micrococcus, Bacillus, dentre outras, em um ambiente sem oxigênio, para converter o nitrato em nitrogênio gasoso, por meio da utilização do oxigênio constituinte das moléculas de nitrito e nitrato em seu processo respiratório (ARAÚJO, 1997).
- decantador secundário;
- tratamento físico-químico, com oxidação/redução, coagulação e floculação;
- clarificador;
- adensador de lodos.

Dados de uma planta real indicam um consumo de água de 90 t/h para as operações de resfriamento por contato direto, contudo este valor pode variar de acordo com o projeto da unidade carboquímica. Embora a concentração de sólidos em suspensão totais não seja alta (46 mg/L para o efluente bruto e 6 mg/L para o efluente tratado), faz-se necessário considerar que o sistema de tratamento de efluentes proposto deve ser apropriado para adequação dos demais parâmetros de interesse, tais como temperatura, pH, fenol, amônia (nitrogênio amoniacal), cianeto, hidrocarbonetos, incluindo HPAs (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos), DQO, materiais sedimentáveis e sólidos dissolvidos totais, conforme exposto anteriormente. Em relação às operações de resfriamento por contato indireto, dados extraídos da mesma usina siderúrgica indicam um consumo superior a 5.000 t/h.



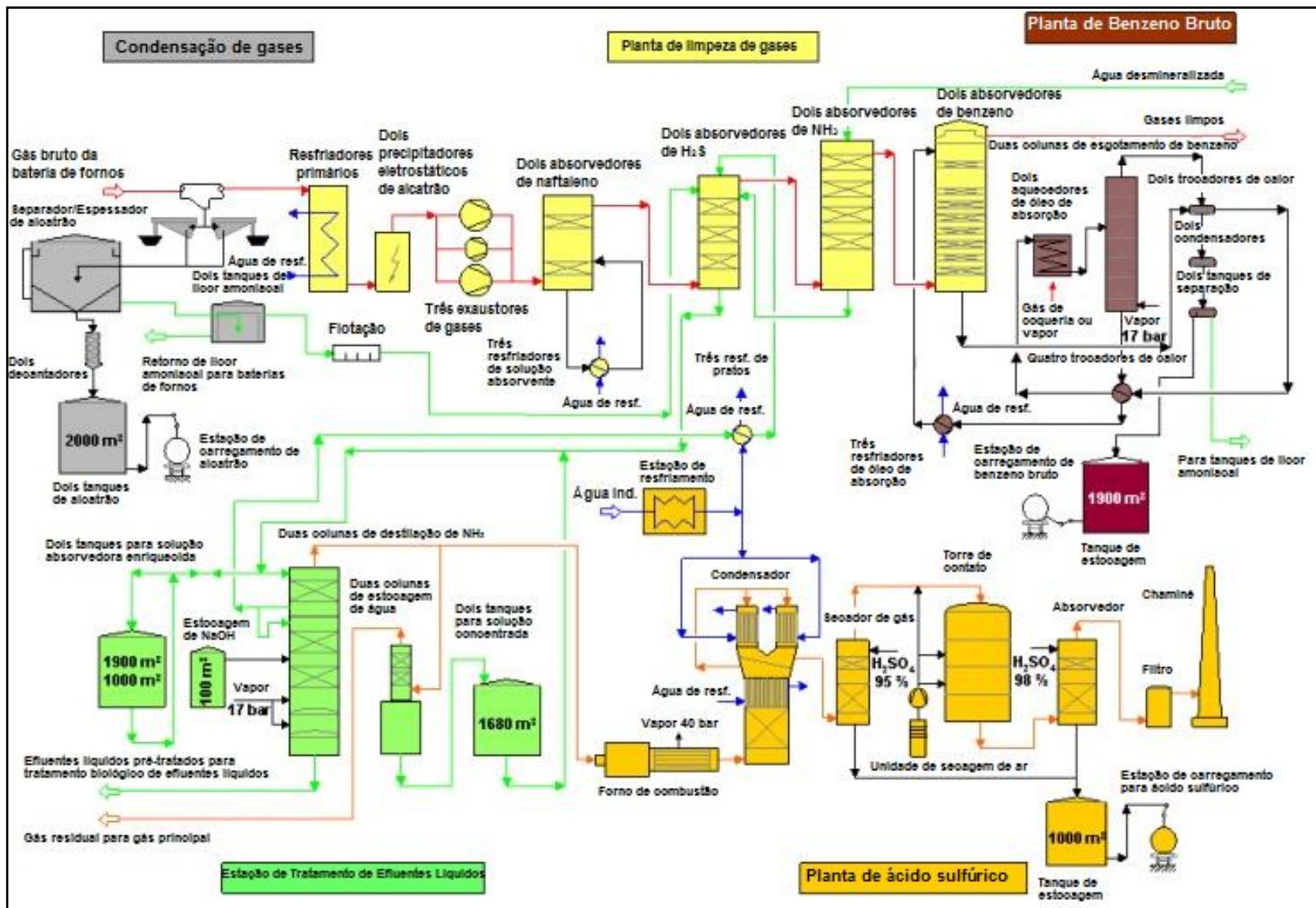


Figure 2.26 – Diagrama de blocos típico de uma unidade carboquímica para limpeza de gás de coqueria e recuperação de coprodutos (IPCC, 2010).

#### 2.4.1.5 Sinterização

A sinterização constitui, junto com os processos de pelletização, briquetagem e nodulização, os processos de aglomeração convencionalmente utilizados em siderurgia. Os processos de aglomeração apresentam grande importância nos processos siderúrgicos, uma vez que o alto forno apresenta limitada tolerância a presença de finos. A aglomeração permite, desta forma, melhorias na permeabilidade da carga e do contato entre os sólidos e o gás redutor, o que repercute diretamente em um menor consumo de coque (*coke rate*) e um aumento na velocidade de reação (ARAÚJO, 1997).

Dentre estes processos, a sinterização apresenta especial destaque nos processos siderúrgicos e, por este motivo, será o único processo de aglomeração discutido nesta dissertação. A sinterização atua como grande central de reciclagem na siderurgia, pois permite a reutilização de finos provenientes tanto da mineração, principalmente das etapas de britagem e manuseio, quanto da operação, sendo as principais contribuições neste caso resultantes da recuperação de poeiras dos sistemas de despoeiramento, carepas, escórias e lamas de aciaria.

O principal equipamento do processo, a máquina de sinter, é formado por uma grande esteira, ligeiramente inclinada ( $2^{\circ}$  a  $3^{\circ}$ ), com até 4 metros de largura e 30 m de comprimento, composta por grelhas móveis, sobre a qual se dispõe o material a ser sinterizado, em uma produção que pode variar entre 25 e 43 t/m<sup>2</sup> de área de grelha (UNITED STATES STEEL, 1985; ARAÚJO, 1997). A carga, constituída de finos de minério, finos de carvão ou coque e finos de fundentes, após preparada, é disposta sobre uma camada recém-preparada de sinter, denominada falsa grelha, passando a seguir por uma coifa de ignição. A queima de combustível é iniciada na parte superior da carga e se propaga para baixo, na medida em que o ar ambiente é succionado para o interior da máquina. Didaticamente, compara-se a fabricação de sinter à queima de um cigarro, uma vez que o mecanismo de aspiração é o principal responsável pelo avanço da frente de combustão. A Figura 2.27 mostra uma máquina de sinter em operação.



Figura 2.27 – Máquina de sinterização (IPCC, 2010).

O processo de aglomeração a quente da carga de finos resulta em um produto poroso denominado sínter. As altas temperaturas, da ordem de 1200 °C a 1400 °C são atingidas a partir da combustão do carvão ou coque, sendo as etapas do processo as seguintes: vaporização da água livre (até 300 °C), vaporização da água combinada (400 °C a 500 °C), redução superficial do minério de ferro, decomposição de carbonatos (750 °C a 1150 °C), formação de silicatos (600 °C a 1300 °C), formação de cálcio-ferritas (600 °C a 1300 °C), combustão do coque (1300 °C) e formação da magnetita.

Finalizada a sinterização, que usualmente ocorre de forma contínua, o bolo de sínter passa por um grande quebrador, sendo posteriormente peneirado, ainda quente, e conduzido para um resfriador circular, onde a temperatura é reduzida de 700 °C a 800 °C para 120 °C. Após resfriado, o sínter passa por britagem e peneiramento a frio, de forma a adequar a qualidade deste produto às especificações definidas pela operação do alto forno. A Figura 2.28 apresenta uma representação esquemática de uma unidade de sinterização.

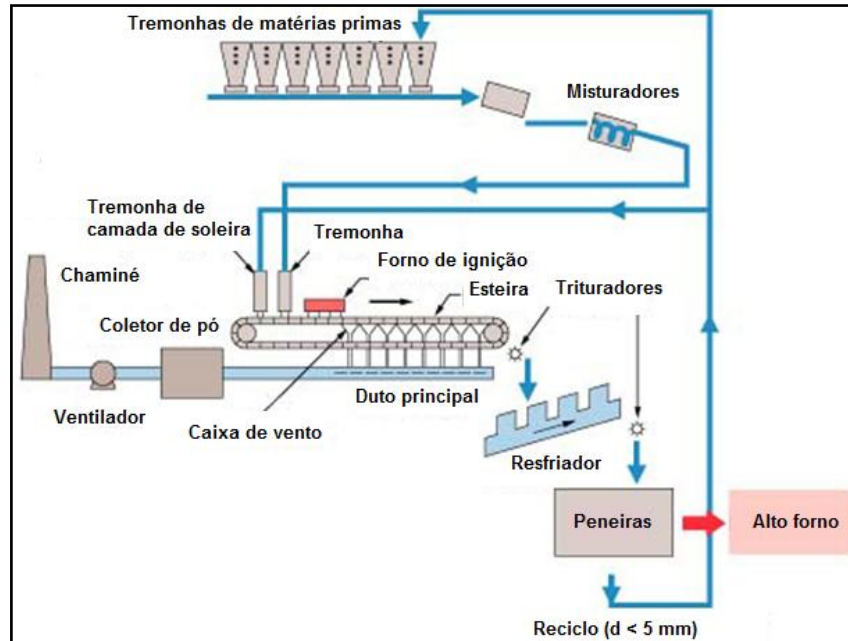


Figura 2.28 – Representação esquemática de uma sinterização (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

O consumo de água na sinterização está associado essencialmente ao resfriamento de equipamentos e, em menor proporção, como matéria prima para elaboração da mistura a ser sinterizada. Em plantas que utilizam processos úmidos para abatimento de material particulado, deve-se considerar que ocorre um consumo adicional de água para manutenção destes equipamentos de controle, assim como a geração dos efluentes líquidos associados. Nesta dissertação esta fonte não será considerada, dada a grande utilização de processos secos de controle de material particulado, em especial com a utilização de precipitadores eletrostáticos. Dados de uma siderúrgica revelam que o consumo de água para as operações de resfriamento por contato indireto é da ordem de 800 t/h.

#### 2.4.2 Redução

Esta etapa consiste na obtenção de ferro primário a partir da redução de seus óxidos utilizando-se um redutor, em geral coque ou carvão (mineral ou vegetal). A redução pode ocorrer de forma direta, quando em nenhuma etapa do processo ocorre fusão da carga no reator, resultando em um produto sólido conhecido como ferro esponja ou de forma indireta, quando ocorre a fusão da carga no reator, resultando, neste caso, em um produto líquido denominado ferro gusa, uma liga ferrosa que apresenta teor de carbono entre 3,5% e 4,5%. Considerando a grande extensão da utilização de processos de redução indireta, esta será a via de produção abrangida por esta dissertação.

Dentre os processos de obtenção de ferro por redução indireta, destaca-se a utilização de um equipamento denominado alto forno, que é responsável por 95% da produção mundial de ferro primário (RIZZO, 2009). O alto forno consiste, basicamente, em um forno de cuba onde as matérias primas previamente beneficiadas são carregadas no topo, por meio de uma calha giratória e, em movimento descendente, reagem em contracorrente com os gases redutores provenientes da combustão do coque com o oxigênio soprado nas ventaneiras, resultando em dois produtos líquidos na base, ferro gusa e escória, e um produto gasoso no topo, denominado gás de alto forno (GAF) (UNITED STATES STEEL, 1985).

O alto forno é formado pelas seguintes partes, do topo para a base: goela, parte onde é realizado o carregamento e distribuição intercalada de matérias primas, cuba, ventre, rampa e cadinho, que é uma região de formato cilíndrico responsável por armazenar e vaziar o ferro gusa e a escória produzidos. O diâmetro do cadinho pode variar desde 6,5 m, em fornos pequenos, com volume de trabalho e capacidade nominal de 558 m<sup>3</sup> e 1.400 t/d, respectivamente, até 14,0 m, para fornos grandes, com volume de trabalho e capacidade nominal iguais a 3.707 m<sup>3</sup> e 8.986 t/d (RIZZO, 2009). Uma representação esquemática do alto forno e das instalações auxiliares é mostrada na Figura 2.29, enquanto uma imagem de altos fornos típicos é apresentada na Figura 2.30.

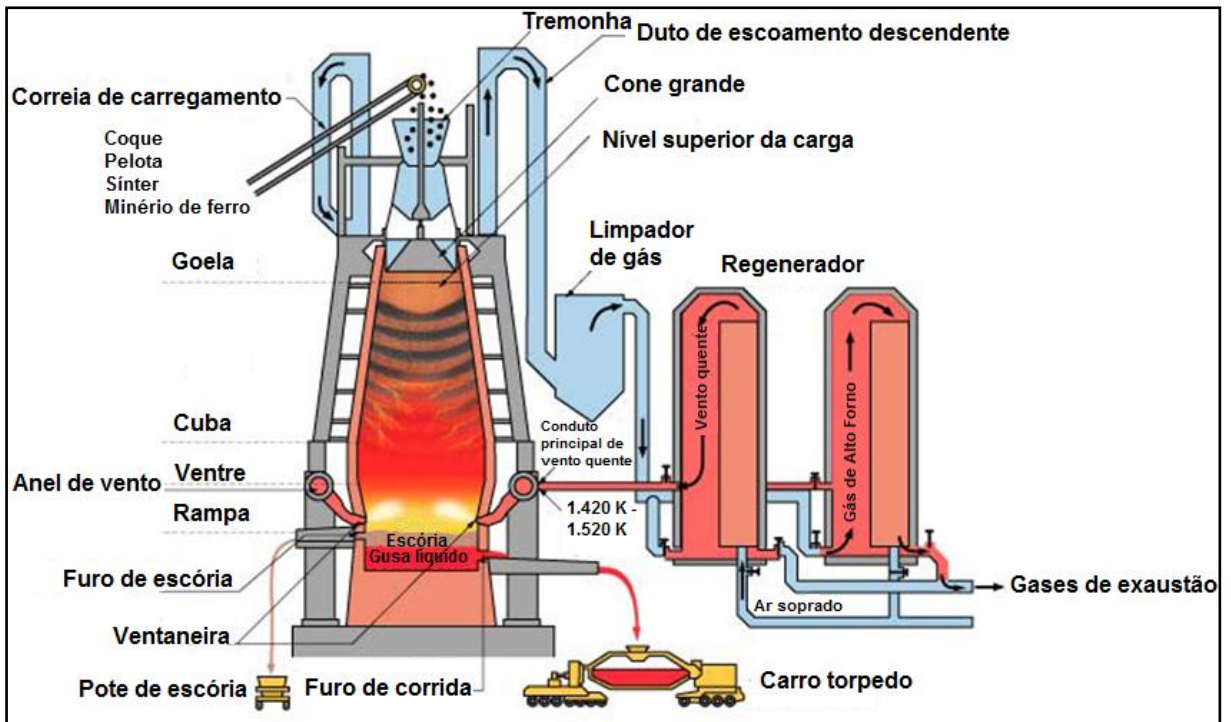


Figura 2.29 – Instalações constituintes do alto forno (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).



Figura 2.30 Vista geral de dois altos fornos, com três regeneradores cada, com as respectivas chaminés para os gases de combustão provenientes dos regeneradores (IPCC, 2010).

As principais matérias primas carregadas em alto forno de grande produção (3.500 a 13.000 t/dia) são: minério de ferro, que pode estar sob a forma de granulada e/ou sinter e/ou pelota; coque; e fundentes, dentre os quais se destacam a cal e o calcário. Um exemplo de carga de alto forno mostra que para cada tonelada de ferro gusa são necessários 1,16 t de sinter, 0,38 t de coque, 0,28 t de minério de ferro granulado e 0,19 t de pelotas de ferro (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

O coque atua ao mesmo tempo como combustível e redutor, sendo também permeabilizador da carga e fornecedor de carbono para o ferro gusa. As matérias primas são carregadas pelo topo, por meio de um distribuidor circular, e descem a uma velocidade de 8 a 15 cm/minuto, levando de 6 a 8 horas para atingir a região inferior do alto forno, quando após sofrer uma série de reações químicas, são transformadas em ferro gusa e escória, que se separam em duas camadas por diferença de massa específica, que são iguais a 6,8 e 1,5 t/m<sup>3</sup>, para o ferro gusa e escória, respectivamente (RIZZO, 2009).

O ferro gusa, depois de separado da escória com auxílio de um escumador (*skimmer*) no canal principal, passa para o canal secundário de gusa é vazado para carros torpedo ou panelas, enquanto a escória é conduzida através dos canais secundários de escória, podendo ser direcionada para um granulador de escória, para o poço de escória (*dry pit*) ou para potes. Estas operações ocorrem em uma área do alto forno conhecida como casa de corrida (Figura 2.31).



Figura 2.31 – Imagem da casa de corrida do alto forno (VIZAGSTEEL, 2012).

Para que o alto forno apresente uma boa marcha, ou seja, uma alta produção com baixo consumo de combustível, os gases redutores ascendentes devem ser aproveitados ao máximo, o que significa que devem deixar o alto forno com a maior concentração de gás carbônico e a menor temperatura possíveis. Para isto, é importante que a permeabilidade da coluna de carga em toda seção do alto forno seja uniforme, de forma a evitar a formação de caminhos preferenciais na periferia e no eixo do forno (ARAÚJO, 1997).

Igualmente importante se faz o fornecimento de oxigênio para permitir a combustão do coque no alto forno. A fonte de oxigênio utilizada é o ar atmosférico, que pode ser enriquecido com oxigênio e/ou outros combustíveis, como carvão pulverizado, óleo e gás natural. Previamente à alimentação no forno, por meio de ventaneiras, o ar é pré-aquecido em regeneradores, que usualmente utilizam parte do gás de alto forno como estratégia de integração energética. A necessidade do pré-aquecimento e enriquecimento do ar está associada à economia de coque, visto que se o ar necessário à combustão fosse introduzido no alto forno à temperatura ambiente, seria necessária uma maior quantidade de coque, pois haveria a necessidade adicional de se aquecer os gases até a temperatura de operação na região de queima (ARAÚJO, 1997). Para o exemplo de carga citado anteriormente são necessários  $995 \text{ Nm}^3$  de ar, aquecido a  $1180 \text{ }^\circ\text{C}$  e com pressão igual a  $0,4 \text{ MPa}$ , por tonelada de ferro gusa produzido. A alimentação de finos de carvão nas ventaneiras para o mesmo exemplo é de  $0,12 \text{ t/t}$  (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

A Figura 2.32 mostra uma representação de um corte transversal de alto forno, com o respectivo gradiente de temperatura característico da sua operação.



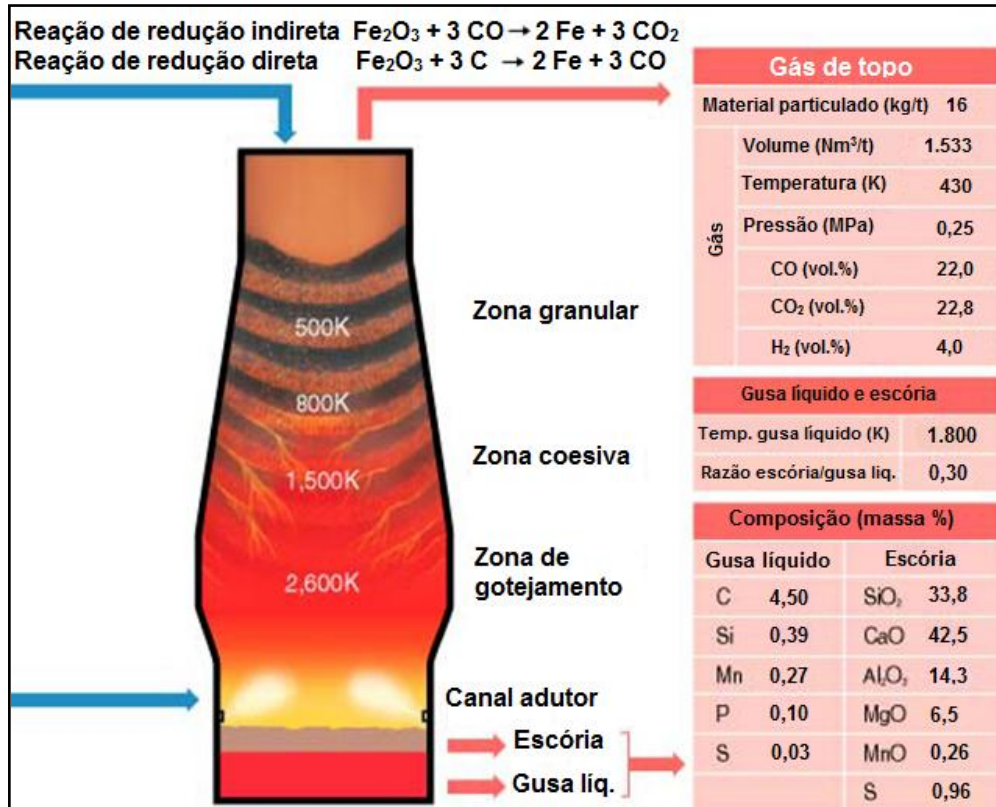


Figura 2.32 – Condições operacionais típicas em alto forno de grande produtividade (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

O ferro gusa é o principal produto do alto forno, sendo utilizado na fabricação do aço, que ocorrerá em uma unidade à jusante, chamada aciaria. Diferentes especificações de ferro gusa podem ser obtidas para aplicações em fundições ou para composição de ligas. Uma composição típica indica que além do ferro podem estar presentes os seguintes elementos (%m/m): C (4,50%), Si (0,39%), Mn (0,27%), P (0,10%) e S (0,03%) (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

Em uma siderúrgica integrada, o ferro gusa líquido, vazado a 1527 °C, é transportado para aciaria em carros torpedo ou em painéis de ferro gusa, podendo ser submetido previamente a diversos pré-tratamentos, sendo exemplos dessiliciação, dessulfuração e desfosforação, como ilustrado na Figura 2.33. Esta operação ocorre com a adição de agente que contenha mais afinidade com o contaminante em um meio com turbilhonamento adequado para promover a agitação e mistura entre agente e carga. O contaminante é transferido para novas parcelas de escórias que devem ser separadas do ferro gusa para não comprometer as operações subsequentes.

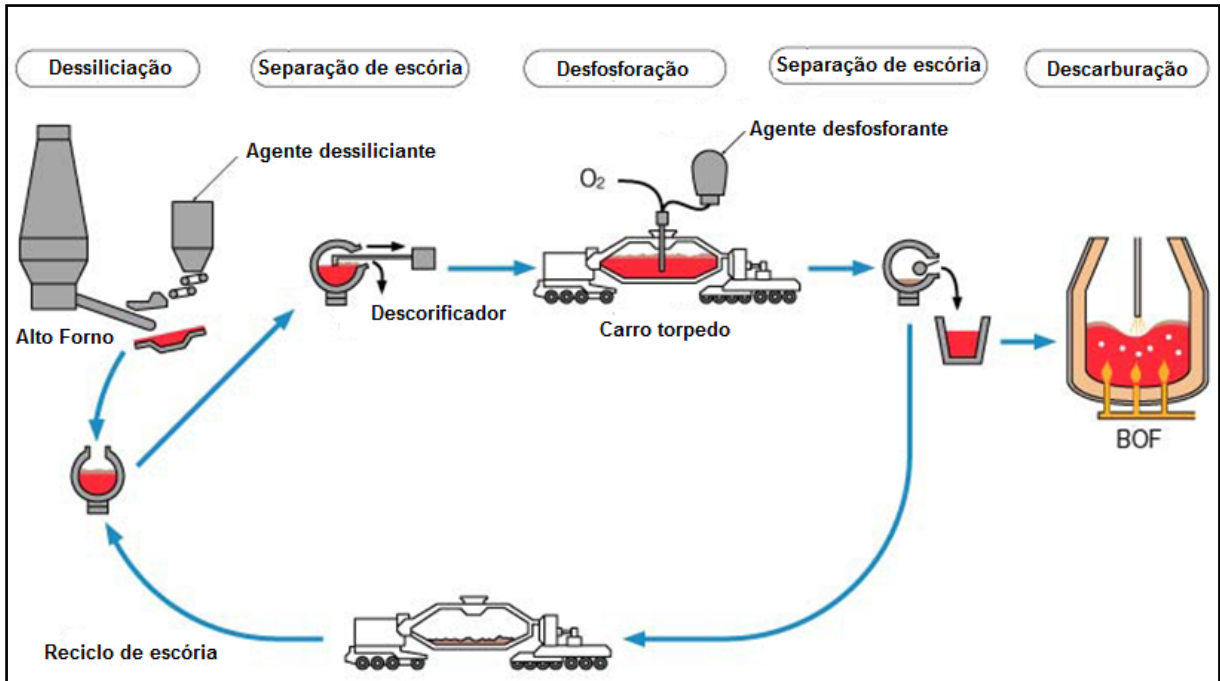


Figura 2.33 – Representação esquemática do processo de pré-tratamento de metal quente (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

A escória de alto forno apresenta-se como um importante coproduto, visto que pode ser utilizada como matéria prima para a fabricação de cimento. Ela é obtida em uma proporção de 30% em relação ao ferro gusa produzido. Sua composição típica é (%m/m):  $\text{SiO}_2$  (33,8%),  $\text{CaO}$  (42,5%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14,3%),  $\text{MgO}$  (0,5%),  $\text{MnO}$  (0,26%) e  $\text{S}$  (0,96%). Atualmente é crescente o número de fábricas de cimento que se instalam próximo a indústrias siderúrgicas, para aproveitamento em linha deste insumo.

Outro coproduto formado é o gás de alto forno, que deixa o alto forno pelo topo, com vazão de  $1.533 \text{ Nm}^3$  por tonelada de gusa produzido, juntamente com partículas de finos (16 kg/t gusa), a uma temperatura de  $157 \text{ }^\circ\text{C}$  e pressão de 0,25 MPa (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

Analisando-se a qualidade do GAF, percebe-se que se trata de um gás pobre quando comparado a outros combustíveis, inclusive ao gás de coqueria. A Tabela 2.3 apresenta uma comparação entre GAF e GCO (ARAÚJO, 1997).

Tabela 2.3 – Comparação entre GAF e GCO quanto a composição e poder calorífico (ARAÚJO, 1997).

Gás	Gás de Alto Forno (GAF)	Gás de Coqueria (GCO)
Composição (% base molar úmida)	-	-
N <sub>2</sub>	55 – 63	4,1 – 6,3
CO	22 – 30	6
CO <sub>2</sub>	6 – 13	2
CH <sub>4</sub>	0,4 – 1,0	26,4
C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	-	3,1
H <sub>2</sub>	0,5 – 0,9	57,7
Poder calorífico (kJ/Nm <sup>3</sup> )	3.140 – 3.768	15.910 – 18.420

A despeito de possuir um conteúdo energético inferior ao de outros combustíveis, o gás de alto forno pode ser utilizado como combustível na própria siderúrgica, em muitas aplicações práticas, como por exemplo, nos regeneradores do próprio alto forno, nos fornos da coqueria ou da laminação e em termelétricas. No entanto, previamente, o gás de alto forno deve passar por um sistema de limpeza de gases, para separação das partículas sólidas, que por sua vez são coletadas na forma de pó ou lama e podem ser reaproveitadas na sinterização, em unidades de briquetagem ou comercializadas para outras aplicações. Uma grande variedade de equipamentos pode ser utilizada para limpeza do GAF, como, por exemplo, balões gravimétricos, ciclones, filtros de mangas, precipitadores eletrostáticos, coletores úmidos e lavadores de gás (RIZZO, 2009).

Os gases gerados no topo do alto forno são captados e, após passar por válvulas de controle de pressão (*bleeder*), são conduzidos por meio de tubulações de escoamento descendente (*downcomer*) para instalação de limpeza primária, que ocorre por via seca em coletores de pó, que podem ser balões gravimétricos ou ciclones, sendo conduzidos posteriormente para instalações de limpeza secundária, que ocorre por via úmida em lavadores de gases, a fim de que ocorra uma separação adicional de material particulado não retido por via seca. Segundo Rizzo (2009) o gás de alto forno tem sua concentração de material particulado reduzida de 5.000 a 20.000 mg/Nm<sup>3</sup> para 2.500 mg/Nm<sup>3</sup> após passar pelo sistema de limpeza primária e para 5 a 10 mg/Nm<sup>3</sup> após passar pelo sistema de limpeza secundária. O autor considera também que em instalações mais recentes o sistema de lavagem de

gases tem sido substituído por filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos, o que repercute em um menor consumo de água e uma menor geração de efluentes, tendo em vista a operação destes equipamentos por via seca.

Os principais pontos de consumo de água no alto forno são o sistema de resfriamento das diversas partes que compõe a carcaça do alto forno, que ocorre por contato indireto, utilizando-se sistemas abertos ou fechados, a etapa úmida do sistema de limpeza e resfriamento de gases e a granulação de escória, que ocorrem com contato direto.

O resfriamento das diversas partes que compõe o alto forno (cadinho, rampa, cuba e ventaneiras), considerando as altas temperaturas de operação, constitui-se como uma das maiores demandas de água em uma indústria siderúrgica. O resfriamento da carcaça do alto forno é fundamental para evitar o superaquecimento da estrutura e dos materiais refratários, garantindo segurança operacional e um tempo de vida maximizado. Dados típicos de operação mostram que o consumo de um par de altos fornos com capacidade aproximada de 5,5 Mtpa pode ser próximo de 15.000 t/h.

O resfriamento da soleira do cadinho pode ser feito com a aplicação de um *spray* externo de água na carcaça, *staves coolers* internos, que são placas de ferro fundido com serpentinas de aço por onde circula água de resfriamento, colocada entre o refratário e a chapa de aço da blindagem externa, ou por um dispositivo denominado *double shell*, que são tubulações instaladas sob uma chapa de vedação. O resfriamento das paredes laterais do alto forno pode ser realizado utilizando-se placas de refrigeração, *stave coolers*, *spray* de água ou jaquetas. As placas ou caixas de refrigeração são confeccionadas com cobre, um excelente condutor térmico, e dispostas entre os tijolos de revestimento refratário. As jaquetas, assim como o sistema de *spray* de água, atuam na parte externa da carcaça metálica, diferenciando-se na forma de aplicação de água. Enquanto no *spray* ocorre o contato de um filme líquido com a superfície metálica, nas jaquetas o resfriamento da chaparia externa e dos refratários é realizado por meio de tubulações fixadas diretamente à superfície externa do forno (RIZZO, 2009). O resfriamento das ventaneiras é realizado por um anel oco de cobre, refrigerado com água, chamado resfriador suporte, que é colocado junto ao orifício circular do revestimento refratário (ARAÚJO, 1997).

A corrente aquosa utilizada para resfriamento das partes do alto forno pode ser reutilizada após passar por torre de resfriamento e receber o tratamento adequado. Neste caso a geração de efluentes líquidos está associada apenas às purgas das torres de resfriamento, que ocorrem em vazão pequena, quando comparado ao efluente gerado empregando-se sistema aberto de resfriamento.

A reutilização direta dos efluentes do sistema de lavagem de gases de alto forno e da granulação de escória, além de contribuições em menor quantidade de condensados de gás de alto forno, mostra-se potencialmente inviável devido à grande quantidade de sólidos em suspensão totais presentes. Dados de uma indústria siderúrgica mostram que valores da ordem de 1.400 mg/L podem ser facilmente alcançados. Este efluente líquido ainda apresenta como contaminantes amônia, fenol, cianetos, sulfetos e sólidos dissolvidos totais, materiais sedimentáveis, além de temperatura elevada. Entretanto, empregando-se um sistema de tratamento constituído basicamente de bacia de sedimentação, com profundidade, tempo de retenção hidráulica e taxa de escoamento superficial apropriados, e clarificador, podendo-se adicionar agentes flocculantes no afluente de ambos, pode-se obter um efluente tratado com aproximadamente 20 mg SST/L, e com os demais contaminantes enquadrados, permitindo assim o reciclo ou o reúso.

#### 2.4.3 Conversão e Refino

A conversão e o refino são operações que ocorrem dentro dos limites da unidade siderúrgica denominada aciaria, onde o ferro gusa é convertido em aço em um equipamento denominado convertedor (ou conversor) e posteriormente refinado, de acordo com as especificações metalúrgicas necessárias para posterior aplicação.

##### Conversão e refino primário

O equipamento usualmente empregado na siderurgia integrada para a conversão de ferro gusa em aço é o conversor LD, cujo nome está associado às cidades austríacas de Linz e Donawitz, onde a conversão com uso de insuflação de oxigênio foi instalada de forma experimental no início dos anos 1950. Quando a insuflação ocorre pela parte superior e é integralmente de oxigênio, classifica-se o conversor como LD-BOF, do inglês *Basic Oxygen Furnace*.

Recentemente, é comum ter instalações dedicadas para um pré-tratamento do gusa líquido, ou mesmo um pré-refino, de forma a melhorar o refino primário no conversor e reduzir seu custo. Destacam-se as seguintes operações (MALYNOWSKYJ, 2007):

- Dessiliciação: a redução da concentração de silício no gusa proporciona um menor custo na fabricação do aço e melhora sua qualidade. Esta operação pode ser realizada na calha de corrida do alto forno ou em carros torpedo ou panela de gusa, com a adição de reagentes apropriados, com ou sem utilização de condutor de gás, como por exemplo, nitrogênio.

- Desfosforação: de forma análoga, a redução do teor de fósforo possibilita a redução do custo total de refino do aço. Siderúrgicas que não detêm esta tecnologia ficam dependentes unicamente da qualidade das matérias primas, cuja disponibilidade em alta qualidade cada vez mais limitada atribui valor de mercado cada vez maior ao ferro gusa.

- Dessulfuração: é realizada através da injeção de reagentes à base de cal e magnésio em carros torpedos ou em painéis na própria aciaria. Este processo é muito utilizado na siderurgia integrada, pois o processo LD não oferece condições termodinâmicas e cinéticas para remoção de enxofre.

A transformação do gusa líquido em aço envolve (ARAÚJO, 1997):

- a diminuição dos teores de carbono, silício, fósforo, enxofre e nitrogênio a níveis bastante baixos;

- a adição de sucata ou minério de ferro para ajustar a temperatura do aço bruto;

- o ajuste dos teores de carbono, manganês, elementos de liga e da temperatura no forno ou panela de vazamento.

O conversor LD é constituído de uma carcaça metálica externa, revestida de material refratário e sustentado por um anel que possui dois munhões, o que permite um giro de 360°. É constituído de fundo, cone inferior, parte cilíndrica, cone superior e boca (ARAÚJO, 1997). As matérias primas, quais sejam, gusa líquido, gusa sólido, sucatas de aço e de ferro fundido, minério de ferro, cal e fluorita são carregadas pela boca do conversor, em diferentes momentos, e submetidas à insuflação de oxigênio, através de uma lança, que em contato com a carga metálica gera calor, devido às reações exotérmicas de oxidação, que transferem as impurezas para a camada sobrenadante de escória (UNITED STATES STEEL, 1985). Uma representação

esquemática de um conversor LD tipo BOF é apresentada na Figura 2.34, enquanto uma imagem do carregamento de gusa em um conversor LD é mostrada na Figura 2.35.

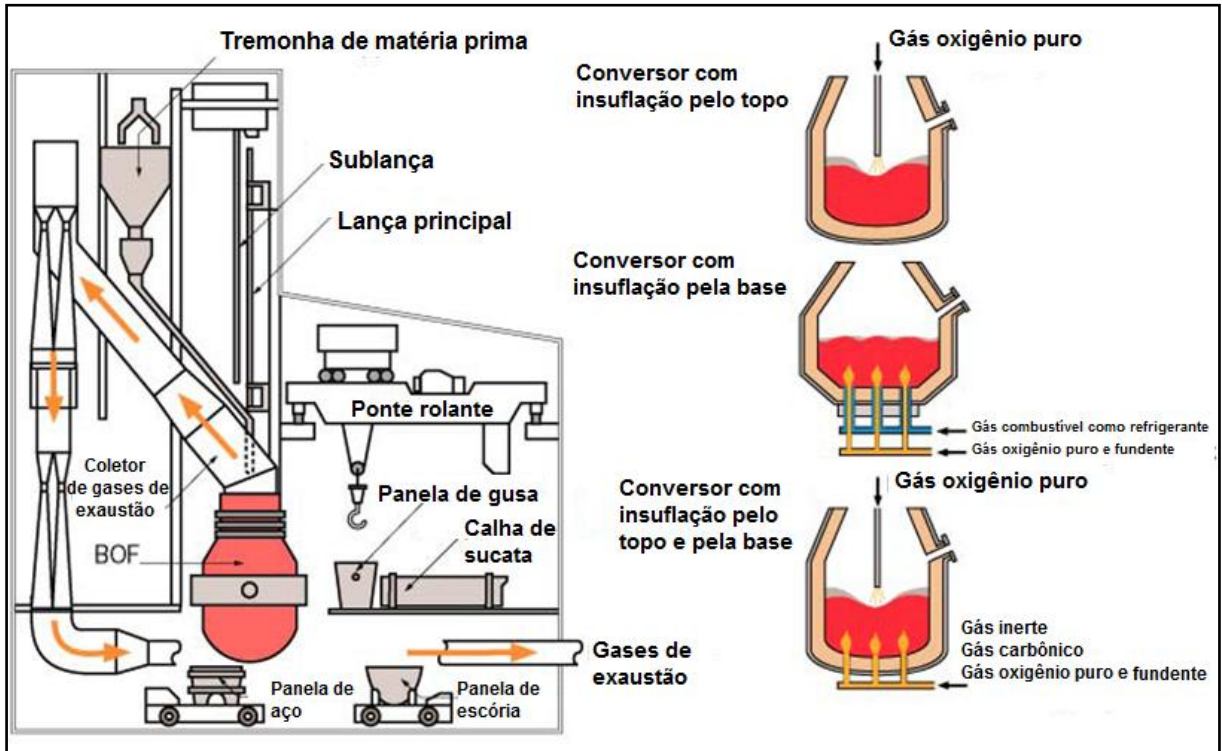


Figura 2.34 – Instalações constituintes do conversor (BOF – Basic Oxygen Furnace) (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).



Figura 2.35 – Carregamento de ferro gusa no conversor LD, com auxílio de pontes rolantes (IPCC, 2012).

Dados típicos de processo mostram que para fabricação de uma tonelada de aço são necessários 1033 kg de gusa líquido, 28 kg de sucata, 4 kg de gusa sólido, 23 kg de cal, 11 kg de ferro-ligas, 8 kg de dolomita e 50 Nm<sup>3</sup> de oxigênio de alta pureza (99%). O gusa líquido apresenta composição, após pré-tratamento, de (%m/m): 4,30% C, 0,01% Si, 0,20% Mn, 0,04% P e 0,01% S (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012). Uma usina siderúrgica equipada com um alto forno e dois conversores de 300 t pode atingir 4 milhões de toneladas de aço bruto por ano (Mtpa) (ARAÚJO, 1997). O tempo do ciclo completo, desde o carregamento das matérias primas, sopro, medições e análises de qualidade e vazamento, do aço e da escória, varia entre 35 e 45 minutos (MALYNOWSKYJ, 2007). O aço produzido apresenta composição típica (%m/m) de: 0,04% C, 0,01% Si, 0,15% Mn, 0,01% P e 0,007% S (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

Enquanto o aço segue para as instalações de refino secundário, ou eventualmente direto para o lingotamento, a escória de aciaria, produzida em uma proporção de 50 kg por tonelada de aço produzido, segue para unidades de beneficiamento, para ser posteriormente utilizada em um gama de aplicações, dentre as quais se desta o uso como sub-bases para pavimentação de estradas.

Outro coproduto importante é o gás de aciaria, formado em uma proporção de 101 Nm<sup>3</sup> por tonelada de aço produzido. O gás proveniente do conversor LD (GLD), apresenta a seguinte composição (%v/v): 70% CO, 10-15% CO<sub>2</sub>, 13% N<sub>2</sub> e 1-2% H<sub>2</sub> (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012), e apresenta um poder calorífico de 8.373 kJ/Nm<sup>3</sup>, valor que representa, em média, o dobro do poder calorífico do gás de alto forno e a metade do poder calorífico do gás de coqueria (ARAÚJO, 1997). Por este motivo o gás de aciaria pode ser reaproveitado no próprio complexo siderúrgico como combustível, devendo previamente, no entanto, passar pelas operações de resfriamento, limpeza e armazenamento. O resfriamento pode ser realizado utilizando-se uma torre de resfriamento seguida de lavador tipo Venturi (resfriamento de 1000°C para 80°C) ou de precipitador eletrostático (resfriamento de 1000°C para 150°C), ambos permitindo concentração final de material particulado inferior a 100 mg/Nm<sup>3</sup>.

Uma representação esquemática de um conversor LD é apresentada na Figura 2.36.



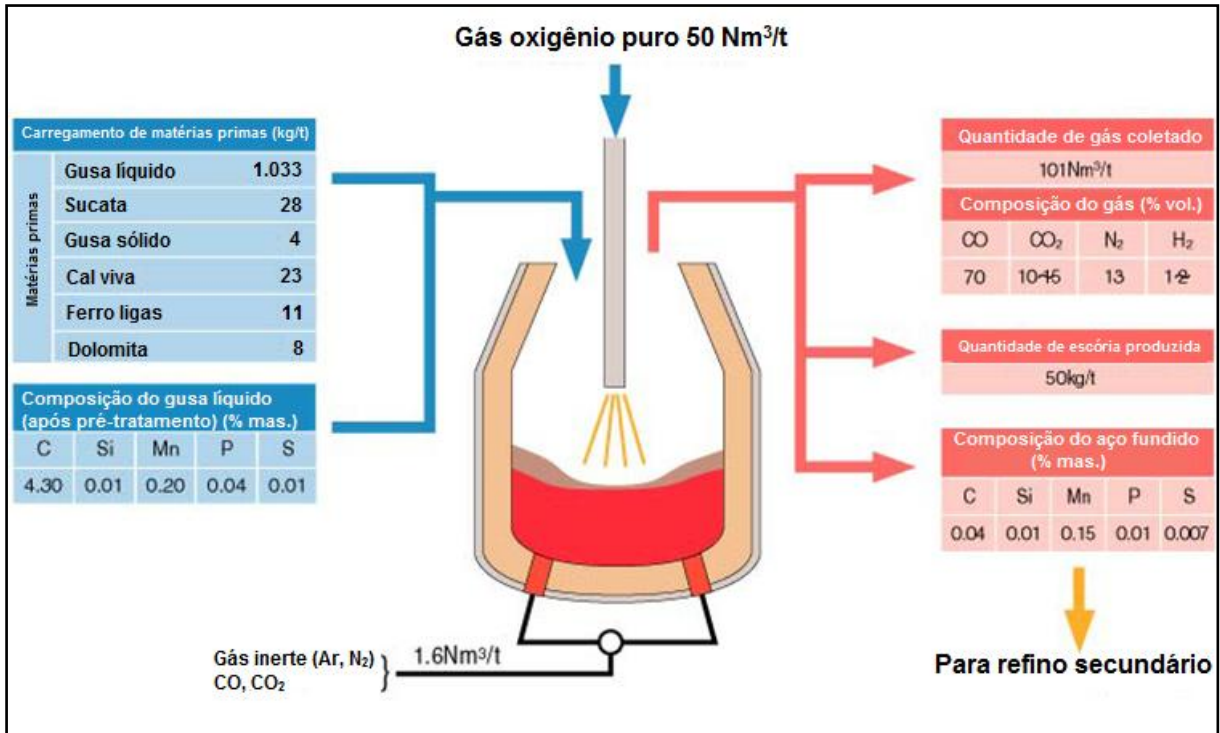


Figura 2.36 – Representação esquemática da operação de um conversor LD (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

### Refino secundário

O refino secundário, em complementação ao refino primário, que ocorre no conversor, em verdade é um conjunto de operações visando à eliminação de impurezas no aço, que variam em função do tipo de aço que se deseja produzir.

As impurezas, dentre as quais se destacam oxigênio, enxofre, nitrogênio e fósforo, se não retiradas, formam compostos denominados inclusões, na forma de óxidos, sulfetos e nitretos, que na maior parte do tempo são prejudiciais para as propriedades mecânicas e/ou características desejadas no aço, causando: diminuição da plasticidade, diminuição da tenacidade, formação de trincas e formação de defeitos superficiais. Outro contaminante que pode ocasionar o surgimento de trincas internas é o hidrogênio. Dentre os contaminantes apresentados o único que é satisfatoriamente removido no refino primário, realizado no conversor, é o fósforo (BOLOTA, 2007).

Segundo a mesma referência, o aço bruto proveniente do conversor é vazado em uma panela, a uma temperatura situada entre 1.550 e 1.650 °C, que funciona ao mesmo tempo como meio de transporte e reator metalúrgico, onde poderão ser

processadas as diversas operações de remoção de impurezas (desoxidação, dessulfuração e desgaseificação) e ainda o acerto da composição química do aço, a descarburação (remoção de carbono) e a alteração da morfologia das inclusões remanescentes. Segundo Faco (2007), a capacidade de uma panela varia entre 160 e 300 toneladas. Devido à importância deste equipamento, é comum se referir ao refino secundário de aço líquido como metalurgia de panela.

As instalações do refino secundário variam de acordo com as impurezas que se deseja remover e as características esperadas do aço refinado. A seguir apresenta-se uma descrição de quatro processos usualmente empregados no refino secundário, sendo a representação esquemática dos mesmos apresentada na Figura 2.37 (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012; BOLOTA, 2007):

- LF (*Ladle Furnace*) – O forno panela apresenta-se como o mais tradicionalmente empregado no refino secundário. É constituído de transformador, eletrodos de grafite, abóboda de cobertura, tremonha para adição de ligas, sistema de exaustão de fumos e sistema de alimentação de gás inerte pelo fundo, para permitir agitação do metal líquido. Os equipamentos dispostos sobre a panela promovem a desoxidação e a dessulfuração, além do controle de temperatura por aquecimento químico, o acerto da composição química e o controle de morfologia de inclusões.

- RH (*Ruhrstahl-Heraeus*) – Esta instalação representa uma evolução de outra tecnologia, denominada DH, e consiste basicamente em submeter parte do aço contido na panela à ação de vácuo, por meio de um vaso instalado sobre a panela, sendo a comunicação realizada por meio de dois canais, que mantém uma circulação contínua do aço. É utilizado para promover a desgaseificação, desoxidação e dessulfuração, além de controlar a temperatura por aquecimento químico e promover ajuste na composição química.

- VOD (*Vacuum Oxygen Decarburization*) – é constituído de uma câmara de vácuo com lança para insuflação de oxigênio, sistema de adição de ferro ligas e sistema de exaustão de fumos. Esta configuração é utilizada principalmente para a fabricação de aços inoxidáveis, que demandam adição de liga de ferro/cromo com alto teor de carbono. Além da descarburação, demandada pela adição da ferroliga citada, este sistema promove a desoxidação, a dessulfuração, a desgaseificação, o controle de temperatura por aquecimento químico e a ajuste na composição química.

- AOD (*Argon Oxygen Decarburization*) – semelhante ao sistema VOD, contudo diferencia-se, pois a redução da pressão parcial de CO não é feita utilizando-se vácuo, mas, sim, pela diluição dos gases gerados em argônio, que é injetado pelo fundo por meio de lanças com tubos capilares. Desta forma, o mecanismo da reação de oxidação de carbono em CO é deslocado e a reação de descarbonização favorecida. Esta instalação também é dedicada para a fabricação de aços inoxidáveis, que depende da adição da liga ferro/cromo de alto teor de carbono. Como os demais, este sistema também possui lança para a injeção de oxigênio e sistema de remoção de fumos, podendo promover além da descarbonização, a desoxidação, a dessulfuração, o controle de temperatura e o ajuste da composição química. Destacam-se como vantagens em relação ao sistema VOD a não necessidade de panela, além de apresentar maior produtividade.

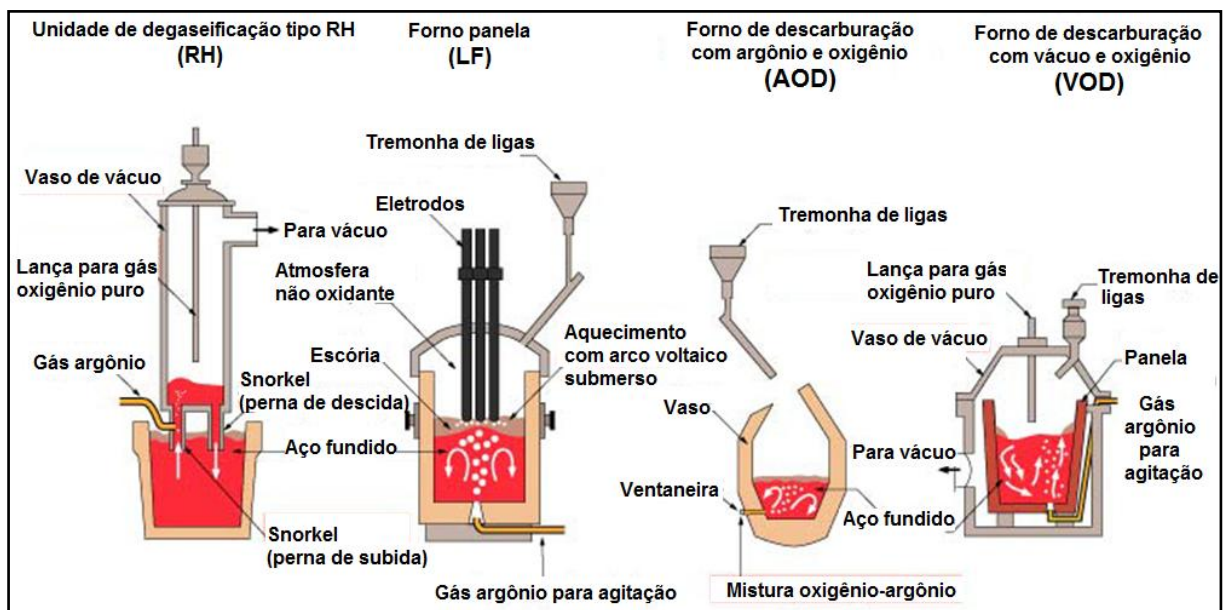


Figura 2.37 – Instalações típicas no refino secundário (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

O produto do refino secundário é um aço de melhor qualidade, quando comparado com o aço obtido no conversor ou refino primário, que segue para operação de lingotamento, que será descrita na próxima seção.

Os principais consumidores de água em uma aciaria, considerando as operações de conversão/refino primário e refino secundário são:

- resfriamento por contato indireto de equipamentos, dentre os quais podem ser citados: conversor (carçaça, coifa e lança de oxigênio), forno panela

(abóboda, dutos e braços do eletrodo), componentes internos das demais instalações de refino secundário (RH, VOD, AOD, dentre outros);

- resfriamento e limpeza de gases de conversor por contato direto;
- limpeza e selagem de equipamentos dos conversores;
- condensador do desgaseificador a vácuo;

Os efluentes líquidos das operações de contato indireto podem ser tratados em sistema fechado constituído por tratamento químico a base de inibidores de corrosão, dispersante e biocida, e redução de temperatura, empregando-se torres de resfriamento. Dados de uma planta típica indicam consumo superior a 7.000 t/h para o resfriamento das operações do conversor e de, aproximadamente, 700 t/h, para as instalações de refino secundário.

Os efluentes líquidos oriundos de operações de contato direto na conversão/refino primário são provenientes basicamente do resfriamento e limpeza de gases. Estes efluentes apresentam alta concentração de sólidos em suspensão totais, cerca de 6.000 mg/L no efluente bruto e 70 mg/L no efluente tratado, em uma vazão de cerca de 1.300 t/h, sendo também os sólidos dissolvidos totais, ferro e zinco, parâmetros de importante controle operacional e ambiental. Um sistema de tratamento tipicamente utilizado é o tratamento físico-químico, empregando-se tanques de sedimentação, com adição em linha de agentes coagulantes, espessadores e sistema de desidratação de lamas.

Em relação ao refino secundário, o consumo de água e a geração de efluentes líquidos estão associados, no exemplo da unidade RH, ao condensador. Novamente o principal parâmetro de controle é o SST, presente em uma concentração de 250 mg/L em um efluente bruto com vazão operacional de cerca de 2.500 t/h.

#### 2.4.4 Lingotamento

A panela contendo aço refinado, proveniente da etapa descrita anteriormente, é disposta na torre da máquina de lingotamento contínuo, que constitui a forma mais empregada de solidificação do aço, podendo ser de molde reto (totalmente horizontal, totalmente vertical ou vertical com dobramento de veio) ou curvo (com um ou vários raios de dobramento posterior). De uma forma geral, a operação desta

unidade baseia-se no vazamento do aço verticalmente, através de válvula gaveta localizada no fundo da panela, disposta na torre, e de um distribuidor para dentro de um molde de cobre resfriado com água, com abertura inferior e superior, para permitir a passagem do metal (ARAÚJO, 1997). Uma representação esquemática da solidificação do aço é apresentada na Figura 2.38.

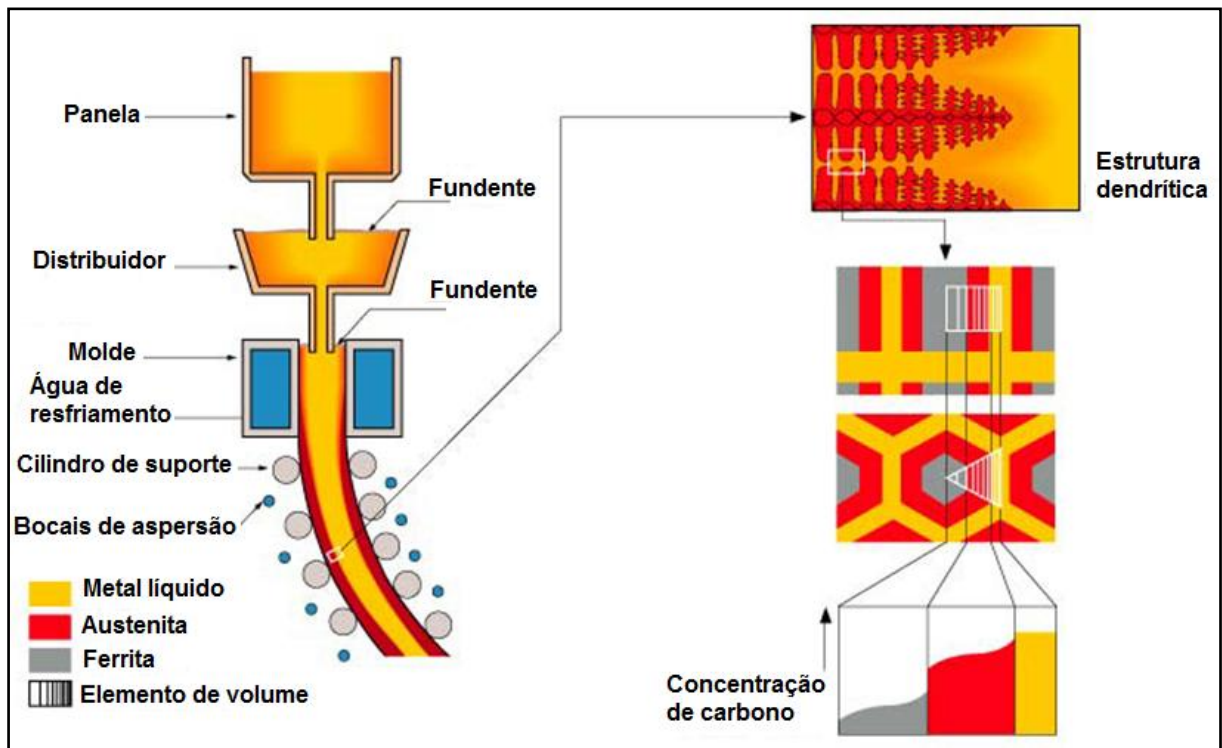


Figura 2.38 – Representação da solidificação e segregação no processo de lingotamento contínuo do aço (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

Os moldes extraem calor do aço líquido, o que provoca a formação de uma camada solidificada com espessura entre 10 e 30 mm, cuja aderência aos moldes é evitada utilizando-se um óleo lubrificante (SCHREWE, 1987; THOMAS, 2003 *apud* FACO, 2007). Em sequência o veio de aço é puxado pelos rolos extratores da máquina de lingotamento contínuo.

Além da perda de calor por condução, através dos rolos, o veio de aço perde calor por radiação, para o ambiente, e por convecção, por meio da aspersão de água, em uma proporção de 1 m<sup>3</sup> por tonelada de aço lingotado, através de conjunto de chuveiros distribuídos entre os pares de rolos da máquina de lingotamento contínuo, o que permite que a espessura de material solidificado aumente até compreender todo o aço contido no veio. A velocidade de solidificação do veio varia

de acordo com a sua espessura. Como exemplo, pode-se citar que um bloco de aço com dimensões 250 x 250 mm apresenta velocidade de solidificação entre 0,8 e 1,0 m/min e uma produção associada de 27 a 30 t/h. Após ter o núcleo resfriado, o que ocorre a uma temperatura entre 700 e 900 °C, o aço é seccionado por oxi-corte e inspecionado antes de ser enviado para a laminação (ARAÚJO, 1997).

Segundo a mesma referência, as dimensões típicas de produtos lingotados são (mm): placa: 210 x 800 ou 250 x 1200; tarugo: 100 x 100 ou 150 x 150; bloco: 250 x 250 ou 300 x 400; redondos: 175 ou 220 de diâmetro. Valores aproximados para comprimento situam-se entre 2,2 e 12,0 m, podendo chegar até a 50 m, dependendo do projeto. Uma representação esquemática de uma unidade de lingotamento contínuo é apresentada na Figura 2.39, enquanto a imagem de uma máquina em operação, com destaque para placa com crosta recém-formada, é mostrada na Figura 2.40.

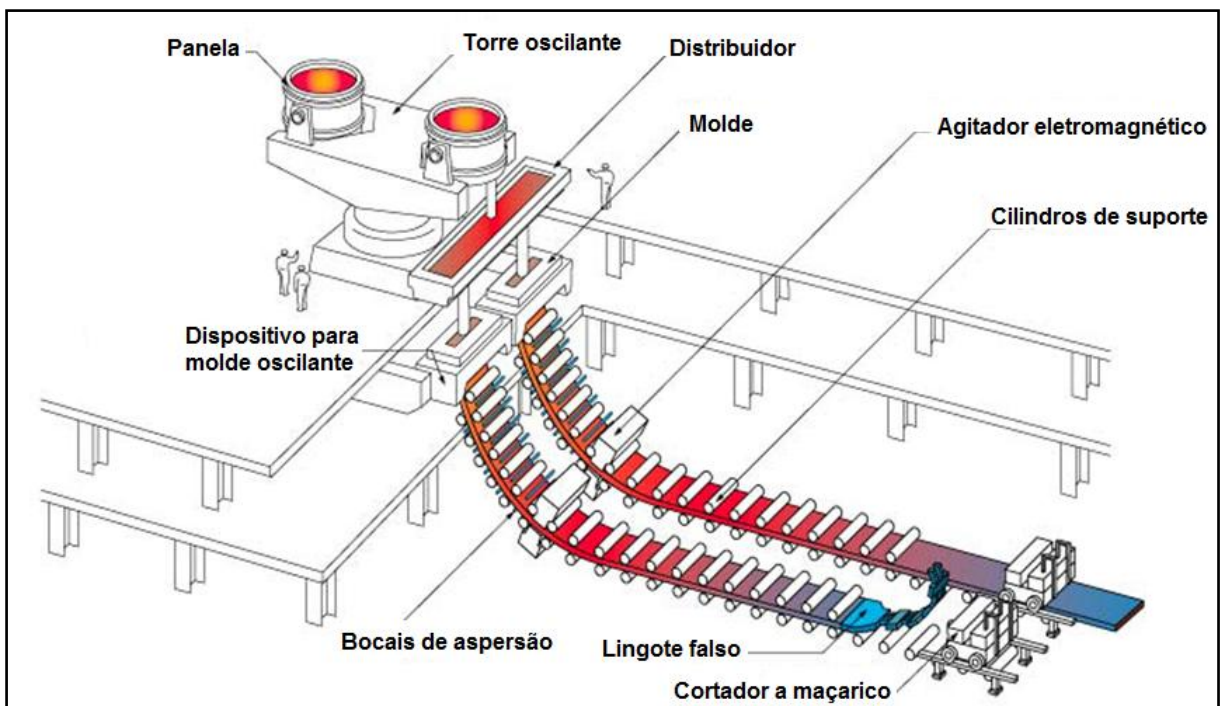


Figura 2.39 – Instalações constituintes de lingotamento de placas (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).



Figura 2.40 – Máquina de lingotamento contínuo em operação (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

Os principais usuários de água para fins de resfriamento por contato indireto são os moldes de cobre e os rolos e mancais da máquina de resfriamento, que precisam ser resfriados para que não sofram deformação em contato com o veio de aço, cuja temperatura é da ordem de 1.300 °C (FACO, 2007). Dados de uma siderúrgica integrada indicam consumo de água de aproximadamente 6.000 t/h para estas operações. Ressalta-se que, devido às altas temperaturas às quais os moldes ficam expostos, recomenda-se a utilização de água abrandada para prevenir a formação de depósitos de carbonetos, sulfetos e silicatos de cálcio e magnésio.

Outro importante ponto de consumo de água, e também, de geração de efluentes líquidos consiste na operação de resfriamento de aço por contato direto. Este efluente apresenta uma considerável concentração de sólidos em suspensão totais, provenientes da carepa formada durante o processo de resfriamento. Dados reais de uma usina siderúrgica indicam que a concentração deste parâmetro pode chegar a 150 mg/L no efluente bruto, que apresenta vazão superior a 17.000 t/h, podendo ser reduzido a 10 mg/L após tratamento. Outro importante parâmetro para controle e monitoramento é OG (óleos e graxas), oriundos das aplicações de óleos com propósito de lubrificação. Um sistema de tratamento, para ser considerado adequado, deve ser capaz de promover uma remoção de sólidos satisfatória, ao

mesmo tempo em que deve remover a camada de óleos e graxas, e promover o resfriamento dos efluentes. Um sistema tradicionalmente empregado consiste de bacia de sedimentação, dotada de raspadores de fundo, para a remoção de sólidos, e de topo, para remoção de óleos e graxas seguido de filtros para remoção adicional de SST e diminuição de temperatura em torres de resfriamento, onde pode ser realizado tratamento químico com dosagem de inibidor de corrosão, dispersante e biocida. O efluente tratado desta forma pode ser reciclado para a própria operação de resfriamento de aço, sem apresentar riscos de entupimento dos bicos aspersores de água.

#### 2.4.5 Laminação e Acabamento

A laminação é um processo de conformação mecânica que consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica, contudo em sentidos contrários. Ao passar pelos cilindros, dispostos em aberturas decrescentes, a peça inicial sofre deformação plástica, o que resulta na redução da seção transversal e no aumento do comprimento e largura. Uma unidade de laminação é complexa e diversificada, podendo apresentar várias sequências de operação. A laminação apresenta-se como o principal processo de transformação mecânica do aço, respondendo por uma parcela de 80% do total (GONÇALVES, 2007). Na Figura 2.41 é apresentada uma representação esquemática de linhas e produtos de laminação (GORNI, 2008).



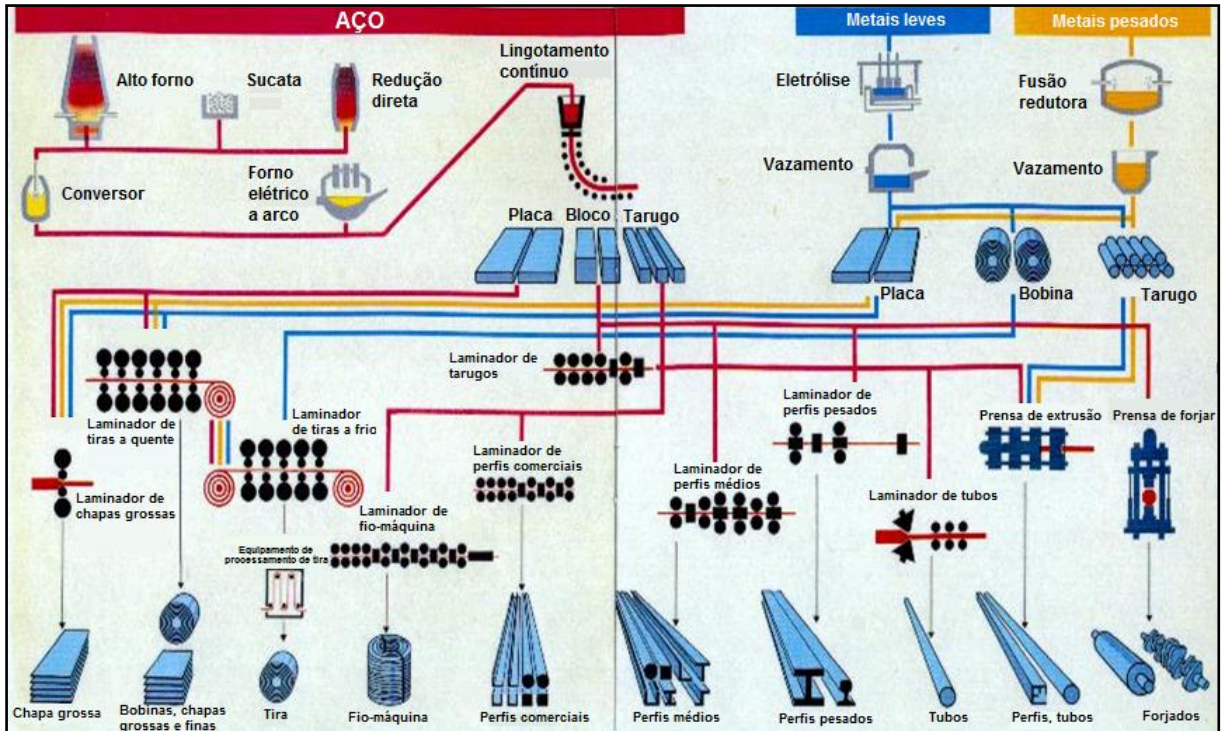


Figura 2.41 – Representação esquemática de linhas e produtos de laminação (GORNI, 2008).

É comum para os produtos siderúrgicos a adoção de uma primeira classificação como aços planos e não planos, sendo que o primeiro grupo assume especial destaque na siderurgia integrada, motivo pelo qual lhe será dada ênfase na presente dissertação.

Entende-se por produtos planos aqueles cuja forma da seção transversal é retangular, sendo que a largura do produto é várias vezes maior do que a sua espessura. Produtos não planos, ao contrário, têm sua seção transversal diferente da forma retangular, sendo exemplos perfis em forma de H, I, U, trilhos, dentre outros. Os produtos siderúrgicos podem também ser classificados em semiacabados, dentre os quais se destacam bloco, tarugo e placa, ou acabados: bobinas (bobina fina (a frio ou a quente) e bobina grossa); chapas (chapa fina (a frio ou a quente) e chapa grossa); fitas de aço para embalagem; folhas; tiras (tira cortada e tira relaminada a frio); e rolo (MACHADO, 2003).

As placas de aço, principal produto da siderurgia integrada, provenientes do lingotamento contínuo podem ser laminadas resultando nos seguintes tipos e aplicações (MALYNOWSKYJ, 2007):

- Chapas grossas: uso geral, estrutura geral, estrutura soldável, naval, tubos, vasos de pressão e caldeiras, longarinas para chassis de veículos, cubas de galvanização, dentre outros.
- Bobinas/Chapas/Tiras a quente: uso geral, estrutura geral, estrutura soldável, naval, plataforma, tubo, longarina para chassis de veículos, estampagem, botijão, cubas de galvanização, rodas, dentre outros.
- Bobinas/Chapas/Tiras a frio: estruturas, estampagem média e profunda, indústria automobilística, estrutura soldável, aplicações eletromagnéticas, dentre outros.

Dependendo das dimensões e da estrutura da peça, a laminação pode ser conduzida a frio ou a quente. Normalmente, a laminação a quente é usada para as operações de desbaste e a laminação a frio para as operações de acabamento. As principais etapas para obtenção de produtos laminados são (UNITED STATES STEEL, 1985; MACHADO, 2003; GONÇALVES, 2007; YOKOJI, 2007; GORNI, 2008):

a) Preparação do material inicial para a laminação

As placas, após serem lingotadas, são resfriadas, inspecionadas, e armazenadas até posterior utilização na própria usina siderúrgica ou expedição para terceiros, podendo ser transportadas por carros de transferência e/ou pontes rolantes.

b) Aquecimento do material inicial

Esta operação é usualmente realizada em fornos de reaquecimento e cumpre por objetivo elevar a temperatura da placa de aço, até temperatura entre 1.100 e 1.350 °C, controlando além deste parâmetro o tempo de residência, que é de cerca de 8 a 12 h, e as condições de combustão, na qual se emprega gás de coqueria como combustível, conforme visto anteriormente, de forma a reduzir a formação de óxidos superficiais na peça. O aumento de temperatura é essencial para tornar o material plástico o suficiente para sofrer grandes reduções em sua seção, nas operações subsequentes de laminação.

### c) Laminação a quente

A laminação a quente é aplicada em operações iniciais de desbaste, caracterizadas pela necessidade de grandes reduções de seções transversais. As peças passam por cilindros laminadores em uma temperatura de trabalho superior a temperatura de recristalização do metal, de forma a reduzir a resistência à deformação plástica em cada passagem e permitir a recuperação da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subsequentes. Esta etapa é ideal para grandes deformações, pois o material encontra-se muito macio, no entanto, deve-se ressaltar que a qualidade superficial do laminado a quente é, em geral, grosseira (GONÇALVES, 2007).

A principal matéria prima da unidade de laminação a quente em uma usina siderúrgica integrada é a placa de aço. Os principais produtos obtidos são as bobinas/chapas grossas e as bobinas/chapas finas a quente, obtidos em duas unidades de laminação distintas, cada uma dedicada para a obtenção de um produto semiacabado específico. Estas unidades costumam ser denominadas de acordo com o produto de laminação obtido: laminação de chapas grossas e laminação de tiras a quente.

A laminação de placas em bobinas/chapas grossas é conduzida para transformar a estrutura cristalina grosseira da placa de aço oriunda do lingotamento contínuo em uma estrutura de grãos finos, por meio de uma deformação plástica intensa seguida de recristalização, ocasionando também um reordenamento dos vazios internos provenientes da solidificação da placa. As bobinas/chapas grossas possuem espessura variando entre 6 e 200 mm e largura variando entre 1.000 e 3.800 mm, com comprimento de 5.000 a 18.000 mm.

A obtenção de bobinas/chapas finas, com espessura variando entre 1,20 e 16 mm e largura entre 800 e 2.000 mm, pode ocorrer a partir das bobinas/chapas grossas, com a utilização dos seguintes equipamentos: fornos de reaquecimento contínuo, laminador quebrador de carepa, laminador transversal, redutor de chapas grossas, tesoura de corte de chapa a quente, conjunto de laminadores de desbaste, tesoura de corte das extremidades, laminador quebrador de carepa, laminador de tiras a quente de acabamento e bobinadeiras. Aproximadamente 75% do material laminado a quente é conduzido para a linha de decapagem, sendo o restante

enviado para a unidade de acabamento de chapas a quente, para o corte da bobina em chapas e, se necessário, para um laminador de acabamento.

#### d) Acabamento e/ou tratamento térmico

Caso o produto laminado a quente seja o produto final de interesse, o mesmo pode ser submetido à laminação de acabamento e de encruamento, de forma a melhorar a planicidade e o acabamento superficial. A melhoria da planicidade também pode ser obtida por meio de um aplainamento por rolos ou por estiramento.

Outra operação importante é o tratamento térmico de normalização ou de recozimento contínuo. A normalização consiste no aquecimento do aço a uma temperatura entre 730 e 900 °C e, em seguida, submetê-lo a um resfriamento abrupto, com jatos de água, para evitar a formação de cristais grandes de ferrita. Desta forma, consegue-se refinar a estrutura e obter uma melhor distribuição e tamanho das partículas de carboneto. Posteriormente, o aço é aquecido novamente, a uma temperatura de cerca de 675°C. Neste forno, as tensões são eliminadas, formando-se uma nova estrutura de perlita lamelar em uma matriz de ferrita. O tratamento térmico por recozimento será abordado no item 7.

#### e) Decapagem

Os laminados a quente que seguem no processo para a obtenção de outros produtos apresentam como característica a presença de óxidos superficiais que devem ser removidos para não comprometer o desempenho das operações a jusante. Nos processos de laminação a frio e, posteriormente, de estampagem, por exemplo, os óxidos causam defeitos superficiais, enquanto que os processos de revestimento superficial tem sua qualidade reduzida, pois os óxidos impedem a aderência dos revestimentos metálicos ou de tintas.

A operação dedicada à remoção destes óxidos é conhecida como decapagem ácida, que consiste na imersão da peça em um banho de solução de ácidos inorgânicos em água, usualmente ácido clorídrico e ácido sulfúrico, com adição opcional de inibidores e umectantes. Ao final deste processo as bobinas passam por secagem e recebem aplicação de óleo protetivo para prevenir a corrosão, sendo enroladas, formando bobinas. Estas bobinas podem ser enviadas para o laminador

de tiras a frio, ao laminador de folhas-de-flandres ou, em menor quantidade, para o acabamento dos produtos laminados a quente.

#### f) Laminação a frio

A laminação a frio é aplicada para as operações finais, reservadas ao acabamento, após o qual se espera uma boa qualidade superficial, o que significa dizer com baixa rugosidade e alta precisão de bitola. A matéria prima desta etapa é a bobina proveniente da laminação a quente. A temperatura de trabalho, neste caso, é a temperatura ambiente, que é inferior a temperatura de recristalização, o que resulta em uma maior resistência à deformação, que se torna mais pronunciada quanto maior a deformação, não permitindo reduções elevadas na seção transversal.

A despeito destas condições, é possível realizar uma redução de espessura da ordem de 25% a 90%. Esta redução provoca a elevação da temperatura da peça e dos cilindros, atingindo na peça temperaturas entre 65 °C e 120 °C, podendo chegar a 200 °C nos trens de laminação de alta velocidade. O resfriamento destas superfícies é realizado com o jateamento de mistura de óleo solúvel e água.

Usualmente, parte das bobinas laminadas a frio é destinada para limpeza eletrolítica, e, posteriormente para um forno de tratamento térmico, usualmente forno em campânula ou forno contínuo de recozimento, e laminador de encruamento, para elevar a resistência, a planicidade e o acabamento superficial. Em seguida, após passar novamente por limpeza eletrolítica, as bobinas são conduzidas para uma linha contínua de galvanização. Outra parte dos laminados a frio segue para a laminação de folha-de-flandres, para redução adicional da espessura, passando posteriormente por limpeza eletrolítica, recozimento, laminador de encruamento e linha de estanhamento eletrolítico.

Ao final do processo as bobinas laminadas a frio seguem para o carretel de rebobinamento ou são cortadas na forma de chapas, seguindo para posteriores armazenamento e expedição. Produtos laminados a frio apresentam espessuras que variam de 0,38 a 3,00 mm e largura de 800 a 1.870 mm, e se destinam a aplicações mais nobres que dos produtos laminados a quente, sendo utilizados para confecção de produtos que demandam espessuras mais finas, como automóveis e eletrodomésticos.

#### g) Tratamento térmico

Como visto anteriormente, o tratamento térmico de produtos planos pode ocorrer por meio das operações de normalização e recozimento. A normalização foi apresentada no item 4, sendo a seguir apresentada a operação de recozimento.

Inicialmente, as bobinas passam por limpeza eletrolítica, usualmente em banho alcalino, seguida de limpeza com escovação e jatos de água, fria e quente, para remoção dos resíduos, dentre os quais se destacam óleos, graxas e sujidades provenientes da laminação a frio. Após a limpeza as bobinas são secas, rebobinadas e armazenadas.

A operação de recozimento consiste no aquecimento de bobinas ou chapas de aço, sob atmosfera protetora, em batelada no forno de recozimento em caixa ou em forno de recozimento contínuo. Esta operação tem como objetivo recuperar a ductilidade e remover tensões internas ocasionadas pela laminação a frio. Contudo, as chapas de aço, quando deixam a operação de recozimento não se encontram apropriadas para o uso, sendo necessária a operação de laminação de encruamento (*skin pass*). Nesta operação, a peça recozida passa por laminadores especiais visando recuperar a capacidade de se deformar de maneira diretamente proporcional ao esforço aplicado, sem que ocorram linhas de distensão em peças estampadas, comprometendo sua estética e integridade.

#### h) Acabamento e revestimento

Inicialmente, as bobinas passam por limpeza eletrolítica, usualmente em banho alcalino, seguida de decapagem em banho ácido. Em seguida, os produtos laminados recebem um revestimento protetor contra corrosão, sendo o mais comum o revestimento com zinco, cuja deposição pode ocorrer através da imersão a quente da chapa metálica em banho de zinco líquido ou por deposição eletroquímica. Pode-se ainda promover o revestimento utilizando-se outros metais, como estanho e cromo, em processos de galvanização. O estanho é usualmente utilizado no revestimento de aço para fabricação de folha-de-flandres, chapas muito finas, com espessura entre 0,20 e 0,30 mm, utilizadas largamente pela indústria de alimentos enlatados. Outra alternativa para aplicação de revestimento de chapas de aço são

as tintas, encontradas em uma grande variedade, de acordo com a aplicação desejada.

### Consumo de água e geração de efluentes líquidos industriais

Em relação ao consumo de água e à geração de efluentes líquidos nas operações de laminação e acabamento, tem-se que os principais pontos de consumo de água são os sistemas de resfriamento, seja por contato direto ou indireto, dos cilindros, da peça laminada e dos equipamentos acessórios dos laminadores e dos fornos, em maior proporção na laminação a quente, mas também importante na laminação a frio.

Outro importante ponto de consumo de água e de geração de efluentes líquidos é representado pelas operações de decapagem e limpeza de laminados. De acordo com a natureza das operações em que a água é utilizada são esperados duas linhas de efluentes líquidos, uma caracterizada por efluentes químicos, ácidos e alcalinos, e outra por efluentes oleosos. O entendimento das características dos efluentes gerados em cada etapa é imprescindível para o desenvolvimento de estratégias de reúso, com ou sem regeneração.

A seguir são apresentados os principais pontos de consumo de água e geração de efluentes líquidos, assim como sistemas de tratamento de efluentes convencionalmente utilizados, para as operações de laminação a quente, decapagem, laminação a frio e acabamento.

- ❖ Laminação a quente – Nesta unidade, a água é utilizada tanto em operações de resfriamento por contato indireto, como por contato direto.

O resfriamento por contato indireto é realizado nos trocadores de calor dos motores e equipamentos periféricos dos laminadores e nos fornos que atendem a esta unidade. Dados típicos de operação mostram que o consumo de água com este propósito pode ser superior a 10.000 t/h. Devido às características destas correntes aquosas, há grande potencial de reutilização por reciclo após tratamento e resfriamento das mesmas.

A utilização de água por contato direto inclui:

- resfriamento da bobina nas etapas de laminação de desbaste e acabamento;
- remoção de carepa, por meio de jatos de alta pressão, após laminador quebrador de carepas;

O sistema de tratamento dos efluentes líquidos gerados nesta unidade deve contemplar estágios de remoção de carepa e óleo e graxas, como por exemplo, tanque de sedimentação e flotador, respectivamente. A adição de agentes coagulantes pode auxiliar na separação dos sólidos em suspensão totais e dos óleos e graxas. Estes últimos podem ser separados do efluente com a utilização de um sistema separador água/óleo. Após a remoção de óleos e graxas, pode-se empregar um sistema de filtração, para redução da concentração de sólidos em suspensão totais, e sistema de torres de resfriamento, para permitir atendimento do parâmetro temperatura para o lançamento ou reutilização dos efluentes. Este efluente apresenta grande potencial para reúso, visto que possui grande vazão e concentração de sólidos em suspensão totais relativamente baixa após tratamento. Dados de uma planta típica indicam uma vazão de quase 15.000 t/h, sendo as concentrações do parâmetro SST iguais a 70 e 10 mg/L, no efluente bruto e tratado, respectivamente.

- ❖ Decapagem – A água é utilizada para operações de resfriamento de equipamentos, por contato indireto, e em operações de contato direto, gerando efluentes que incluem:
  - águas de lavagem das linhas de decapagem;
  - descarte de lavadores de gases;
  - águas residuárias provenientes da drenagem da área;De uma maneira geral, emprega-se tratamento físico-químico para enquadramento destes efluentes.
- ❖ Laminação a frio – Esta unidade também necessita da água tanto para funções de resfriamento por contato indireto, quanto para operações de contato direto. As operações de resfriamento por contato indireto incluem, em suma, os componentes internos dos equipamentos utilizados, podendo o consumo em uma instalação típica ser da ordem de 1.000 t/h. As operações



que demandam a aplicação de água por contato direto geram os seguintes efluentes:

- descarte de emulsão oleosa utilizada para resfriamento e lubrificação dos cilindros e das peças laminadas;
- drenagem da área de produção;
- águas residuárias oleosas provenientes de vazamento do sistema hidráulico dos equipamentos.

Estes efluentes somados apresentam vazão superior a 700 t/h, segundo dados de uma siderúrgica típica. O tratamento para estes efluentes deve considerar, no mínimo: remoção de sólidos em suspensão totais, podendo ser empregado tratamento físico-químico, compreendendo as etapas de coagulação, floculação e sedimentação e remoção de óleos e graxas, podendo ser utilizada a separação gravitacional e flotação, precedida de tratamento químico para conversão de óleos emulsificados.

- ❖ Acabamento – Da mesma forma que ocorre na laminação a frio, as operações de acabamento se dividem, quanto ao consumo de água e geração de efluentes líquidos, em operações de contato indireto e operações de contato direto. O primeiro grupo é destinado ao resfriamento de componentes internos dos diversos equipamentos utilizadas na unidade, apresentando vazão superior a 4.000 t/h em uma instalação típica. As operações caracterizadas por contato direto, representam na mesma instalação, uma vazão de, aproximadamente, 1.000 t/h, sendo constituídas pelos seguintes efluentes líquidos:
  - descarte de banhos alcalinos saturados e águas de lavagem, provenientes da operação de limpeza eletrolítica;
  - descarte de banhos ácidos saturados, provenientes da operação de decapagem;
  - descarte de soluções de lavadores de gases que atendem operações de limpeza eletrolítica, decapagem, estanhagem e cromagem;
  - águas residuárias contendo cromo, provenientes das linhas de estanhamento eletrolítico e zincagem contínua;

- descarte de banhos eletrolíticos saturados e águas de lavagem, por exemplo, estanho e cromo;
- efluentes oleosos, provenientes da linha de recozimento contínuo, da laminação de encruamento e demais operações de acabamento;
- efluentes oleosos, provenientes de eventuais vazamentos;

As instalações de acabamento, como pode ser percebido, ao contrário das demais, geram dois efluentes com características distintas, um efluente químico, de natureza ácida ou alcalina, e um efluente oleoso. O efluente oleoso gerado pode ser tratado pelo mesmo sistema de tratamento de efluentes líquidos descrito para a laminação a frio ou por sistema dedicado com metodologia de tratamento semelhante. Em relação ao efluente ácido ou alcalino, a base da regeneração de correntes é o tratamento físico-químico, sendo um sistema típico constituído por:

- redução de cromo – trata-se de redução de cromo hexavalente, elemento tóxico e solúvel, para cromo trivalente, podendo-se utilizar cloreto ferroso ou metabissulfito de sódio.

- neutralização – consiste na mistura das correntes ácidas e alcalinas de forma a obter uma corrente equalizada, em uma faixa de pH ideal para promover a precipitação do cromo trivalente como hidróxido insolúvel, e a precipitação de hidróxidos de outros metais.

- oxidação de ferro – o objetivo desta etapa é oxidar o ferro divalente a ferro trivalente, para formar hidróxido férrico, que é insolúvel a pH neutro.

- floculação – ocorre em tanques específicos com a adição de polieletrólitos.

- sedimentação – os flocos formados na etapa anterior se separam da fase líquida no tanque de sedimentação, que pode contar com raspadores superficiais, para remoção de óleos e graxas, e raspadores de fundo, para remoção de lodo.

- espessamento de lama – consiste em procedimento para concentração do teor de sólidos em suspensão, podendo ocorrer de forma combinada em espessador, com adição de polímeros, e centrifuga de desaguamento.

A utilização desta sequência de tratamento permite em uma instalação típica, a redução da concentração de sólidos em suspensão totais de 69 para 8 mg/L, considerando-se os efluentes bruto e tratado, respectivamente, além do enquadramento dos demais parâmetros de interesse, dentre os quais se destacam pH, OG, Cr<sup>+6</sup>, Cr<sup>+3</sup>, Pb, Cd, Ni, Cu e Sn.

#### 2.4.6 Unidades auxiliares

Finalmente, apresentam-se resumidamente duas unidades auxiliares, que não se caracterizam, em sua origem, como operações siderúrgicas, mas que são de grande relevância para que a produção do aço possa ser técnica e economicamente viável. Tratam-se das unidades termelétricas e de separação de gases. A demanda de água nestas unidades cumpre o propósito exclusivo de resfriamento, sendo valores de vazão operacional de uma planta típica iguais a, aproximadamente, 40.000 e 8.000 t/h para termelétricas e unidades de separação de gases, respectivamente.

#### 2.4.7 Conclusões

Com esta descrição, conclui-se a apresentação dos principais consumidores de água e os mais significativos geradores de efluentes líquidos e suas respectivas possibilidades de tratamento.

### 2.5 Aspectos legais referentes a recursos hídricos

O propósito do desenvolvimento deste item se fundamenta no reconhecimento do fundamental papel desempenhado pela administração pública na gestão e fomento do uso cada vez mais racional dos recursos hídricos, sendo apresentado um breve resumo sobre a evolução da preocupação sobre o tema em leis e regulamentos ao longo da história. Atualmente, é cada vez mais pacífico o entendimento da importância dos governos, em suas diferentes esferas de atuação, na divulgação e promoção de informações sobre o correto uso da água e de práticas para conter seu desperdício.

Uma das primeiras referências aos aspectos qualitativos da água, considerando a necessidade do disciplinamento do seu uso, prevendo, inclusive, alguma forma de penalização para aqueles que causassem dano a este recurso foi proposto por Platão em 400 a.C. Passados quase mil anos, foi promulgada, no que hoje constitui a Grã-Bretanha, lei que proibia o lançamento de excrementos, lixo e detritos em fossas, rios e outras águas. Estas proibições foram impostas pelo Ato

Inglês, considerado a lei britânica mais antiga sobre controle de poluição das águas e do ar, sendo posteriormente acompanhada por outros países (MACEDO, 2007).

A discussão sobre a gestão de recursos hídricos no Brasil ganhou especial destaque, a partir de 10 de julho de 1934, quando, por meio do Decreto 24.643 foi promulgado o Código das Águas. Ao contrário do que indica o senso comum, já no início do século passado, o poder público já reconhecia a necessidade de se ter uma legislação atualizada sobre o tema, em concordância com as necessidades e os interesses da coletividade nacional. Esta preocupação foi refletida nas considerações iniciais do código que consideraram a importância do controle e incentivo ao aproveitamento industrial das águas, ao mesmo tempo em que ressaltou a necessidade de se terem medidas que facilitassem e permitissem o aproveitamento racional da energia hidráulica (BRASIL, 1934). O projeto que instituiu o Código das Águas teve seus antecedentes em 1906, no governo Afonso Pena, quando se organizaram as bases para elaboração do Código Rural e Florestal, assim como os Códigos de Mineração e das Águas (MACEDO, 2007).

Um importante marco na evolução do tema foi estabelecido com a definição da Política Nacional do Meio Ambiente, por meio da Lei 6.938/81, regulamentada pelo Decreto no 99.274, de 6 de junho de 1990 e suas alterações, que dentre outras importantes medidas criou o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que desde 1986 vem publicando importantes resoluções para promoção do controle e da qualidade das águas, dentre as quais podem ser citadas as Resoluções nº 430/11, 410/09, 397/08, 396/08, 393/07, 370/06, 357/05 e 274/00, que dispõe, dentre outros, sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento e condições e padrões para lançamento de efluentes (BRASIL, 1981; CONAMA, 2012).

Posteriormente à definição da Política Nacional de Meio ambiente, a Constituição Federal, de 1988, contemplou no inciso XIX do art. 21 a necessidade de se instituir sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso (BRASIL, 1988). Este inciso foi regulamentado pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, dentre outras providências, baseando-se nos seguintes princípios (BRASIL, 1997):

I - a água é um bem de domínio público;

II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;

III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;

IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;

V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Analisando-se mais atentamente estes princípios percebe-se que, embora o uso pelo setor industrial esteja contemplado no uso múltiplo das águas, e sua participação assegurada nos instrumentos para sua gestão, em situações de escassez o mesmo é relegado a uma desconfortável condição de vulnerabilidade, visto que, por lei, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais.

Em 17 de julho de 2000, por meio da Lei 9.984, foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), como entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 2000). Em sequência, houve a regulamentação do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, por meio do Decreto nº 4.613, de 11 de março de 2003 (BRASIL, 2003). Objetivando promover ações para o desenvolvimento do gerenciamento hídrico no país foi promulgado em 22 de março de 2005 o Decreto que institui a Década Brasileira da Água, a ser iniciada na mesma data (BRASIL, 2005). De acordo com o último levantamento realizado pela Agência Nacional de Águas com dados de 2007, dos pontos de monitoramento existentes no país, 9% apresentam qualidade ótima, 70 % boa, 14% regular e 9% ruim ou péssima (ANA, 2012).

Desde então, uma série de Decretos instituíram Comitês de Bacia em rios de domínio da União e mais de 120 Resoluções foram elaboradas e publicadas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2011).

No estado do Rio de Janeiro, a Lei nº 3.239/99 instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos e criou um sistema de gerenciamento integrado, com participação cada vez mais ampla da sociedade, por meio de comitês de bacia, que possuem

poder consultivo, normativo e deliberativo, e objetivam tomar decisões que influenciem na melhoria da qualidade de vida da região e no desenvolvimento sustentado da bacia (RIO DE JANEIRO, 1999).

Um dos instrumentos previstos pela Lei nº 3.239/99 é a cobrança pelo uso da água bruta, que foi regulamentada pela Lei nº 4.247/03 (Rio de Janeiro, 2003). Atualmente, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA) é o órgão responsável por arrecadar e administrar estes recursos, que são recolhidos ao Fundo Estadual de Recursos Hídricos – FUNDRHI e aplicados de acordo com o estabelecido pelos respectivos Comitês de Bacia Hidrográfica (INEA, 2012a).

Os critérios estabelecidos na Lei Estadual 4.247, de 16 de dezembro de 2003, que dispõe sobre a cobrança pela utilização dos recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro e dá outras providências (RIO DE JANEIRO, 2003) pode ser utilizado como base para o desenvolvimento de equação para a predição de custos de operação de sistemas de reutilização de água e de efluentes líquidos. Os principais objetivos esperados com a aplicação desta lei, que foi complementada pela Lei nº 5.234, de 05 de maio de 2008, são:

- I - reconhecer a água como bem econômico e como recurso limitado que desempenha importante papel no processo de desenvolvimento econômico e social, proporcionando aos usuários indicações de seu real valor e dos custos crescentes para sua obtenção;
- II - incentivar a racionalização do uso da água;
- III - incentivar a localização e a distribuição espacial de atividades produtivas no território estadual;
- IV - fomentar processos produtivos tecnologicamente menos poluidores;
- V - obter recursos financeiros necessários ao financiamento de estudos e à aplicação em programas, projetos, planos, ações, obras, aquisições, serviços e intervenções na gestão dos recursos hídricos proporcionando a implementação da Política Estadual de Recursos Hídricos (PERHI);
- VI – financiar pesquisas de recuperação e preservação de recursos hídricos subterrâneos.
- VII- Apoiar as iniciativas dos proprietários de terra onde se encontram as nascentes a fim de incentivar o reflorestamento e o aumento de seu volume de águas.

Ainda segundo esta lei, serão cobrados os usos de recursos hídricos sujeitos a outorga, assim entendidos:

- I. derivação ou captação de parcela de água existente em um corpo d'água;
- II. extração de água de aquífero;
- III - lançamento, em corpo de água, de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;
- IV - aproveitamento dos potenciais hidrelétricos;
- V - outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo hídrico.

A fixação dos valores a serem cobrados pelo uso de recursos hídricos não é trivial e deve considerar os seguintes aspectos:

I - nas derivações, captações e extrações de água e nos aproveitamentos hidrelétricos:

- a) a natureza do corpo d'água - superficial e subterrâneo;
- b) a classe de uso preponderante em que estiver enquadrado o corpo d'água no local do uso ou da derivação;
- c) a disponibilidade hídrica local;
- d) o grau de regularização assegurado por obras hidráulicas;
- e) o volume captado, extraído ou derivado e seu regime de variação;
- f) o consumo segundo o tipo de utilização da água;
- g) a finalidade a que se destinam;
- h) a sazonalidade;
- i) as características dos aquíferos;
- j) as características físico-químicas e biológicas da água no local;
- l) a localização do usuário na Bacia;
- m) as práticas de conservação e manejo do solo e da água.

II - No lançamento para diluição, transporte e assimilação de efluentes:

- a) a classe de uso preponderante em que estiver enquadrado o corpo d'água receptor no local;
- b) o grau de regularização assegurado por obras hidráulicas;

- c) a carga lançada e seu regime de variação, ponderando-se os parâmetros orgânicos e físico-químicos dos efluentes;
- d) a natureza da atividade;
- e) a sazonalidade;
- f) a vulnerabilidade dos aquíferos;
- g) as características físico-químicas e biológicas do corpo receptor no local do lançamento;
- h) a localização do usuário na Bacia;
- i) as práticas de conservação e manejo do solo e da água.

Desde novembro de 2006, o território do Rio de Janeiro, para fins de gestão dos recursos hídricos, encontra-se subdividido em 10 (dez) Regiões Hidrográficas (RH's). Desde então, por força da Resolução/CERHI-RJ Nº 18 (08/11/2006), tem-se objetivado facilitar a gestão deste importante recurso natural e otimizar a aplicação dos recursos financeiros arrecadados com a cobrança pelo uso da água em cada região (INEA, 2012b).

Em relação ao controle do lançamento de efluentes líquidos, as principais normas que tratam do controle do lançamento de efluentes no Estado do Rio de Janeiro são: NT-202.R-10 – Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos (FEEMA, 1986); NT-213.R-4 – Critérios e padrões para controle da toxicidade em efluentes líquidos industriais (FEEMA, 1990); DZ-205.R-6 – Diretriz de controle de carga orgânica em efluentes líquidos de origem industrial (FEEMA, 2007); e DZ-215.R-4 – Diretriz de controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem sanitária (FEEMA, 2007).

Conforme pode ser percebido, a legislação ambiental de uma forma geral, e, com especial destaque para aquela que trata sobre os recursos hídricos, passa por evolução constante. Nos setores produtivos brasileiros, de uma forma geral, tem se percebido um aumento no número de estudos de reutilização de água e efluentes, mesmo em regiões onde o custo da água seja relativamente baixo. É cada vez mais comum os setores demonstrarem envolvimento com o desenvolvimento de práticas sustentáveis, seja motivado pela necessidade do atendimento de normas e leis, em constante desenvolvimento, seja para o atendimento de uma sociedade, onde se incluem os clientes, sócios e colaboradores, cada vez mais exigente e consciente do seu papel no desenvolvimento de uma sociedade mais sustentável.



## 2.6 Reutilização de águas e de efluentes líquidos

A reutilização de água e efluentes líquidos na indústria pode ser efetuada segundo duas estratégias:

- Reúso: consiste na reutilização em operação diferente daquela de origem.
- Reciclo: consiste na reutilização na mesma operação de origem.

Esta prática tem se desenvolvido rapidamente em diversos setores da sociedade atual, com a vantagem dupla de contribuir para uma melhor qualidade ambiental, ao mesmo tempo que possibilita a economia de recursos materiais, tornando a atividade mais sustentável e competitiva.

Em alguns casos, a reutilização só é viabilizada tecnicamente com o emprego de alguma estratégia de regeneração de correntes. Embora a instalação e operação de sistemas de tratamento de águas e efluentes líquidos requeiram investimentos nem sempre baixos, muitas vezes este é recuperado rapidamente, por conta da economia associada à outorga de captação de água e de lançamento de efluentes, que, via de regra, tem se tornado cada vez mais onerosa e restritiva quanto às condições de lançamento. Além disso, a certificação de uma empresa quanto à sustentabilidade ambiental pode conferir vantagens competitivas em um mercado onde selos verdes são cada vez mais valorizados.

Deve-se considerar, no entanto, que embora as práticas de reutilização sejam cada vez mais difundidas, o seu desenvolvimento nem sempre está atrelado a uma estratégia de integração de processos que garanta a obtenção de um resultado ótimo a partir de um procedimento sistemático, eficiente e eficaz quanto à minimização do consumo de água e da geração de efluentes líquidos. É sabido que há limitações quanto ao arranjo de unidades industriais mais antigas que impedem que uma configuração ótima seja atendida. Contudo, mesmo em novos projetos, percebe-se que, muitas vezes, é realizada uma simples inspeção de corrente, restringindo-se a uma análise localizada que desconsidera os efeitos sinérgicos e, por conseguinte, a obtenção de um cenário otimizado de reúso que considere as necessidades da planta industrial como um todo, e não apenas de um setor em particular.

São apresentados na literatura diversos trabalhos dedicados à minimização de recursos hídricos utilizando-se para tal metodologias que se baseiam em

princípios de integração de processos, utilizando-se técnicas de programação matemática ou regras heurísticas. Estas últimas, desenvolvidas em conjunto com regras evolutivas, apresentam a vantagem de apresentar maior simplicidade quanto à aplicação e rapidez na obtenção de resultados, embora apresentem ainda limitações no estudo de sistemas multicontaminantes (WANG e SMITH, 1994; WANG e SMITH, 1995a; WANG e SMITH, 1995b; ALVA-ARGÁEZ *et al.*, 1999; HALLALE, 2002; FENG e ZHANG, 2003; MANAN *et al.*, 2004; LIU *et al.*, 2004; LIU *et al.*, 2005; ALY *et al.*, 2005; PERLINGEIRO, 2005; FOO *et al.*, 2006; GOMES *et al.*, 2006; QUEIROZ e PESSOA, 2006; FOO, 2008; KIM *et al.*, 2009).

O algoritmo Diagrama de Fontes de Água (DFA), proveniente dos métodos de análise *pinch*, que por sua vez se baseiam em mecanismos fontes-sumidouros, vem mostrando grande potencial para ser utilizada em estudos de reúso, tendo se mostrado eficiente na resolução de vários estudos de caso apresentados na literatura, com resultados comparáveis aos obtidos por programação matemática, sendo, no entanto, mais simples de serem obtidos, não exigindo grandes modificações no processo original. Apresenta-se especial destaque para os trabalhos desenvolvidos pelo Grupo de Integração de Processos Químicos “Carlos A. Guimarães Perlingeiro” da Escola de Química da UFRJ (GIPQ/EQ/UFRJ), nos quais a adoção de um tratamento distribuído apresentou vantagens sobre o tradicionalmente utilizado tratamento centralizado e de fim de tubo (CASTRO, 1999; GOMES, 2002; DELGADO, 2003; SANTOS, 2007; MIRRE, 2007; MARQUES, 2008; DELGADO, 2008)

O DFA é uma evolução do procedimento apresentado por Castro *et al.* (1999), que foi desenvolvido para sistemas com um contaminante. O desenvolvimento do procedimento para outras configurações de rede de transferência de massa foi realizado por Gomes (2002), que estendeu a metodologia para múltiplos contaminantes e permitiu sintetizar redes de transferência de massa para diversas situações, como, por exemplo, utilização de múltiplas fontes externas, perdas de processo, restrições de uso e regeneração de correntes.

O algoritmo DFA foi ampliado por Delgado (2003) para casos com regeneração diferenciada de contaminantes, adotando-se diferentes valores de eficiência de tratamento em sistemas com múltiplos contaminantes para determinar o sistema de tratamento mais apropriado, de acordo com o contaminante de referência. Esta metodologia foi aplicada a quatro setores industriais: fabricação de

papelão, branqueamento de polpa de celulose, refinaria e fabricação de sorbitol e dextrose.

Um avanço para a aplicação do algoritmo Diagrama de Fontes de Água ocorreu com a sua automatização em planilhas de cálculo em linguagem Excel®, desenvolvida por Santos (2007), o que resultou no *software* Minimização de Efluentes Aquosos (MINEA), um programa de síntese de redes de transferência de massa, que utiliza regras heurísticas visando alcançar um consumo de mínimo de água. Este programa foi avaliado através de estudos de caso, tendo sido alcançada, para máximo reúso, redução no consumo de água equivalente ou superior aos resultados obtidos com outras metodologias apresentadas na literatura.

No mesmo ano, Mirre apresentou os resultados da aplicação do DFA para uma refinaria de petróleo, tendo sido gerados diversos cenários que contemplaram tanto o reúso quanto o reciclo de correntes aquosas, além de regeneração de correntes.

A aplicação do DFA na síntese de sistemas de regeneração diferenciada e no tratamento distribuído de efluentes líquidos, com propósito de minimização do consumo de água, foi realizada por Delgado (2008). Foram propostos dois algoritmos utilizando DFA, para reúso ou reciclo, e um algoritmo de Diagrama de Fontes de Rejeitos, cujas aplicações resultaram em menores custos totais quando comparados a estudos de caso disponíveis na literatura.

Marques (2008) ampliou a aplicabilidade do método para as tipologias industriais papel e celulose, suco cítrico, têxtil e petroquímica, concluindo pela viabilidade técnica e econômica dos cenários obtidos.

Considerando o histórico apresentado e objetivando dar continuidade aos estudos desenvolvidos por este grupo de pesquisa, estendendo a abrangência e a aplicabilidade para o setor siderúrgico, importante setor na economia brasileira e que apresenta alto potencial poluidor, elegeu-se para o desenvolvimento desta dissertação o algoritmo de diagrama de fontes de água, por meio do *software* MINEA®, como ferramenta de integração mássica, a partir da elaboração de redes de transferência de massa, e estratégia para minimização do consumo de água e, conseqüentemente, da geração de efluentes líquidos.

# Capítulo 3

## METODOLOGIA

---

“Eu tive menos dificuldade em descobrir o movimento dos corpos celestes, apesar da surpreendente distância, do que investigar o movimento de um curso de água bem diante de nossos olhos.”

Galileo Galilei (1564-1642)

A metodologia adotada para a exploração do tema nesta Dissertação foi a seguinte:

(a) formulação de uma estrutura base para o processo siderúrgico, com a seleção dos dados de natureza física para este caso, contemplando vazões e concentrações.

(b) utilização do algoritmo DFA para a geração de um sistema para redução do consumo de água e efluentes líquidos com a correspondente avaliação econômica. O resultado desta etapa foi considerado como Caso Base para as etapas subsequentes.

(c) formulação de 20 modificações progressivas nas condições consideradas no Caso Base, gerando Cenários diferentes para a exploração do tema.

(d) utilização do algoritmo DFA, para cada Cenário, gerando o respectivo sistema para redução do consumo de água e efluentes líquidos com a correspondente avaliação econômica.

Seguem os detalhes referentes ao algoritmo DFA e aos critérios de avaliação econômica.

### 3.1 Diagrama de Fontes de Água (DFA)

Para utilizar o software MINEA, apresentado no Capítulo 2, item 2.6, e assim desenvolver os Diagramas de Fontes de Água, é necessário fornecer alguns dados de entrada para cada operação de interesse, quais sejam:

- vazão operacional (t/h)
- concentração de entrada (ppm)
- concentração de saída (ppm)

Após a entrada dos dados acima listados procede-se ao cálculo das cargas mássicas transferidas em cada operação, pelo produto da vazão pela diferença entre as concentrações final e inicial, sendo o resultado apresentado em g/h. Em seguida prossegue-se à geração de linhas base de concentração, que resultará na divisão dos intervalos do diagrama, de acordo com a quantidade de informações sobre concentração contidas na tabela inicial. Finalmente, procede-se ao cálculo novamente, gerando o Diagrama de Fonte de Água para o cenário escolhido. Planilhas em Excel® podem ser geradas a partir do comando “Gerar Saída”. Estas

planilhas contêm, além do DFA, informações sobre as vazões admitidas em cada operação, por consumo de água fresca ou por reúso.

Embora o procedimento seja simples, ele é suficiente para fornecer diversas informações importantes para o desenvolvimento e avaliação dos cenários de reúso, a partir da utilização de equações específicas. Desta forma, pode-se obter:

- Consumo total de água, sem reúso
- Consumo total de água, com reúso
- Redução percentual no consumo de água
- Vazão total reusada
- Percentual de reúso
- Consumo *per capita* com reúso
- Consumo *per capita* sem reúso
- Vazão total de efluentes gerados, sem reúso
- Vazão total de efluentes gerados, com reúso
- Redução percentual na geração de efluentes

O *software* permite ainda gerar cenários restringindo a transferência de massa entre determinadas operações, por meio da proibição de reúso, considerando perda ou ganho de vazão, restringindo vazão em determinada corrente, considerando múltiplas fontes externas, incluindo operação de regeneração de correntes, simulando comportamento de torre de resfriamento e promovendo deslocamento de concentrações para análises de cenários com múltiplos contaminantes.

Identificadas as informações necessárias para a aplicação do algoritmo DFA e fundamentando-se nos dados obtidos na revisão bibliográfica realizada sobre os processos siderúrgicos, apresentada no capítulo 2, desenvolveu-se tabela resumo do estudo de caso (Tabela 3.1), considerando: (i) as vazões das unidades de processo de uma usina siderúrgica com capacidade de produção aproximada de 5 Mtpa e (ii) dados de concentração, nas correntes afluentes e efluentes, de sólidos em suspensão totais, que se apresentam como o mais significativo parâmetro global para controle e monitoramento, devido às características dos processos siderúrgicos (UNITED STATES STEEL, 1985). Ressalta-se que a escolha deste parâmetro, embora fundamentada, não descarta a necessidade de atendimento dos demais às leis e regulamentos vigentes, devendo os sistemas de tratamento empregados ser apropriados para tal.

Tabela 3.1 - Tabela resumo do estudo de caso considerando o parâmetro SST.

Etapas	Operação	Vazão operacional (t/h)	Concentração de entrada máxima (ppm)	Concentração de saída máxima (ppm)	Carga mássica ( $\Delta m$ ) (g/h)	
Preparação de cargas	1	Pátio de estocagem de matérias primas	379	35	73	14.402
	2	Pátio de estocagem de carvão	82	35	87	4.264
	3	Calcinação	23	35	48	299
	4	Coqueificação	807	35	229	156.558
	5	Carboquímico - resfriamento por contato indireto	5.118	20	20	5,12
	6	Carboquímico - resfriamento por contato direto	90	10	46	3.240
	7	Sinterização	831	20	20	0,83
Redução (Altos Fornos)	8	Resfriamento de internos por contato indireto	14.627	20	20	14,63
	9	Resfriamento de gases (contato direto)	3.382	50	1.420	4.633.340
Conversão e Refino (Aciaria)	10	Conversão - Resfriamento de internos por contato indireto	7.267	20	20	7,27
	11	Conversão - resfriamento de gases por contato direto	1.290	50	5.961	7.625.190
	12	Refino - resfriamento de internos por contato indireto	685	20	20	0,69
	13	Refino - resfriamento de gases por contato direto	2.474	200	250	123.680
Lingotamento	14	Resfriamento de	6.069	10	10	6,07

Contínuo		moldes por contato indireto				
	15	Resfriamento com sprays - contato direto	17.209	20	150	2.237.219
Laminação e Acabamento	16	Decapagem - resfriamento por contato indireto	1.029	20	20	1,03
	17	Decapagem - operações com contato direto	16	20	88	1.088
	18	Laminação a quente - resfriamento de internos por contato indireto	10.017	20	20	10,02
	19	Laminação a quente - resfriamento por contato direto	14.737	20	70	736.826
	20	Laminação a frio - operações com contato indireto	1.029	20	20	1,03
	21	Laminação a frio - operações com contato direto	711	20	1.782	1.252.782
	22	Acabamento - resfriamento de internos por contato indireto	4.240	20	20	4,24
	23	Acabamento - operações com contato direto	970	20	69	47.530
Termelétrica	24	-	40.000	20	20	40
Unidade de Sep. de Gases	25	-	8.360	20	20	8,36

### 3.2 Avaliação econômica

Uma vez estabelecida a metodologia que será aplicada para avaliação técnica, procede-se neste item ao desenvolvimento de metodologia para avaliação



econômica. Os resultados da aplicação das metodologias técnica e econômica, apresentadas neste e no próximo capítulo, respectivamente, são apresentados e discutidos no capítulo 4.

O critério para a avaliação econômica dos cenários de reutilização deve contemplar dois aspectos importantes:

(a) cobrança sobre o uso de recursos hídricos

Em consonância com as Políticas Nacional e Estadual de Recursos Hídricos, assim como com a legislação sobre cobrança sobre o uso de recursos hídricos no Estado do Rio de Janeiro referente à outorga para captação de água e lançamento de efluentes. A segunda parcela deve considerar os custos advindos do tratamento de água e efluentes, visando o reúso ou reciclo, ou para adequação aos padrões de lançamento estabelecidos em leis e regulamentos vigentes.

O desenvolvimento da primeira parcela da equação base para avaliação econômica é realizado tomando-se como referência o Art. 19 da Lei 4.247/03, sendo fórmula de cálculo e demais condições da cobrança fixados conforme os critérios que se seguem:

$$\text{Cobrança mensal total} = Q_{\text{cap}} \times [ K_0 + K_1 + (1 - K_1) \times (1 - K_2 - K_3) ] \times \text{PPU}$$

Onde:

$Q_{\text{cap}}$  corresponde ao volume de água captada durante um mês ( $\text{m}^3/\text{mês}$ ).

$K_0$  expressa o multiplicador de preço unitário para captação (inferior a 1,0 (um) e definido pelo INEA).

$K_1$  expressa o coeficiente de consumo para a atividade do usuário em questão, ou seja, a relação entre o volume consumido e o volume captado pelo usuário ou o índice correspondente à parte do volume captado que não retorna ao manancial.

$K_2$  expressa o percentual do volume de efluentes tratados em relação ao volume total de efluentes produzidos ou o índice de cobertura de tratamento de efluentes doméstico ou industrial, ou seja, a relação entre a vazão efluente tratada e a vazão efluente bruta.

$K_3$  expressa o nível de eficiência de redução de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) na Estação de Tratamento de Efluentes.

PPU é o Preço Público Unitário correspondente à cobrança pela captação, pelo consumo e pela diluição de efluentes, para cada m<sup>3</sup> de água captada (R\$/m<sup>3</sup>).

A cobrança mensal total pode ser entendida como a soma de três parcelas:

$$C = Q_{cap} \times k_0 \times PPU + Q_{cap} \times k_1 \times PPU + Q_{cap} \times (1 - k_1) \times (1 - k_2 \times k_3) \times PPU$$

Onde:

1ª Parcela – corresponde à cobrança pelo volume de água captada no manancial.

2ª Parcela – corresponde à cobrança pelo consumo (volume captado que não retorna ao corpo hídrico).

3ª Parcela – corresponde à cobrança pelo despejo do efluente no corpo receptor.

A metodologia e os critérios aplicáveis às atividades industriais são os descritos no "caput" do artigo 19, observadas as seguintes considerações:

I - Preço Público Unitário (PPU) no valor de R\$ 0,02 (dois centavos de real) por metro cúbico;

II - Coeficiente k<sub>0</sub> igual a 0,4 (quatro décimos);

III - o valor de Q<sub>cap</sub> e de k<sub>1</sub> serão informados pelos usuários, sujeitos à fiscalização prevista na legislação pertinente;

IV - o valor da terceira parcela da fórmula, referente à redução de DBO, representa a relação entre a vazão efluente tratada e a vazão efluente bruta (k<sub>2</sub>), e K<sub>3</sub> expressa o nível de eficiência de redução de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) na Estação de Tratamento de Efluentes.

Desta forma, a primeira parcela da equação de avaliação econômica de cenários de reúso (3.1), referente aos custos pela utilização dos recursos hídricos, é:

$$C_{ORH} = 0,02 \times Q_{cap} \times [0,4 + K_1 + (1 - K_1) \times (1 - K_2 \times K_3)] \quad (3.1)$$

A Lei 4.247/03 buscou também incentivar a captação, armazenamento e uso das águas das chuvas, bem como do reaproveitamento das águas servidas, aceitando o custo das benfeitorias e equipamentos, bem como de sua conservação, como pagamento, ou parte do pagamento, da outorga de uso dos recursos hídricos.

Ressalta-se finalmente que a cobrança pelo uso dos recursos hídricos não exige o usuário, do cumprimento das normas e padrões ambientais previstos na legislação, relativos ao controle da poluição das águas, bem como sobre a ocupação de áreas de domínio público estadual.

(b) custos de tratamento de água para fins industriais e de efluentes líquidos e águas residuárias

Procedendo-se ao desenvolvimento de equação base para avaliação econômica dos cenários de reutilização, devem ser considerados os custos de tratamento de água para fins industriais e de efluentes líquidos e águas residuárias, que variam em função do nível de tratamento escolhido e proporcionalmente à vazão operacional. Propõe-se como referência para cálculo desta parcela as equações apresentadas por Ulrich e Vasudevan (2006). Segundo o autor, os custos de tratamento podem ser calculados pela equação (3.2), sendo os coeficientes da equação apresentados na Tabela 3.2. Não foram considerados os custos de capital decorrentes de modificações estruturais ditadas pela algoritmo DFA.

$$C_{OP} = a X + b Y \quad (3.2)$$

Onde:

$C_{OP}$ : Custo operacional da utilidade (água ou efluente tratados)

a: coeficiente de custo de utilidades

X: Índice de custo da planta (CE Cost Plant Index)

b: coeficiente de custo de utilidades

Y: Custo de combustível (\$/GJ)

Tabela 3.2 – Coeficientes da equação de cálculo de custo de tratamento de água e efluentes.

Utilidade	a <sup>(1)</sup>	b <sup>(2)</sup>
Tratamento de água (\$/m <sup>3</sup> )		
Água bruta <sup>(3)</sup> 0,001 < q < 10 m <sup>3</sup> /s	$1,0 \cdot 10^{-4} + 3,0 \cdot 10^{-6} q^{-0.6}$	0,003
Água de resfriamento 0,01 < q < 10 m <sup>3</sup> /s	$0,0001 + 3,0 \cdot 10^{-5} q^{-1}$	0,003
Água desmineralizada 0,001 < q < 1 m <sup>3</sup> /s	$0,007 + 2,5 \cdot 10^{-4} q^{-0.6}$	0,04
Água potável 0,001 < q < 10 m <sup>3</sup> /s	$7,0 \cdot 10^{-4} + 3,0 \cdot 10^{-5} q^{-0.6}$	0,02
Tratamento de efluentes líquidos (\$/m <sup>3</sup> )		
Tratamento primário 0,01 < q < 10 m <sup>3</sup> /s	$0,0001 + 2,0 \cdot 10^{-7} q^{-1}$	0,002
Tratamento secundário 0,01 < q < 10 m <sup>3</sup> /s	$0,0007 + 2,0 \cdot 10^{-6} q^{-1}$	0,003
Tratamento terciário 0,0003 < q < 10 m <sup>3</sup> /s	$0,001 + 2,0 \cdot 10^{-4} q^{-0.6}$	0,1

<sup>(1)</sup> q (vazão) é dado em m<sup>3</sup>/s.

<sup>(2)</sup> Embora não sejam queimados combustíveis para a obtenção de água de resfriamento, o parâmetro b foi considerado devido às demandas de energia elétrica para o acionamento das bombas. Quando combustível é queimado para a obtenção de energia elétrica, o seu custo deve ser incluído no custo da água de resfriamento.

<sup>(3)</sup> Passagem por peneiras e bombeamento.

Esses dois critérios, (a) e (b), encontram-se representados na equação (3.3) utilizada para o cálculo do custo total associado a cada Cenário analisado. Uma vez considerados os custos associados com a outorga de captação de água e lançamento de efluentes líquidos, com custo adicional para vazões perdidas por

evaporação, e os custos associados ao tratamento de água e efluentes líquidos industriais, pela adição das parcelas apresentadas nas equações (3.1) e (3.2), chega-se a equação (3.3), que servirá como base para o cálculo do custo total para os cenários que serão desenvolvidos considerando estratégias de reúso e reciclo, com ou sem regeneração de correntes, cujos resultados serão apresentados e discutidos ao longo do Capítulo 4.

$$C = C_{ORH} + C_{OP} = 0,02 \times Q_{cap} \times [0,4 + K1 + (1 - K1) \times (1 - K2 \ K3)] + aX + bY \quad (3.3)$$

## Capítulo 4

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

“A  
água não  
deve ser des-  
perdiçada, nem  
poluída, nem  
envenenada.  
De maneira  
geral, sua  
utilização  
deve ser  
feita com  
consciência  
para que não  
se chegue a  
uma situação de  
esgotamento ou  
de deterioração  
da qualidade  
das reservas  
atualmente  
disponíveis.”

Princípio 7 da  
Declaração Universal  
dos Direitos da Água  
(ONU, 1992)

Este capítulo é dedicado ao desenvolvimento de vinte cenários com a aplicação do algoritmo Diagrama de Fontes de Água (DFA), por meio do programa computacional MINEA®, que se apresenta como importante ferramenta para o desenvolvimento de estratégias de minimização do consumo de água e da geração de efluentes líquidos industriais. Os resultados estão dispostos em uma sequência evolutiva, a partir de um cenário base hipotético, que representa a pior condição operacional, ambiental e econômica possível até cenários com estratégias de reúso mais sofisticadas, aproveitando-se os resultados obtidos em um determinado cenário para o desenvolvimento de outros cenários, buscando sempre melhores resultados. Considerou-se nesta dissertação a simulação de cenários de uma siderúrgica hipotética, com capacidade de produção de 5,5 milhões de toneladas de aço bruto por ano (Mtpa), baseando-se, no entanto, em dados qualitativos e quantitativos sobre águas e efluentes líquidos industriais de uma usina siderúrgica real. A discussão de resultados é fundamentada na viabilidade técnica, apontada pela minimização do consumo de água e da geração de efluentes líquidos industriais, levando-se também em consideração uma análise econômica comparativa entre os diversos cenários desenvolvidos, com base no custo operacional anual, objetivando permitir a identificação das melhores alternativas.

#### 4.1 Cenário base

O cenário base, ou cenário 0, é caracterizado por ausência de reúso e reciclo de correntes e também pela ausência de seu tratamento. O seu desenvolvimento se justifica pela necessidade de se ter uma linha de referência para avaliar os resultados apresentados pelos cenários subsequentes. Trata-se de um cenário hipotético e representa um extremo desta linha de estudo. Esta condição não é recomendada e nem, em muitos países, possível devido às leis e regulamentos vigentes. A maior parte das siderúrgicas se encontra no meio do caminho, muitas vezes desenvolvendo estudos de reúso, mas nem sempre de uma forma integrada e sistemática que garanta um resultado otimizado. Assim sendo, o cenário base considera consumo de água de 141.441 t/h de água, com geração de efluentes na mesma ordem de grandeza. O custo anual total associado à outorga e tratamento de água, segundo metodologia apresentada no capítulo 3, é de R\$ 182.951.308,55, sendo R\$ 34.217.440,59 referentes ao custo de outorga e R\$ 148.733.867,96 associados ao custo do tratamento de água.

## 4.2 Cenário 1

Considerou-se para o desenvolvimento deste primeiro caso um cenário preliminar, caracterizado por circuito aberto em todas as operações e sem a ocorrência de perdas, permitindo reúso entre sistemas de resfriamento por contato direto e indireto a disponibilidade não limitada de água com SST ausentes (0 ppm). A Tabela 4.1 contém as informações quantitativas e qualitativas de todas as correntes envolvidas na totalidade das operações siderúrgicas.

Tabela 4.1 – Dados de processo de operações consumidoras de água em siderurgia.

Etapas	Operação		Vazão operacional (t/h)	Concentração de entrada máxima (ppm)	Concentração de saída máxima (ppm)	Carga mássica ( $\Delta m$ ) (g/h)
Preparação de cargas	1	Pátio de estocagem de matérias primas	379	35	73	14.402
	2	Pátio de estocagem de carvão e coque	82	35	87	4.264
	3	Calcinação	23	35	48	299
	4	Coqueificação	807	35	229	156.558
	5	Carboquímico - resfriamento por contato indireto	5.118	20	20	5,12
	6	Carboquímico - resfriamento por contato direto	90	10	46	3.240
	7	Sinterização	831	20	20	0,83
Redução (Altos Fornos)	8	Resfriamento de internos por contato indireto	14.627	20	20	14,63
	9	Resfriamento de gases por contato direto	3.382	50	1420	4.633.340
Conversão e Refino (Aciaria)	10	Conversão - resfriamento de internos por contato indireto	7.267	20	20	7,27
	11	Conversão - resfriamento de gases por contato direto	1.290	50	5961	7.625.190
	12	Refino - resfriamento	685	20	20	0,69



		de internos por contato indireto				
	13	Refino - resfriamento de gases por contato direto	2.474	200	250	123.680
Lingotamento Contínuo	14	Resfriamento de moldes por contato indireto	6.069	10	10	6,07
	15	Resfriamento com sprays - contato direto	17.209	20	150	2.237.219
Laminação e Acabamento	16	Decapagem - resfriamento por contato indireto	1.029	20	20	1,03
	17	Decapagem - operações com contato direto	16	20	88	1.088
	18	Laminação a quente - resfriamento de internos por contato indireto	10.017	20	20	10,02
	19	Laminação a quente - resfriamento por contato direto	14.737	20	70	736.826
	20	Laminação a frio - operações com contato indireto	1.029	20	20	1,03
	21	Laminação a frio - operações com contato direto	711	20	1782	1.252.782
	22	Acabamento - resfriamento de internos por contato indireto	4.240	20	20	4,24
	23	Acabamento - operações com contato direto	970	20	69	47.530
	Termelétrica	24	-	40.000	20	20
Unidade de Separação de Gases	25	-	8.360	20	20	8,36

O desenvolvimento deste cenário foi realizado para avaliar uma condição onde propositalmente não foram levadas em consideração as especificidades de cada corrente e a lógica de reúso, a fim de que possa posteriormente ser comparada com outros cenários onde estes aspectos foram contemplados, de forma a demonstrar a importância da sistematização em um estudo de reúso. As restrições ao sistema serão impostas nos cenários que serão desenvolvidos em sequência.

Analisando-se o diagrama mostrado na Figura 4.1, observa-se que a operação 1 usou 160,87 t/h de água, ao invés da vazão original de 379,00 t/h, o que ocorreu devido ao reúso de 218,13 t/h provenientes das operações 3, 6 e 23. De forma similar, as operações 2, 4, 6, 9, 11, 13, 15, 17, 19 e 21 tiveram o consumo de água diminuído devido à ocorrência de reúso.

As operações 6, 15, 17 e 19 se destacaram pelo grande número de correntes reusadas. A operação 6, por exemplo, utilizou quatro correntes de reúso, provenientes das Operações 8, 14, 18 e 24, o que possibilitou a redução do consumo de água de 90 t/h para 68,13 t/h. Outras operações que apresentaram grande redução no consumo de água foram as operações 9, 13 e 15, com reduções de 2417, 2474 e 4918 t/h, respectivamente, sendo que a totalidade da demanda de água da operação 13 foi suprida com corrente de reúso. As correntes que foram reusadas no maior número de operações foram as provenientes das operações 19 e 23, reusadas em 5 e 4 operações, respectivamente.

Por outro lado, devido a requisitos mais restritivos de qualidade, as operações 3, 5, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 23, 24 e 25 contaram apenas com o suprimento de água a 0 ppm, o que aponta para o potencial de estudo de regeneração de correntes nos cenários futuros, com intuito de maximizar o reúso e o reciclo de correntes nas operações siderúrgicas.

Finalmente, ao se comparar o consumo de água obtido neste primeiro cenário com o cenário base, de reúso zero, conclui-se que houve uma redução total no consumo de água fresca de 141.441 t/h para 26.037 t/h, o que representa uma redução de 81,59%. O consumo total de água nas operações foi de 36.412 t/h, sendo 26.037 t/h de água fresca e 10.374 t/h de água de reúso, o que constitui um índice de 28,49% de reúso. Outro importante indicador utilizado na fabricação de aço é o consumo específico de água, que é a razão entre o total de água utilizado e a produção de aço em um dado intervalo de tempo, usualmente expressa em m<sup>3</sup> de água por tonelada de aço produzido, ou simplesmente, m<sup>3</sup>/t. Este indicador é um

importante parâmetro para avaliar o quanto a evolução dos cenários de reúso está sendo acompanhada por uma efetiva redução no consumo de água. Para o cenário 1, considerando o consumo de 26.037 t/h para uma produção base de 5,5 Mtpa (milhões de toneladas por ano), ou 627,85 t/h, tem-se que o consumo específico é de 41,47 m<sup>3</sup>/t, consumo consideravelmente menor do que o relacionado ao cenário base, que é de 141.441 t/h de água limpa para a mesma produção de aço, ou 225,28 m<sup>3</sup> de água por tonelada de aço produzido.

A redução na geração de efluentes líquidos industriais é idêntica, visto que ainda não foi contemplada a regeneração de correntes.

Com o desenvolvimento dos próximos cenários, acredita-se que a redução percentual aumentará consideravelmente à medida em que forem consideradas as possibilidades de regeneração das correntes que atendem às operações siderúrgicas, o que permitirá também a análise da redução da geração de efluentes líquidos industriais, cuja restrição e tributação quanto ao lançamento vêm aumentando consideravelmente nos últimos anos, o que pode alterar consideravelmente os estudos de viabilidade de processos de reúso e reciclo.

Igualmente importante, a análise econômica dos cenários gerados apresenta-se como ferramenta imprescindível para os processos de tomada de decisão. Para o primeiro cenário a análise econômica considera basicamente os custos de outorga de captação de água e lançamento de efluentes, bem como os custos do tratamento de água.

Utilizando-se metodologia de análise econômica apresentada no capítulo 3 constata-se que os custos foram reduzidos de R\$ 182.951.308,55 para R\$ 33.679.085,78 por ano, referentes ao cenário base e ao cenário 1, respectivamente, o que representa uma expressiva redução de R\$ R\$ 149.272.222,76. Este valor sofrerá alterações na medida em que forem consideradas estratégias de regeneração das correntes, o que repercutirá em reduções não necessariamente proporcionais entre consumo de água e lançamento de efluentes.

Contrabalançando a tendência de incremento na redução do consumo, serão consideradas as inúmeras restrições que deverão ser consideradas para atender a realidade dos complexos processos siderúrgicos. Estas considerações serão desenvolvidas e discutidas nos cenários seguintes.

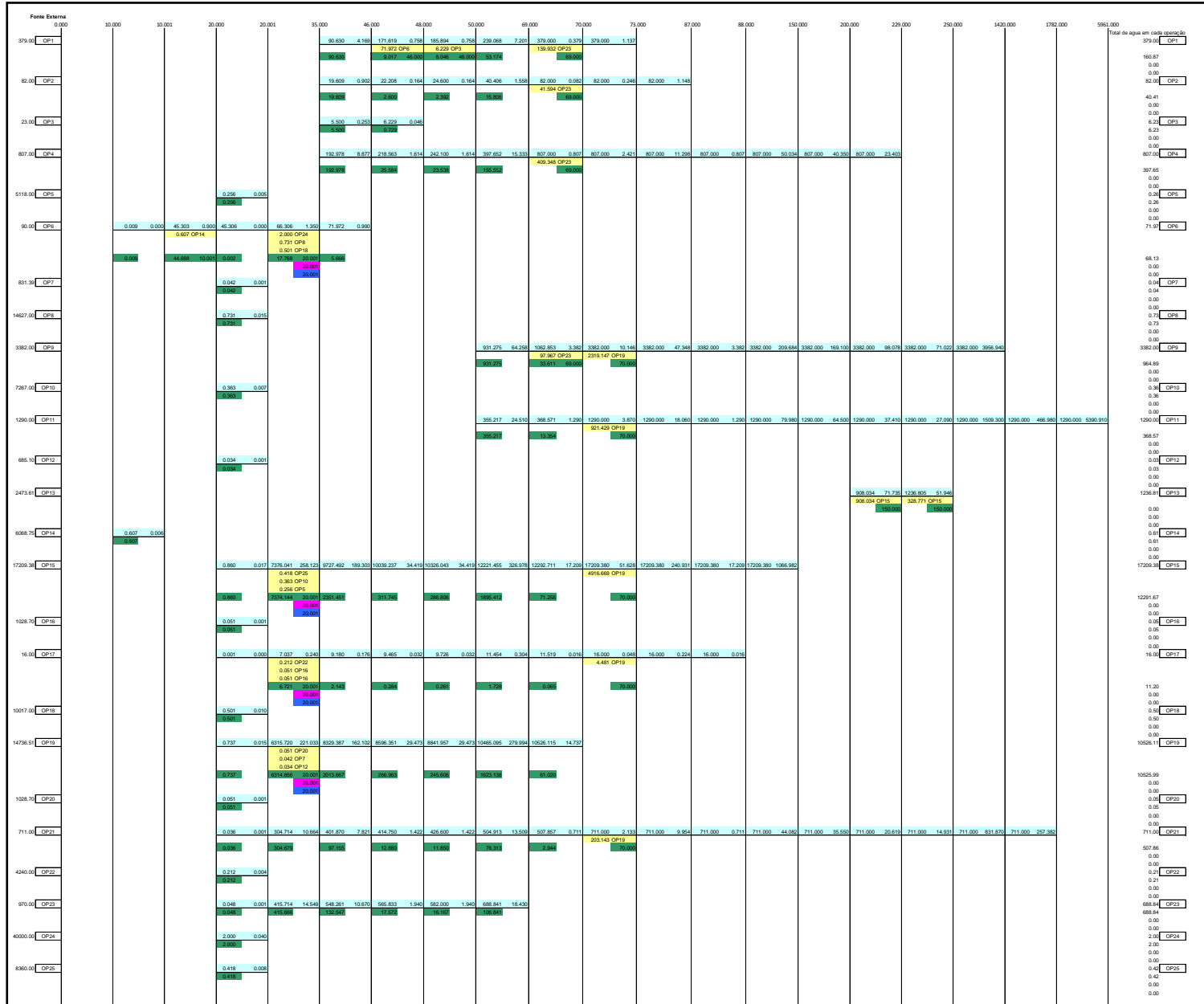


Figura 4.1 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 1.

### 4.3 Cenário 2

Uma evolução do cenário anterior é a consideração de valores mais próximos de concentração de SST em água bruta e água tratada para serem utilizados como fontes externas para alimentação das operações indicadas. Foram definidas para o desenvolvimento deste trabalho duas fontes com qualidades distintas, a saber, água bruta com concentração de SST de 25 ppm e água tratada com concentração de SST de 10 ppm. De forma a garantir o atendimento de todas as operações foi mantida, como terceira opção de fonte externa, água de excelente qualidade, com concentração de SST virtualmente nula, para eventual operação com restrição muito rígida para o consumo de água. O MINEA® distribui as fontes externas apenas no caso de não haver possibilidade de reúso e, quando assim, o faz da fonte externa mais concentrada para a fonte externa menos concentrada, de forma a aproveitar primeiro as correntes aquosas com menor qualidade, o que repercute em um menor custo também. O Diagrama de Fontes de Água para este cenário é apresentado na Figura 4.2.

Analisando-se os resultados obtidos, observa-se que houve reúso em 22 das 25 operações, o que representa uma evolução em relação ao cenário anterior, mesmo havendo maior restrição em relação à qualidade da água consumida nas operações. Dentre estas correntes destacam-se as operações 9, 13 e 15, com reduções de 1.895, 2.474 e 5.737 t/h. Ressalta-se também um aumento no número de operações que foram mantidas se utilizado apenas água proveniente de outras operações, como por exemplo, as operações 5, 7, 8, 10, 12, 13, 16, 18, 20, 22, 24, 25. Ainda assim, três operações necessitaram manter o consumo de água fresca, seja bruta, como a operação 3, ou tratada, como as operações 6 e 14.

A operação 14 se destacou por possibilitar o reúso em 16 operações. As operações 15, 19 e 23 foram as que reusaram um maior número de correntes aquosas provenientes de outras operações, tendo reusado água proveniente de 4, 3 e 4 operações, respectivamente.

A análise do Diagrama de Fontes de Água revela também que houve redução no consumo de água limpa de 141.441 t/h para 36.732 t/h, o que representa uma redução de 74,03%. Procedendo a análise do ponto de vista da geração de efluentes líquidos industriais, observa-se uma redução igual à redução no consumo de água, visto que não foram consideradas no desenvolvimento deste cenário a

ocorrência de perdas e o tratamento de efluentes líquidos industriais, o que compromete a viabilidade ambiental desta configuração. O volume de correntes aquosas reusadas foi de 10.268 t/h, frente a um consumo total de 47.001 t/h, o que representa 27,95% de reúso.

O consumo específico, considerando uma produção base de 5,5 Mtpa, foi de 58,51 m<sup>3</sup>/t, um valor bem menor do que o associado ao cenário base, que é de 225,28 m<sup>3</sup>/t. Entretanto, quando comparado ao cenário 1, que teve um consumo 41,47 m<sup>3</sup>/t, este valor é 29,12% maior. Este resultado mostra que a consideração da qualidade da água ofertada em estudos de reúso não pode ser desprezada. Embora o valor *default* do MINEA® considere fonte a 0 ppm, os valores reais de concentração de contaminantes na água disponível devem ser considerados para se evitarem desvios entre os resultados apontados pelo estudo e a realidade dos processos estudados.

Este cenário apresenta um custo operacional anual de R\$ 47.719.276,15, valor consideravelmente superior ao custo de R\$ 33.679.085,78 registrado no cenário anterior, o que ratifica a necessidade de se considerar valores mais realistas para qualidade de água, ao contrário do valor oferecido inicialmente pelo MINEA®, de forma a não ocasionar desvios significativos na simulação realizada.

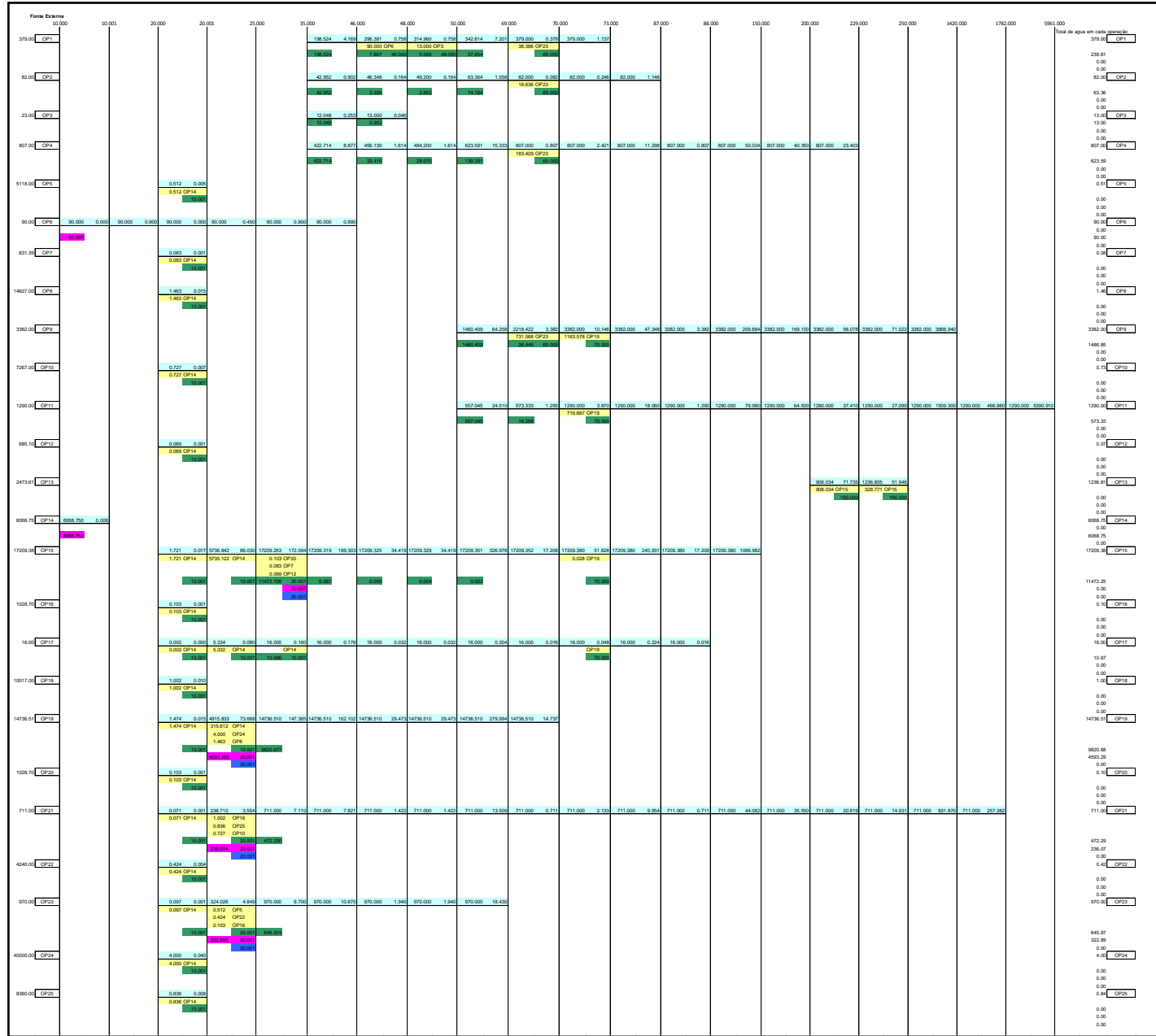


Figura 4.2 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 2.

#### 4.4 Cenário 3

De forma a representar um cenário mais realista, que leve em conta as grandes demandas de trocas térmicas associadas ao resfriamento de equipamentos utilizados na siderurgia, foi considerada a inclusão de torres de resfriamento, de forma a garantir o resfriamento necessário para a reutilização das correntes aquosas em outras operações.

Desta forma, foram introduzidas perdas provocadas por evaporação, respingos e purgas nas torres de resfriamento. Os valores destas perdas foram obtidos a partir de medições realizadas em usina siderúrgica. Contudo, como esta medição não contemplou todas as operações de interesse, houve a necessidade de se estimar as perdas das demais operações. As perdas por evaporação foram calculadas utilizando-se a equação (4.1), que considera que as perdas por evaporação são proporcionais à vazão e às diferenças de temperatura entre as correntes de entrada e saída de uma determinada operação (MACEDO, 2007).

$$P = 0,00186 * Q * \Delta T \quad (4.1)$$

Onde:

P: perdas por evaporação

Q: vazão de recirculação

$\Delta T$ : diferença de temperatura entre as correntes de entrada e saída

Como resultado da aplicação do algoritmo obteve-se a redução do consumo de água fresca de 141.441 t/h, referente ao cenário base, para 37.129 t/h, o que representa uma redução de 73,75% (Figura 4.3). O total de água consumido pelas operações foi de 47.001 t/h, sendo 37.129 t/h de água fresca e 9.872 t/h de água de reúso, o que representa 21,00% de reúso em relação ao consumo de água total para atender as 25 operações siderúrgicas.

Um resultado novo trazido na elaboração deste cenário trata das perdas por evaporação envolvidas nas torres de resfriamento utilizadas nas operações de resfriamento por contato indireto. No total, 4.427 t/h foram perdidos para adequação das temperaturas das correntes para descarte no corpo receptor. No Rio de Janeiro, por exemplo, o limite de temperatura para descarte de efluentes líquidos é de 40°C,



conforme estabelecido na Norma Técnica NT-202.R10 (FEEMA, 1986). A vazão de perdas neste processo representa aproximadamente 12% da captação de água. Este resultado indica que as perdas por evaporação nas operações siderúrgicas são representativas e que não devem ser deixadas de lado na elaboração de cenários de reúso.

Quanto aos efluentes líquidos gerados, percebe-se que a redução na geração diminuiu de 141.441 t/h, referente ao cenário base, para 32.702 t/h, o que representa uma redução de 76,88%. Diferentemente dos outros cenários apresentados, a redução da geração de efluentes líquidos industriais deixa de ser equivalente a redução do consumo de água. Isto ocorre devido às perdas de processo, pois o quantitativo perdido por evaporação deixa de somar com o total de efluente gerado.

Quanto ao consumo específico de água, nota-se uma redução de 225,28 m<sup>3</sup>/t, calculados para o cenário base, para 59,14 m<sup>3</sup>/t. Novamente, percebe-se que a desconsideração das perdas por evaporação pode resultar em distorções nos resultados encontrados. Quando comparado com o consumo registrado no cenário 1, com consumo específico de 41,47 m<sup>3</sup>/t, que não considerou propositalmente a ocorrência de perdas, obtém-se um resultado 29,88% maior, o que ressalta a importância da consideração deste aspecto para o desenvolvimento de cenários de reúso mais realistas.

A avaliação econômica deste cenário revela um custo operacional anual de R\$ 48.239.168,34, sendo formado pelas seguintes parcelas: R\$ 8.982.259,19 e R\$ 39.256.909,16 referentes à outorga e ao tratamento de água, respectivamente.

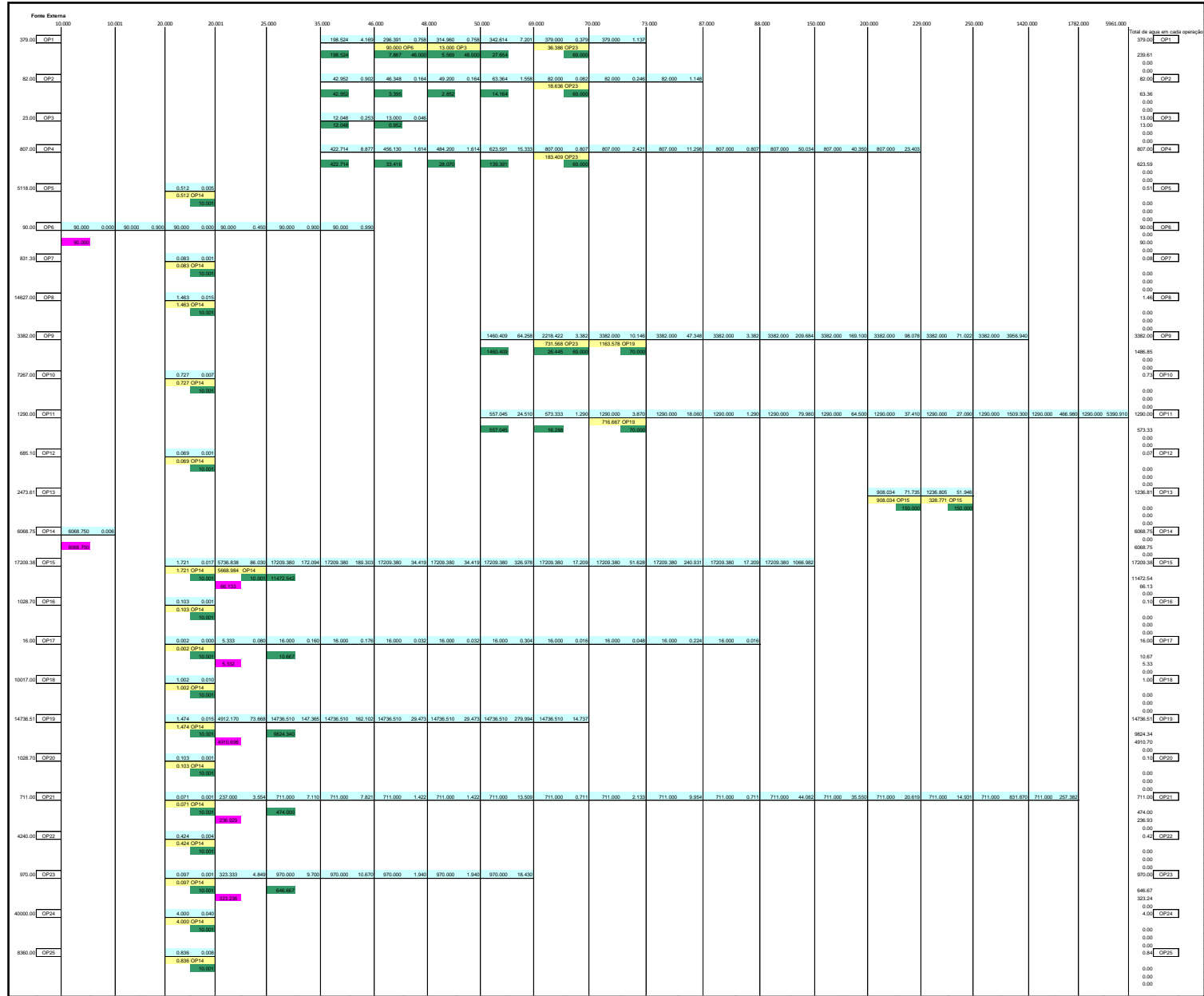


Figura 4.3 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 3.

#### 4.5 Cenário 4

Utilizando-se a experiência obtida no desenvolvimento dos cenários anteriores, será desenvolvida a partir deste ponto uma série de modificações nas correntes de processo e de resfriamento por contato direto, de forma a considerar cenários mais realistas de reúso e reciclo, com e sem regeneração. A caracterização das correntes, bem como as principais possibilidades de regeneração, foi abordada no capítulo 2.

A ordem das modificações propostas seguirá o fluxo do processo siderúrgico, de forma a tornar mais didática e simples a evolução dos cenários que serão desenvolvidos, além de possibilitar uma análise posterior da importância de cada operação para a elaboração de um cenário otimizado de reúso.

Em consonância com esta proposta, deixam de constar como dados de entrada para desenvolvimento do DFA todas as correntes de resfriamento por contato indireto, às quais se aplicarão a consideração de circuito semiaberto de recirculação empregando-se torres de resfriamento. A utilização desta estratégia deve-se à limitação do programa MINEA® ao processamento de, no máximo, 25 operações simultaneamente. Entretanto, a vazão de reposição destas correntes (*makeup*), necessária devido à ocorrência de purgas (*blowdown*) e perdas por evaporação e respingos, assim como os custos da operação das torres de resfriamento, continuará a ser contabilizada no desenvolvimento dos cenários.

Foram mantidas as correntes das operações 1, 2, 3, 4, 6, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 e 23, que foram rearranjadas da maneira apresentada na Tabela 4.2. Objetivando tornar mais claro o acompanhamento da evolução dos cenários, optou-se por não renumerar as operações. As novas operações associadas a regenerações de correntes seguirá numeração seqüencial a partir da última operação (Operação 25).

Tabela 4.2 – Dados de processo de operações consumidoras de água em siderurgia.

Etapas	Operação	Vazão operacional (t/h)	Perdas de vazão (t/h)	Concentração de entrada máxima (ppm)	Concentração de saída máxima (ppm)	Carga mássica ( $\Delta m$ ) (g/h)	
Preparação de cargas	1	Pátio de estocagem de matérias primas	379	0	35	73	14.402
	2	Pátio de estocagem de carvão	82	0	35	87	4.264
	3	Calcinação	23	0	35	48	299
	4	Coqueificação	807	161	35	229	156.558
	6	Carboquímico - resfriamento por contato direto	90	0	10	46	3.240
Redução (Altos Fornos)	9	Resfriamento de gases (contato direto)	3382	353	50	1420	4.633.340
Conversão e Refino (Aciaria)	11	Conversão - Resfriamento de gases por contato direto	1290	0	50	5961	7.625.190
	13	Refino - Resfriamento de gases por contato direto	2474	74	200	250	123.681
Lingotamento Contínuo	15	Resfriamento com sprays - contato direto	17209	729	20	150	2.237.219
Laminação e Acabamento	17	Decapagem - operações com contato direto	16	0	20	88	1.088
	19	Laminação a Quente - Resfriamento por contato direto	14737	302	20	70	736.826
	21	Laminação a Frio com contato direto	711	0	20	1782	1.252.782
	23	Acabamento – operações com contato direto	970	31	20	69	47.530

Como visto anteriormente, será considerado reciclo das correntes de resfriamento por contato indireto para própria operação geradora de cada corrente,

considerando as perdas ocorridas nas torres de resfriamento, bem como os ciclos de concentração recomendados para cada operação. Com o fechamento dos circuitos de resfriamento por contato indireto, surge um conjunto de correntes que apresentam um potencial para reúso e que serão consideradas no desenvolvimento deste cenário: as correntes de purgas provenientes das torres de resfriamento (*blowdown*).

A avaliação da importância da consideração de purgas se faz importante tanto pela identificação da sua relevância nos estudos de reutilização, na identificação de oportunidades de reúso em operações que requeiram correntes com menor qualidade, ou quando na impossibilidade deste, para a contabilização no inventário de efluentes da planta.

Os cálculos das concentrações da corrente de purga, vazão da corrente de purga e vazão das correntes de reposição foram realizados utilizando-se as equações (4.2), (4.3) e (4.4) (SANTOS *et al.*, 2006):

$$C_{purga} = \text{eficiencia} * \text{Ciclo de concentração} * C_{reposição} + \Delta C \quad (4.2)$$

Onde:

$C_{purga}$ : Concentração de purga desejada;

eficiencia: Eficiência do ciclo de concentração, que indica o quanto o ciclo de concentração irá sujar aquele componente e varia de 0 a 1;

Ciclo de concentração: relação entre a qualidade de água de purga e a qualidade da água de reposição;

$C_{reposição}$ : Concentração de reposição desejada;

$\Delta C$ : parâmetro que indica o quanto àquele componente vai se sujar além do ciclo de concentração (ppm).

$$Purga = \frac{(Perda * (1 - \text{ciclo de cocentração} * K_{silica}))}{(\text{ciclo de cocentração} - 1)} \quad (4.3)$$

Onde:

Purga: vazão da corrente de purga;

Perda: vazão da corrente perdida por evaporação e por respingos;

$K_{silica}$ : Constante de distribuição da Sílica.

$$\text{Reposição} = \text{Perda} + \text{Purga} \quad (4.4)$$

A parcela de perdas, como visto, é composta de uma contribuição das perdas por evaporação, que podem ser medidas em campo ou calculadas de acordo com as equações apresentadas no desenvolvimento do Cenário 3, e por uma contribuição das perdas por respingos, que podem ser calculadas como sendo um valor médio do intervalo referenciado na literatura que varia entre 0,01 e 0,3% sobre a vazão de recirculação para torres de tiragem mecânica (MANCUSO, 2002 *apud* MACEDO, 2007).

Este cenário será desenvolvido utilizando-se dados reais ou quando da ausência destes calculando-se a vazão de reposição das correntes utilizadas para o resfriamento por contato indireto. O resultado global é o somatório das correntes de perdas, sejam as correntes de purgas realizadas nas torres de resfriamento ou as perdas por evaporação e por respingos.

Na Tabela 4.3 são apresentadas as correntes utilizadas para resfriamento por contato indireto para cada operação descrita, os valores de ciclo de concentração referenciados para cada operação e as correntes de perda por evaporação, purga e reposição, calculadas a partir das equações (4.2), (4.3), (4.4), respectivamente.

Tabela 4.3 – Tabela resumo com os valores recomendados para ciclo de concentração e os valores registrados para perdas por evaporação, respingos e purgas.

Operação	Descrição	Ciclo de concentração	Perda (evaporação)	Perda (respingos)	Purga ( <i>blowdown</i> )	Reposição ( <i>make-up</i> )
5	Carboquímico	2,5	218,92	7,93	143,12	369,97
7	Sinterização	1,5	9,28	1,29	18,34	28,91
8	Redução	2,1	344,00			344,00
10	Conversão	1,6	487,00	11,26	801,60	1299,87
12	Refino	1,4	5,00	1,06	12,36	18,43
14	Lingotamento Contínuo	1,4	108,75	9,41	268,93	387,08
16	Decapagem	1,5	28,70	1,59	56,73	87,03
18	Laminação a quente	1,6	571,00			571,00
20	Laminação a	1,5	28,70	1,59	56,73	87,03

	frio				
22	Acabamento	1,6	240,00		240,00
24	Termelétrica	2,5	576,00		576,00
25	Unidade de Separação de Gases	2,5	418,00		418,00
Total		-	-	-	4.427,31

Aplicando-se o algoritmo DFA para as demais correntes de processo ou de resfriamento por contato direto, obtém-se o diagrama apresentado na Figura 4.4. A análise do diagrama obtido mostra que houve redução do consumo de água de 141.441 t/h (cenário base) para 41.801 t/h, sendo 4.427 t/h relacionados ao consumo das unidades de resfriamento por contato indireto por correntes de reposição e 37.373 t/h relacionados ao consumo das demais operações. Isto representa uma redução de consumo de 70,45%. Do total da corrente de reposição, 2.007 t/h representam as perdas por evaporação e respingos, enquanto 2.420 t/h constituem a corrente de purga do processo, que para o desenvolvimento deste cenário será considerada como fonte externa, visando à identificação de possibilidade de reúso deste conjunto de correntes.

Neste momento, faz-se importante analisar a redução de consumo referente à utilização de circuito semiaberto de recirculação utilizando-se reciclo de correntes de resfriamento por contato indireto e torres de resfriamento. Enquanto o cenário base indica a necessidade de captação de 99.272 t/h (contribuição calculada como somatório das correntes de resfriamento por contato indireto da tabela de correntes apresentada no cenário 1), a demanda de água fresca utilizando-se a estratégia de reciclo com torres de resfriamento é de apenas 4.427 t/h, o que representa uma redução de 95,54% para correntes aquosas com este propósito. A limitação em se alcançar um percentual de redução ainda maior está intrinsecamente ligado às perdas que ocorrem nas torres de resfriamento, em especial pela necessidade de se realizar purgas, para manter o ciclo de concentração em valores indicados pelos fabricantes de equipamentos para cada operação, e também devido a perdas por evaporação, que está relacionada ao gradiente de temperatura apresentado por cada corrente aquosa, e por respingos, que estão associados à operação de torres de resfriamento com tiragem mecânica.

Ressalta-se, por oportuno, que embora não se esteja considerando a captação do montante original, referente ao cenário base, não se deve olvidar que este quantitativo deve receber tratamento apropriado nas torres de resfriamento para viabilizar a recirculação das correntes de resfriamento por contato indireto. Como os custos associados a este tratamento são bastante superiores aos demais custos analisados no presente estudo, da ordem de quatro vezes ou mais em relação aos custos de outorga e tratamento de água e efluentes, e por se tratar de parcela comum a todos os cenários doravante desenvolvidos, optou-se por não se computar tais custos na análise econômica, para tornar mais fácil a análise comparativa entre os cenários. Além disso, considerando a inviabilidade ambiental do lançamento do montante original relacionado às operações de resfriamento por contato indireto e que as necessidades de resfriamento dos equipamentos apresentam-se imperativamente como um controle de processo, entende-se que os custos advindos da operação de resfriamento devem estar a este associado.

Prosseguindo-se à análise do Diagrama de Fontes de Água obtido para este cenário, pode-se observar que houve um decréscimo considerável da parcela disponível para reúso para 3.559 t/h, o que representa apenas 8,70% de reúso considerando o consumo total de água nas operações. Tal acontecimento é explicado pelo fechamento do circuito de resfriamento por contato indireto e na consequente indisponibilidade de determinadas correntes para o reúso nas demais operações. Esta ocorrência reflete diretamente no consumo específico de água que aumentou para 66,58 m<sup>3</sup>/t, que embora seja significativamente menor que o apresentado pelo cenário base, que é de 225,28 m<sup>3</sup>/t, representa um valor consideravelmente maior do que os apresentados nos outros cenários.

Em relação à geração de efluentes líquidos industriais, a vazão total foi de 39.794 t/h, o que representa uma redução de 71,87% em relação ao cenário base. Descontou-se do cálculo de efluentes a parcela perdida por evaporação e respingos nas operações de contato indireto.

Finalmente, procedendo-se a análise econômica deste cenário constata-se que o custo operacional anual foi de R\$ 47.057.319,12, valor reduzido em relação ao cenário anterior, principalmente pela redução da captação, e consequente diminuição dos custos de outorga.



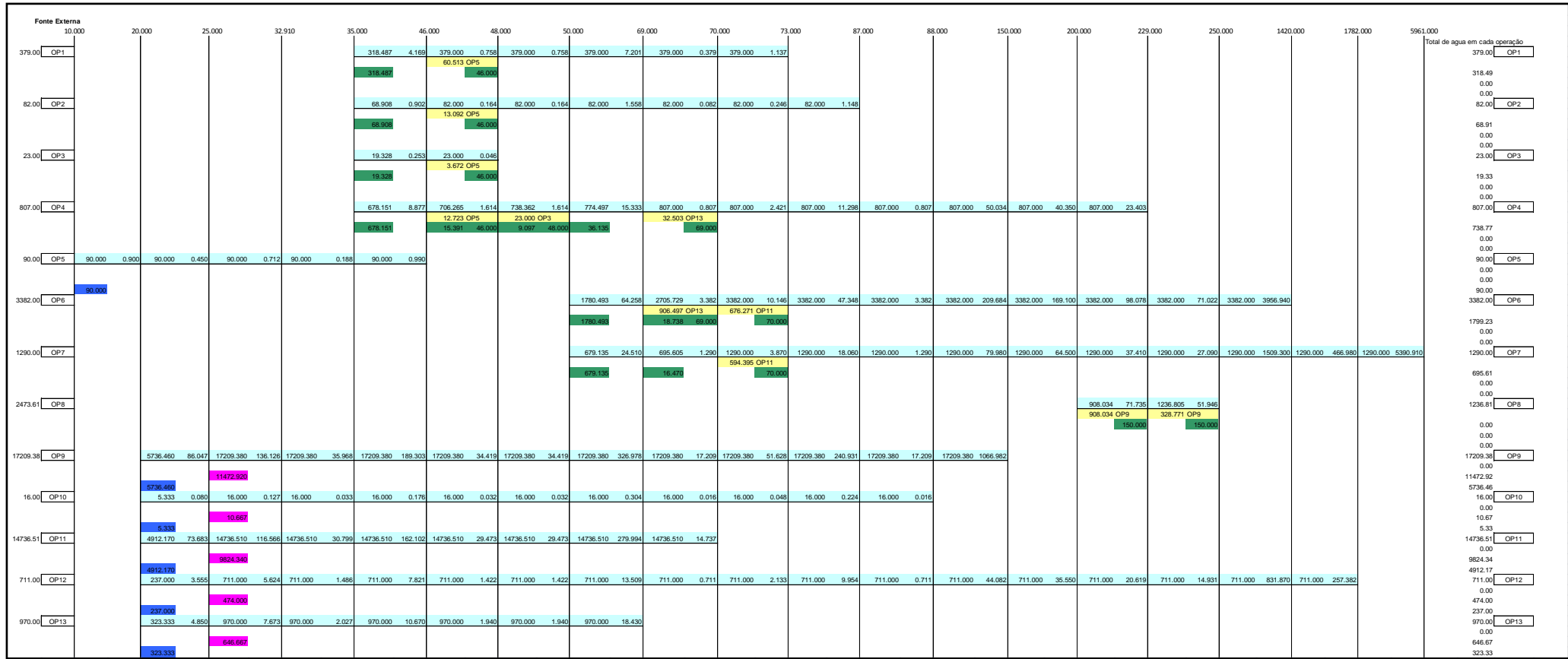


Figura 4.4 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 4.

#### 4.6 Cenário 5

Uma importante restrição técnica do MINEA® é que o mesmo não limita a disponibilidade de uma fonte externa à quantidade existente, isto é, o programa opera como se houvesse disponibilidade infinita de água proveniente da purga das torres de resfriamento. Além disso, do ponto de vista técnico, embora as purgas das torres de resfriamento se apresentem com grande potencial para reúso, se faz recomendável a realização prévia de estudos de tratabilidade e adequabilidade do reúso desta fonte em operações industriais, de forma a considerar às retrições apresentadas pelas torres de resfriamento quanto à qualidade da água de reposição necessária para manutenção de uma operação adequada de tais equipamentos. Por estes motivos, a partir do presente cenário tais correntes não serão mais caracterizadas como fontes externas e sim como efluentes de processo.

Considerando os resultados obtidos com aplicação do algoritmo DFA, utilizando a planilha de cálculos MINEA® (Figura 4.5), constata-se uma redução no consumo de água fresca de 141.441 t/h para 41.161 t/h, o que representa uma redução de 70,90%. Foram reusadas cinco correntes, que somaram 4.189 t/h, ou 10,24% em relação ao total de água fresca demandado para as operações de contato direto. O consumo específico ficou aproximadamente estável em 66,56 m<sup>3</sup>/t, enquanto a geração de efluentes líquidos foi de 39.154 t/h, que representa 72,32% de redução em relação ao cenário base.

O custo operacional anual deste cenário é de R\$ 53.528.499,93, sendo R\$ 9.957.583,83 referentes aos custos de outorga e R\$ 43.570.916,09 relativos ao tratamento de água.

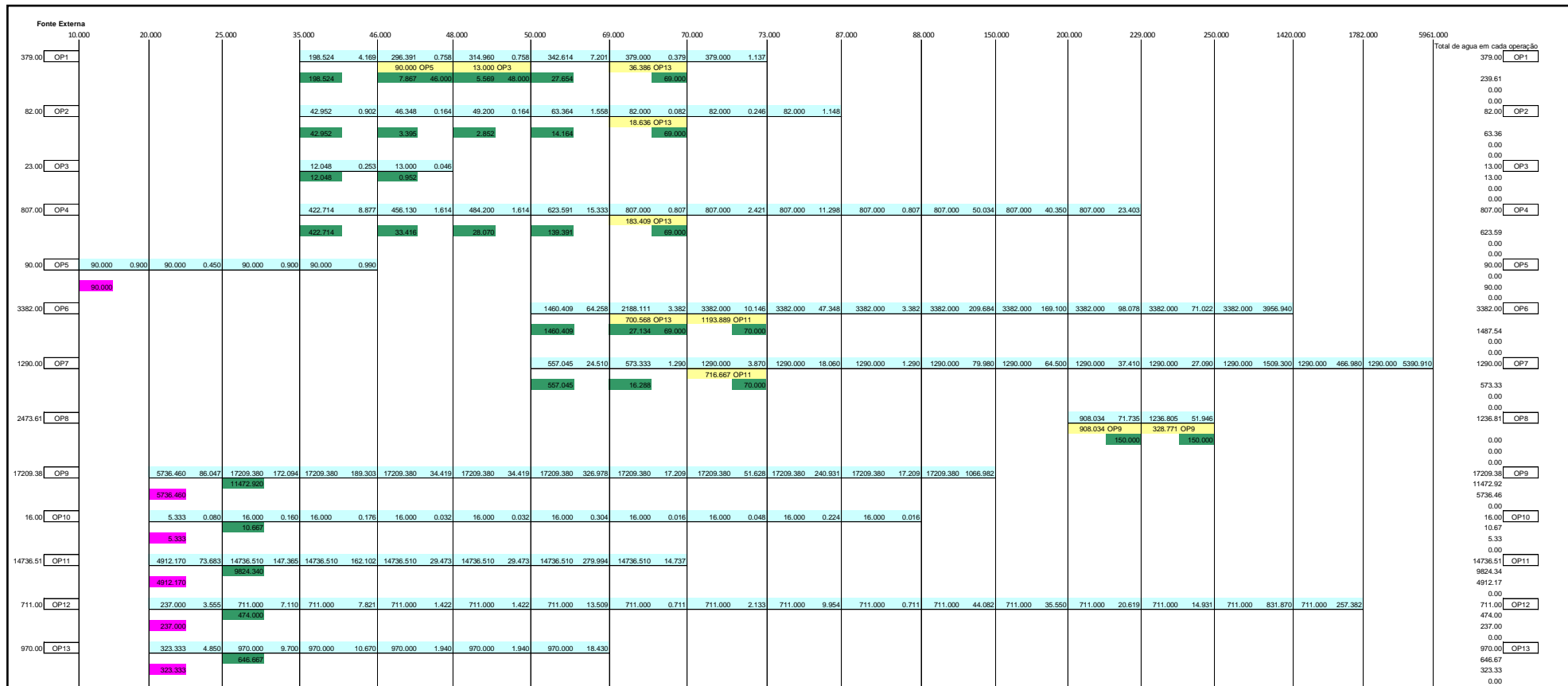


Figura 4.5 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 5.

#### 4.7 Cenário 6

A partir do desenvolvimento deste cenário será considerada uma evolução nos cenários caracterizada pela regeneração de correntes visando aumentar a quantidade e qualidade das correntes reusadas. Esta estratégia parte das condições estabelecidas no cenário anterior, que considerou as correntes de resfriamento por contato indireto na análise, sem, no entanto inclui-las no Diagrama de Fontes de Água. Seguindo o fluxo dos processos siderúrgicos, procedeu-se a escolha da operação siderúrgica de interesse, neste caso os pátios de armazenamento de matérias primas, representado nesta dissertação pela operação 1. Conforme metodologia definida anteriormente, as unidades de tratamento de efluentes serão numeradas sequencialmente ao conjunto de operações iniciais, ou seja, a operação de regeneração da operação 1 será representada com fins de cálculo no MINEA® como sendo a operação 26, e assim sucessivamente, até se esgotarem as possibilidades de regeneração e reúso, para que finalmente possam ser identificados os cenários mais adequados tanto técnica quanto economicamente para as operações siderúrgicas.

De acordo com as informações relatadas no capítulo 2, a operação do pátio de matérias primas demanda uma corrente de 379 t/h e apresenta concentrações limite de entrada e saída de 35 e 73 mg/L, respectivamente, o que representa uma carga mássica de 14.402 g/h. Além disso, pode se assumir ausência de perdas consideráveis para as operações de armazenamento de matérias primas, quando comparado a outras operações em que a necessidade de troca térmica demanda a instalação de torres de resfriamento. A regeneração desta corrente, de acordo com dados obtidos de uma usina siderúrgica, permite a redução da concentração de sólidos em suspensão totais para 22 mg/L, o que sinaliza um potencial de reúso nas demais operações siderúrgicas.

Caracterizando a operação de regeneração junto ao MINEA® e procedendo ao desenvolvimento do Diagrama de Fontes de Água, obtém-se como resultado a redução no consumo total de água de 141.441 t/h (cenário base) para 40.782 t/h, sendo 36.354 t/h referentes às operações com contato direto e 4.427 t/h relacionados à reposição das operações de resfriamento por contato indireto (Figura 4.6). Esta redução significa um decréscimo de 71,17% no consumo de água. Quanto as correntes de reúso, obteve-se um aumento, em relação ao cenário anterior para

4.568 t/h, que representa 11,16%, em termos percentuais. O consumo específico foi de 64,95 m<sup>3</sup>/t, valor este consideravelmente inferior ao associado ao consumo no cenário base (225,28 m<sup>3</sup>/t), contudo que apresenta grande potencial para diminuição, o que poderá ser alcançado com a regeneração de mais correntes. A geração de efluentes líquidos industriais foi de 38.775 t/h, que representa uma redução de 72,59% em relação ao cenário base.

Finalmente, considerando a análise econômica para este cenário, observa-se que os custos associados à outorga foram de R\$ 9.865.896,15, enquanto os custos operacionais com tratamento de água e de efluentes foram de R\$ 43.169.990,36 e R\$ 366.812,28, respectivamente. Este baixo custo associado ao tratamento de efluentes é justificado pela baixa vazão de tratamento, o que tende a mudar com os próximos cenários, na medida em que novas correntes são regeneradas.

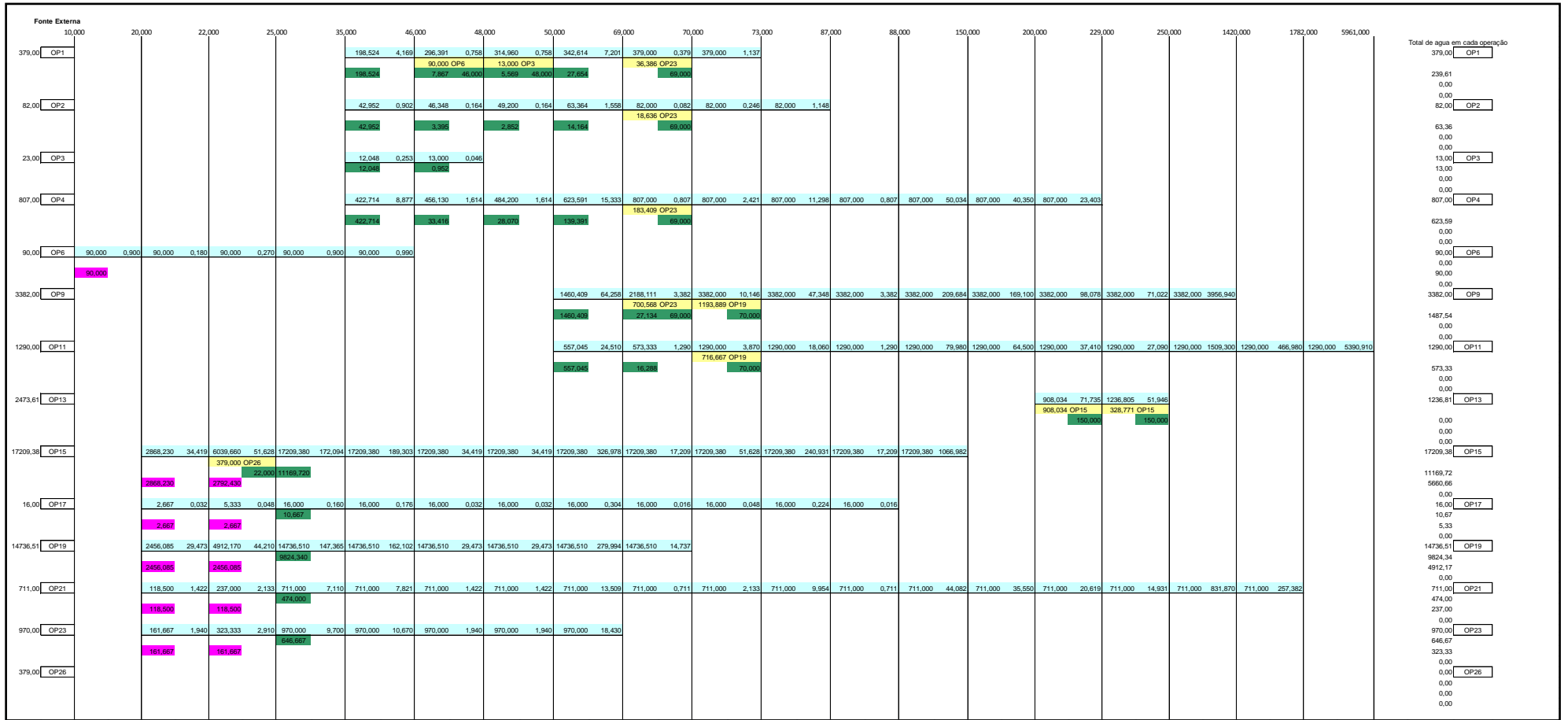


Figura 4.6 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 6.

#### 4.8 Cenário 7

Dando prosseguimento ao desenvolvimento de cenários será considerada a regeneração dos efluentes líquidos gerados nos pátios de carvão e coque, representados pela operação 2, complementarmente à regeneração dos efluentes líquidos gerados nos pátios de armazenamentos de matérias primas representada no cenário anterior.

A operação dos pátios de carvão e coque é caracterizada pela necessidade de vazão de 82 t/h e concentrações limite de entrada e saída de 35 e 87 mg/L, respectivamente, o que representa uma carga mássica de 4.264 g/h. A análise dos resultados de tratamento de efluentes indica a possibilidade de regeneração destes efluentes reduzindo a concentração de sólidos em suspensão totais para 22 mg/L. De posse destas informações foi acrescentada ao MINEA® a operação 27, seguindo a sistemática de organização de cenários apresentada anteriormente.

Os resultados, indicados na Figura 4.7, indicam que a redução no consumo de água não apresentou grandes alterações, com uma redução de 141.441 t/h para 40.700 t/h, dos quais 36.272 t/h representam o consumo das operações de contato direto e 4.427 t/h representam o consumo das correntes de reposição das torres de resfriamento do circuito de resfriamento por contato indireto. Foram utilizadas 7 correntes de reúso que totalizaram uma vazão de 4.650 t/h, que representa apenas 11,36% de reúso em relação ao consumo total de água, seja bruta ou tratada, nas operações com contato direto. O consumo específico também se manteve aproximadamente constante em 64,82 m<sup>3</sup>/t, assim como a geração de efluentes, que foi de 38.693 t/h.

Os resultados encontrados indicam que embora a corrente apresente uma boa qualidade para reúso a baixa vazão a ela associada limitou uma redução mais significativa no consumo de água.

No que tange à análise econômica, tem-se que este cenário apresenta um custo operacional associado de R\$ 53.370.802,53, sendo a maior contribuição referente ao tratamento de água, com R\$ 43.083.164,01, seguido do custo com outorga, de R\$ 9.841.463,17, e pelo custo do tratamento de efluentes, de R\$ 446.175,36.

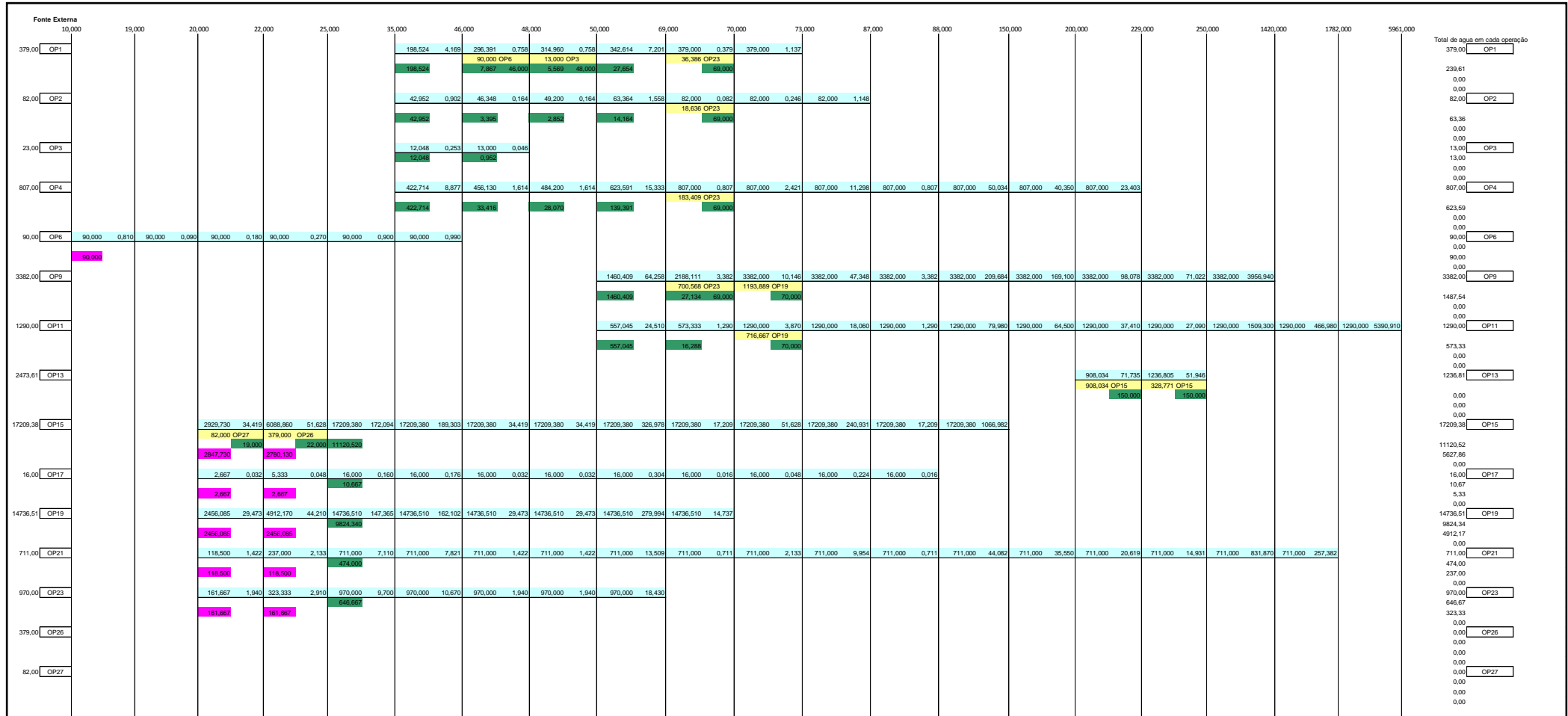


Figura 4.7 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 7.



#### 4.9 Cenário 8

Continuando a desenvolver a estratégia inicial seguiu-se a análise de regeneração dos efluentes líquidos gerados na operação 3, complementarmente à regeneração de efluentes das operações 1 e 2.

A operação 3 representa a operação de calcinação, importante etapa para o fornecimento de matérias primas para as operações siderúrgicas. Esta operação demanda a utilização de 23 t/h de água, sendo as concentrações limite de entrada e saída iguais a 35 e 48 mg/L. A baixa vazão operacional associada à pequena variação na concentração de sólidos em suspensão totais repercute em uma carga mássica consideravelmente baixa, de 299 g/h. O tratamento realizado não promove reduções consideráveis na concentração do parâmetro SST, apresentando o efluente final tratado 38 mg/L, o que pode comprometer a viabilidade da utilização desta corrente para reuso.

Desenvolvendo o Diagrama de Fontes de Água (Figura 4.8) obteve-se redução no consumo total de água de 141.441 t/h para 40.697 t/h, que embora represente uma significativa redução em relação ao cenário base (71,23%) não o faz na mesma proporção em relação ao cenário anterior (0,01%). Das treze operações, 7 utilizaram água de reuso, totalizando 4.653 t/h, enquanto 6 utilizaram apenas água fresca bruta (SST = 25 ppm) ou tratada (SST = 10 ppm), totalizando 36.269 t/h. O consumo específico associado a este cenário é de 64,82 m<sup>3</sup>/t e a redução na geração de efluentes líquidos manteve-se aproximadamente constante em 72,65%

Os custos de operação associados a este cenário são: R\$ 9.840.547,85 referentes à outorga, R\$ 43.080.126,17 associados ao tratamento de água e R\$ 458.757,31 relacionados ao tratamento de efluentes líquidos, totalizando R\$ 53.379.431,33.

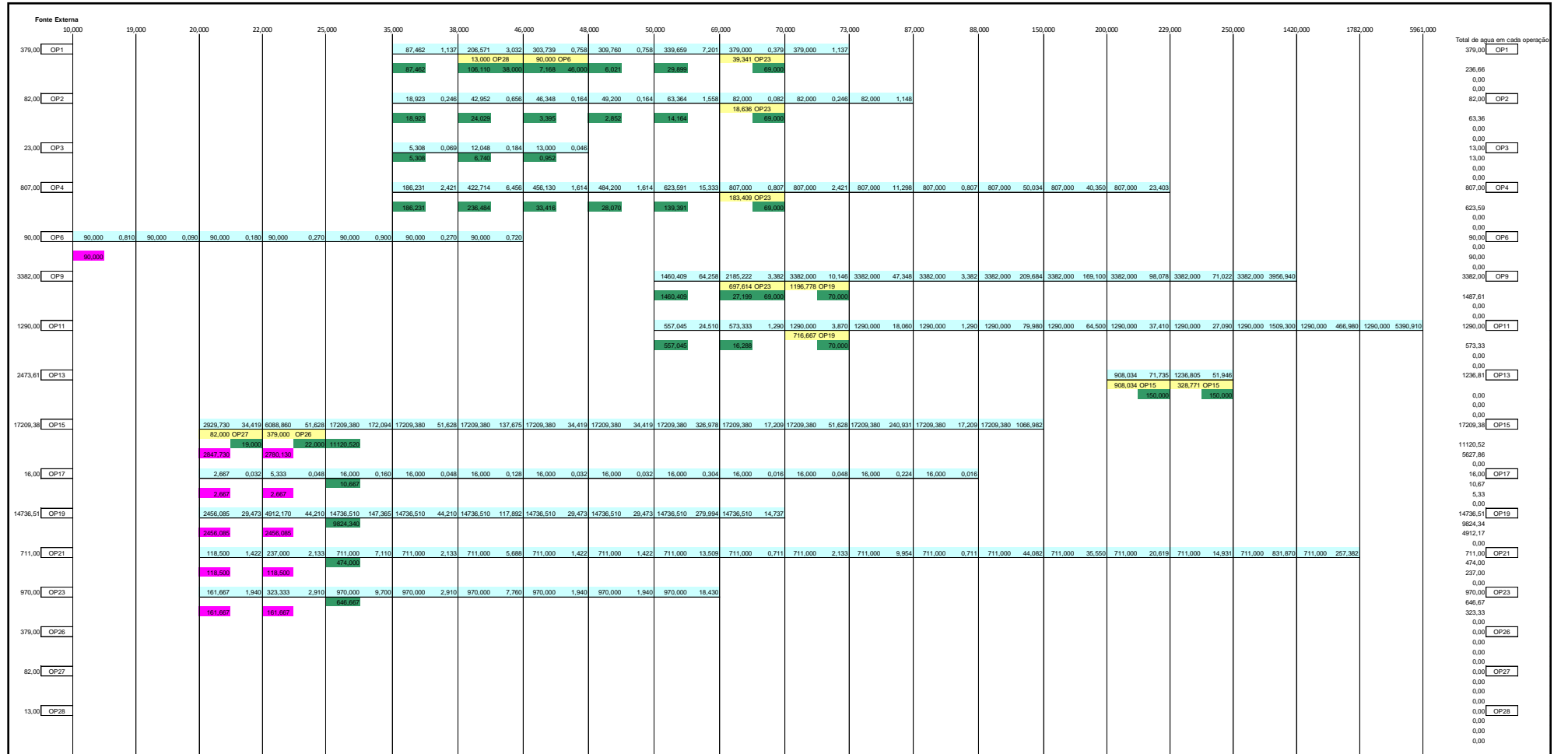


Figura 4.8 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 8.

#### 4.10 Cenário 9

Este cenário contempla uma evolução do cenário 8, modificando o sistema de tratamento de efluentes caracterizado por decantação e neutralização por um sistema de tratamento físico-químico, que apresenta melhor desempenho. Desta forma, os efluentes da calcinação podem ter a concentração de sólidos em suspensão totais reduzidos para 14,4 mg/L. Esta modificação foi considerada na operação 28, que é a operação de regeneração da operação 3.

O Diagrama de Fontes de Água para este cenário, apresentado na Figura 4.9, revela que houve redução no consumo de água de 141.441 t/h para 40.693 t/h, o que representa uma redução de 71,23%, equivalente ao registrado no cenário 8. Desta forma, entende-se que a redução na concentração de sólidos em suspensão totais neste caso não representa melhoria significativa nas condições de reúso. Na mesma tendência o total reusado foi 4.657 t/h enquanto no cenário 8 foi de 4.653 t/h, um acréscimo de apenas 0,09%. O percentual de reúso comparado com o cenário base foi de 11,38%, valor ainda consideravelmente baixo. O consumo específico foi 64,81 m<sup>3</sup>/t e a geração de efluentes líquidos industriais foi de 38.686 t/h, 72,65% menor do que o gerado no cenário base, contudo com potencial para ser maior.

A avaliação econômica indica custos operacionais anuais de R\$ 53.374.442,81, valor muito próximo ao encontrado no cenário 8.

Embora a avaliação técnica e econômica tenha demonstrado que a melhoria proporcionada pela regeneração desta corrente não tenha sido acompanhada de um melhor cenário de reúso, optou-se por manter esta operação como garantia de enquadramento de outros contaminantes cuja remoção com a regeneração proposta no cenário 8 seria insuficiente. Em outras palavras, optou-se por ser mais restritivo em relação à qualidade final desta corrente, pois desta maneira se garante o tratamento adequado não apenas do parâmetro SST, que é o mais importante parâmetro global de estudo para esta tipologia industrial, como também para outros contaminantes que se fizerem presentes. Esta é uma situação específica para as correntes de calcinação, abordada neste cenário, e coqueificação, que será abordada no próximo. As demais unidades já serão contempladas com as tecnologias de tratamento usualmente utilizadas e que garantem o enquadramento dos efluentes líquidos gerados, tanto para o parâmetro SST quanto para os demais.

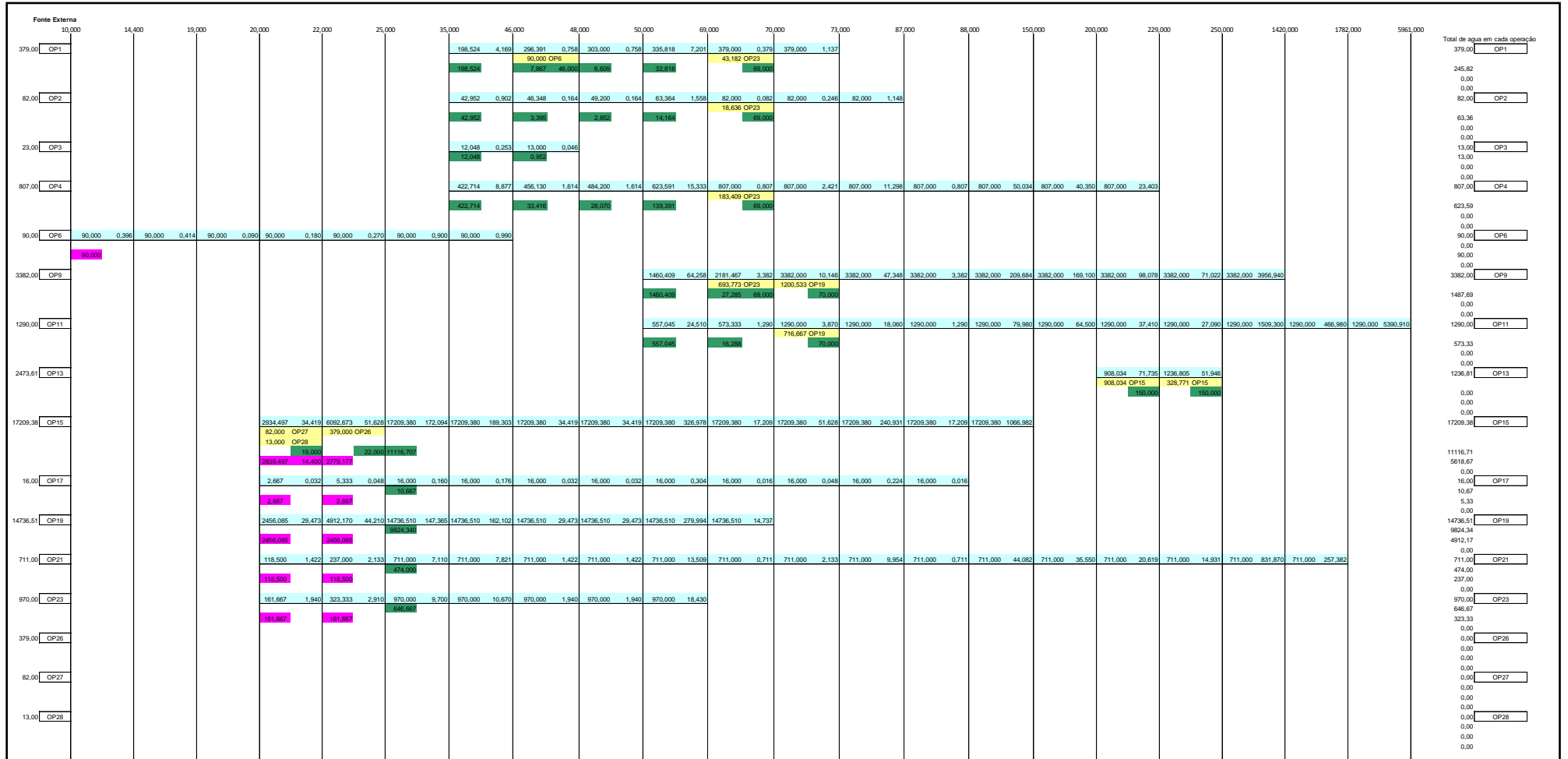


Figura 4.9 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 9.

#### 4.11 Cenário 10

Este cenário considera regeneração e reúso da corrente aquosa proveniente das operações de contato direto da coqueria, dentre as quais se destaca o apagamento de coque. Aplicando-se a metodologia de Diagrama de Fontes de Água, consegue-se uma redução de 141.441 t/h (cenário base) para 40.679 t/h, conforme se pode concluir pela análise dos dados da Figura 4.10.

Esta redução de 71,24% foi possível devido à utilização de circuito semiaberto com reciclo para as operações de resfriamento com contato indireto e com a regeneração e reúso das correntes efluentes das operações 1 a 4. Neste ponto foram consumidos 4.427 t/h de água para resfriamento por contato indireto e 36.251 t/h para as operações de contato direto. Estas últimas contaram com o reúso de 4.671 t/h, ou 11,42% em relação ao total consumido nestas operações. As correntes que mais contribuíram para alcançar este índice de reúso foram as correntes efluentes das operações 15, 19, 23, com 1.237, 1.286 e 939 t/h, respectivamente. As contribuições das correntes regeneradas ainda se mostraram pouco expressivas, com destaque para as operações 26, 27, 28 e 29, correspondentes à regeneração das operações 1, 2, 3 e 4, que contribuíram com 379, 82, 13 e 646 t/h, respectivamente.

O consumo específico observado foi de 64,79 m<sup>3</sup>/h, valor que indica o resultado das estratégias utilizadas para minimização de consumo de água, mas que está distante em uma ordem de grandeza dos valores de referência de excelência atuais. Da mesma forma, a redução da geração de efluentes líquidos em 38.511 t/h indica que há um grande potencial de reúso considerando as demais operações siderúrgicas.

No que diz respeito à avaliação econômica, aplicando-se a metodologia definida para estimativa de custos, observa-se a redução nos custos de outorga e tratamento de água, acompanhado de aumento no custo de tratamento de efluentes em maior proporção, resultando em um custo anual operacional maior:

- Custo anual de outorga: R\$ 9.799.999,20
- Custo anual de tratamento de água: R\$ 43.060.913,64
- Custo anual de tratamento de efluentes: R\$ 1.083.983,52
- Custo anual operacional: R\$ 53.944.896,36

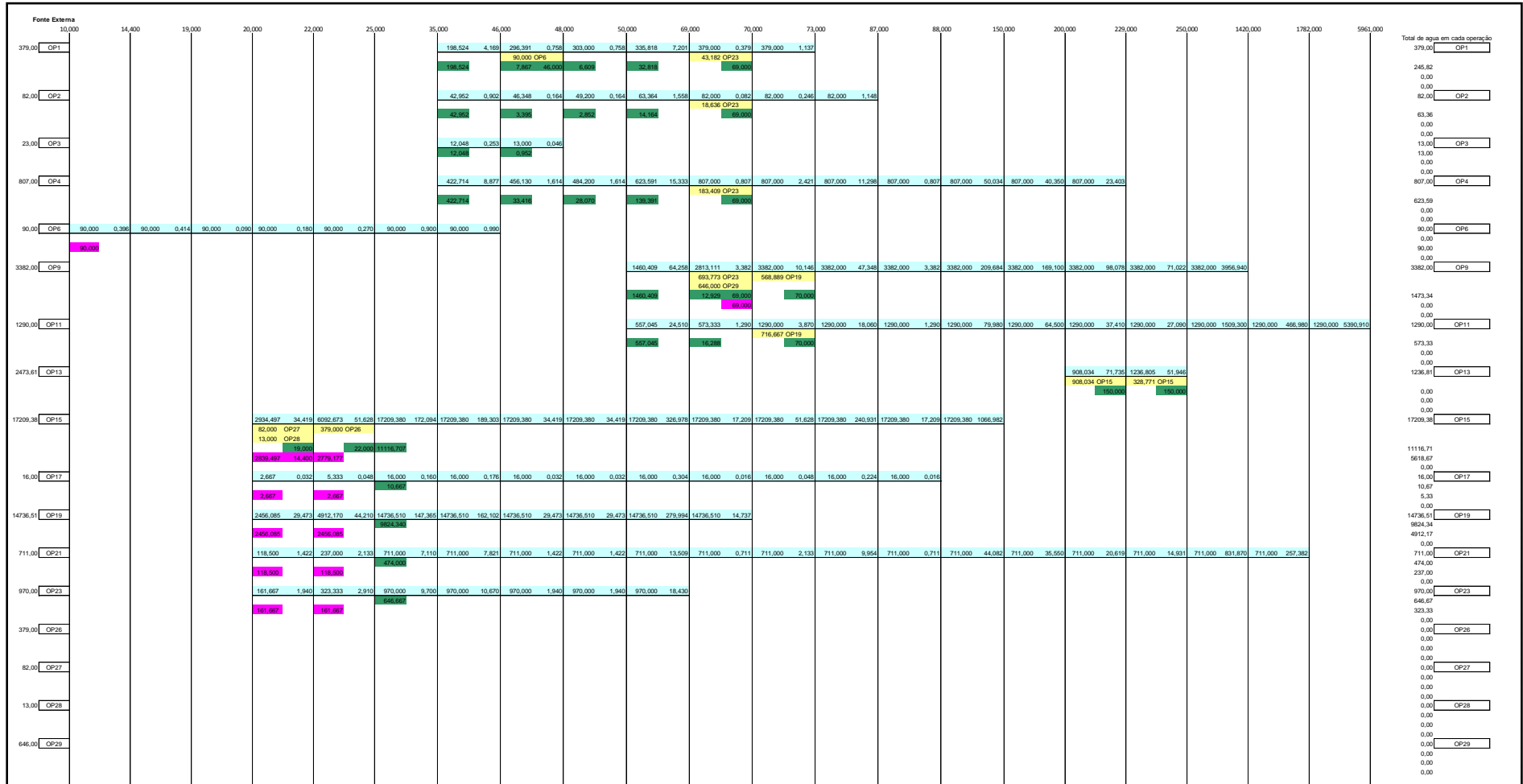


Figura 4.10 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 10.

#### 4.12 Cenário 11

De forma a estudar o efeito de um tratamento adicional para melhorar o resultado obtido pela regeneração da operação 4, que apresenta uma vazão consideravelmente maior do que as das correntes efluentes da regeneração das demais operações, desenvolveu-se este cenário, considerando a possibilidade de redução na concentração de sólidos em suspensão totais de 69 mg/L para 11 mg/L, considerando que esta redução é viável e pode ser alcançada com a substituição do tratamento por simples decantação para tratamento físico-químico.

Aplicando-se a metodologia de Diagrama de Fontes de Água utilizando-se a planilha de cálculos do MINEA® obtém-se o diagrama mostrado na Figura 4.11

Da análise do DFA deste cenário percebe-se que a redução no consumo de água foi de 71,69% em relação ao cenário base, contudo este valor representa um decréscimo de apenas 1,55% em relação ao cenário anterior. A quantidade de correntes reusadas aumentou de 4.671 para 5.303 t/h, do cenário 10 para o cenário 11, este aumento representa 11,92%, o que pode justificar, sob a ótica exclusiva deste aspecto, o investimento em um tratamento mais sofisticado para os efluentes gerados na operação 4.

Quanto aos demais indicadores, o consumo específico apresentou uma tímida redução para 63,78 m<sup>3</sup>/t, enquanto a redução da geração de efluentes foi de 73,11% em relação ao cenário base.

Prosseguindo com a análise econômica constata-se que houve redução nos custos operacionais para R\$ 53.020.819,70, motivado pelo aumento da eficiência de tratamento, que permitiu maior reuso.

A despeito da aparente não viabilidade técnico-econômica evidenciada no desenvolvimento deste cenário, utilizando-se raciocínio semelhante ao apresentado no cenário 9, optou-se por manter a operação de regeneração da forma aqui apresentada. A justificativa técnica para tal consideração é o fato das operações de calcinação e coqueificação serem as únicas de todo o processo siderúrgico onde ainda se observa na prática a opção de tratamento com simples decantação e/ou neutralização, diferentemente das demais operações que compõe uma usina siderúrgica típica. Desta forma, visando impor uma abordagem mais restritiva que considere que a regeneração deverá ter um nível apropriado para remoção de eventuais outros parâmetros de interesse, optou-se por esta decisão.

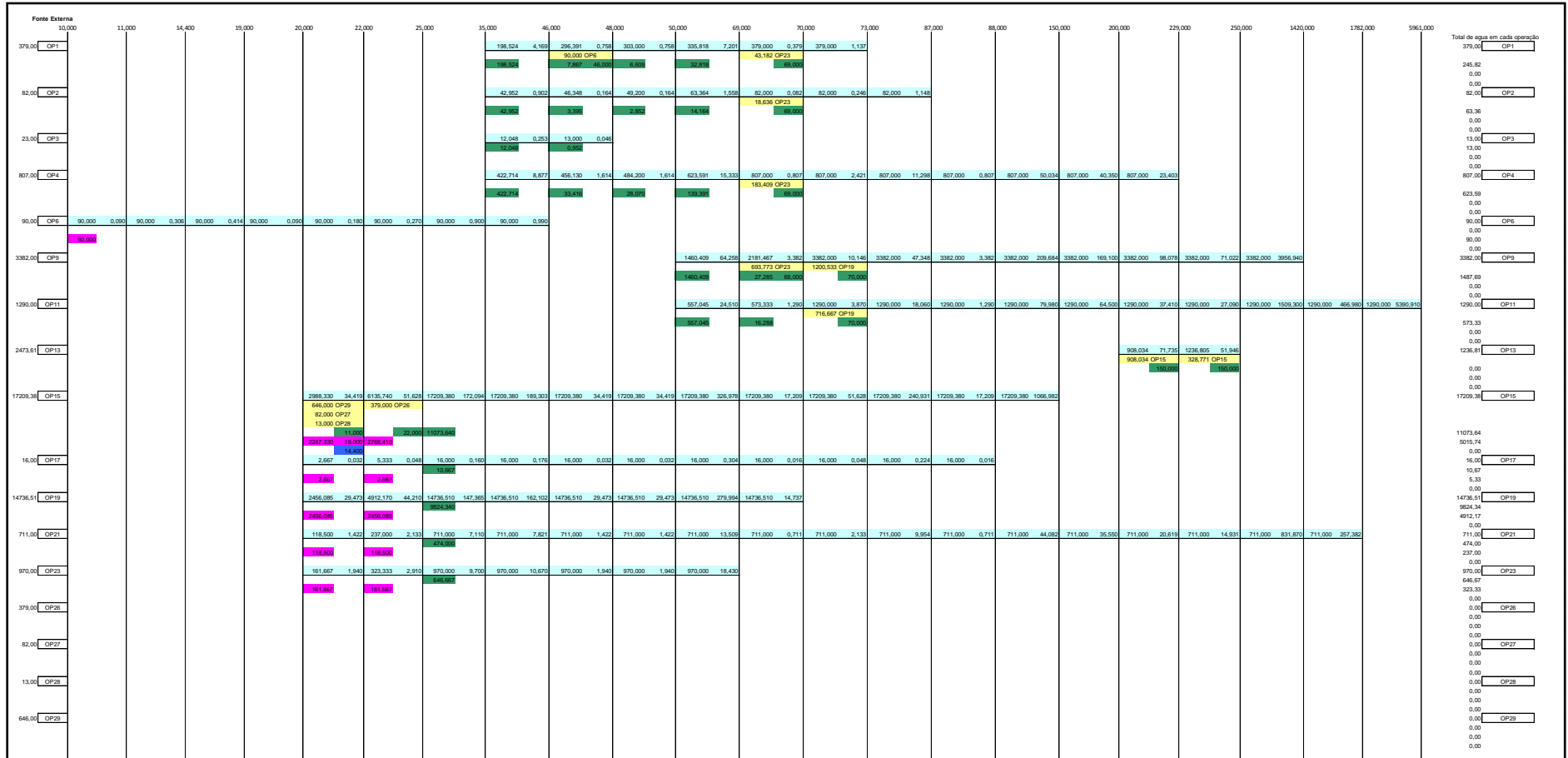


Figura 4.11 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 11.



#### 4.13 Cenário 12

O desenvolvimento deste cenário marca o estudo da última operação integrante da primeira grande etapa dos processos siderúrgicos, usualmente chamada de preparação de cargas, que envolve os pátios de matérias primas e os pátios de carvão e coque, além das unidades de transformação destas matérias primas do estado bruto para um estado apropriado de qualidade metalúrgica para serem utilizadas nos processos siderúrgicos, que como foi visto constituem-se da calcinação, da sinterização e da coqueificação. O tratamento dos gases gerados por esta última operação é realizado em uma unidade carboquímica, que concomitantemente realiza a recuperação de diversos subprodutos que podem ser vendidos para indústrias químicas diversas.

Os resultados obtidos aplicando-se o algoritmo de Diagrama de Fontes de Água apontam para uma redução de 71,73% no consumo de água e de 73,26% na geração de efluentes em relação ao cenário base (Figura 4.12). O aumento da vazão total de correntes aquosas reusadas em relação ao cenário anterior é pouco significativa (1,12%). Na mesma tendência, o consumo específico de água apresentou uma pequena redução para 63,69 m<sup>3</sup>/t, contra 63,78 m<sup>3</sup>/t do cenário 11.

Analisando a viabilidade econômica deste cenário percebe-se que os custos operacionais anuais totais são de R\$ 53.102.837,39, havendo pouca variação em relação ao cenário anterior.

Uma conclusão parcial que pode ser apresentada neste momento é a de que as correntes provenientes das operações de preparação de cargas contribuem pouco para o desenvolvimento de um cenário ótimo de reúso. Procedendo a uma análise comparativa com o cenário 5, após o qual as diferentes possibilidades de regeneração foram exploradas, percebe-se uma evolução pouco expressiva, associada à relativamente baixa vazão destas operações e às características de qualidade das correntes originais e regeneradas, provenientes das operações. A análise deste conjunto de operações indica que a redução do consumo de água, em relação ao cenário base, foi de 70,90% no cenário 5 e de 71,73% no cenário 12. A vazão de correntes aquosas reusadas aumentou de 4.189 para 5.363 t/h no mesmo intervalo. Este aumento de 21,89% é resultante da inclusão das unidades de tratamento de efluentes, contudo este efeito não foi suficiente para expressar ganhos expressivos na redução de consumo de água e de geração de efluentes, o

que é confirmado pela pouca variação do consumo específico de água que, no meso intervalo, diminuiu de 66,58 m<sup>3</sup>/t para 63,69 m<sup>3</sup>/t, e na redução da geração de efluentes, que foi reduzida de 39.154 para 37.819 t/h. Economicamente, a análise revela que houve, apesar dos custos crescentes associados ao tratamento de efluentes, redução nos custos operacionais totais de R\$ 53.528.499,93 para R\$ 53.102.837,39, do cenário 5 para o cenário 12.

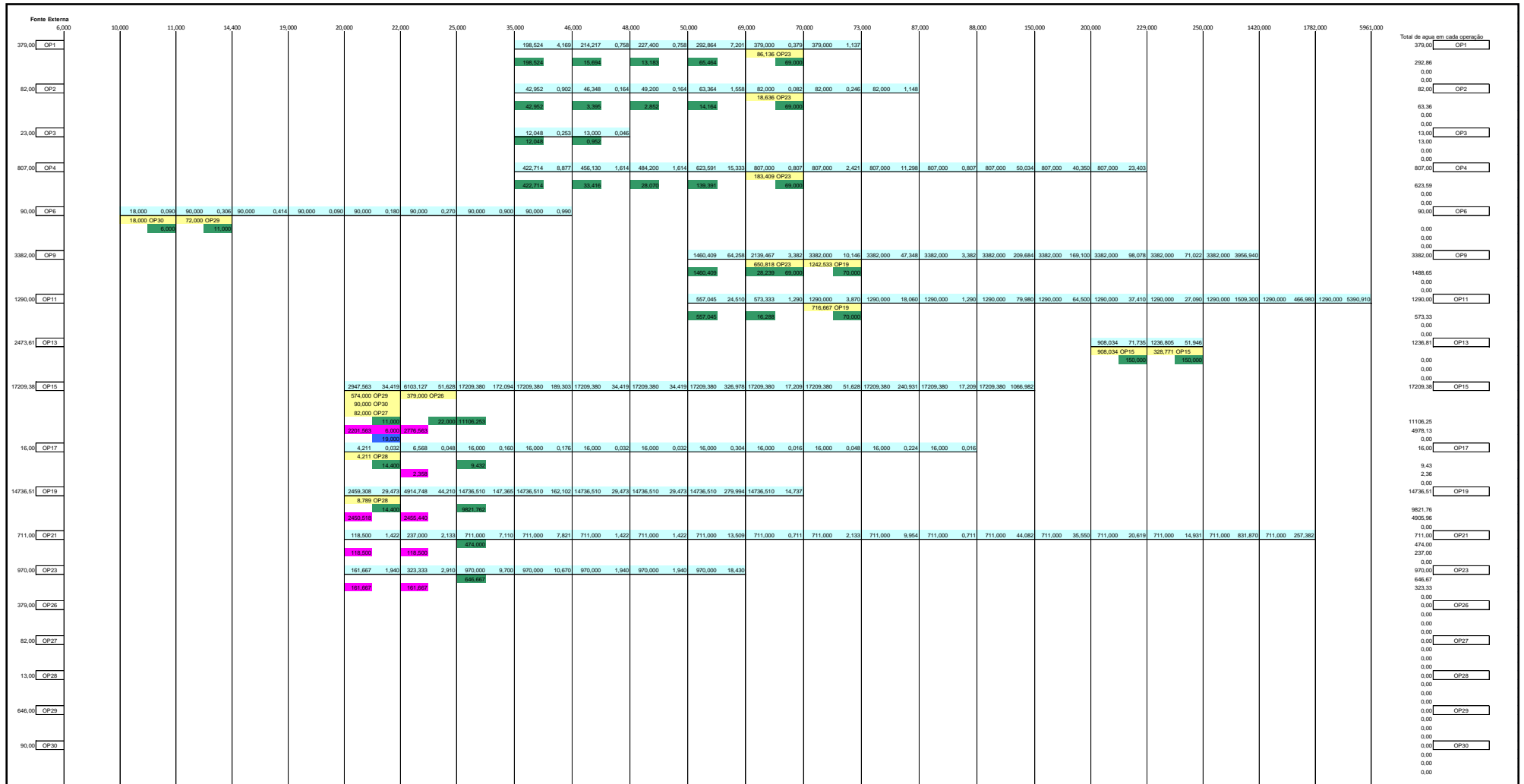


Figura 4.12 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 12.

#### 4.14 Cenário 13

O estudo considera a regeneração da corrente aquosa proveniente da operação de redução, que ocorre nos equipamentos denominados altos fornos, que objetiva a produção de ferro gusa, que é a principal matéria prima necessária para a fabricação do aço. Este cenário considera os resultados obtidos com o desenvolvimento dos cenários anteriores, notadamente do cenário 6 ao cenário 12, que representam um bloco de cenários associado a etapa de preparação de cargas. Ao mesmo tempo em que a operação de redução apresenta uma grande vazão operacional, desejável para o reúso, a elevada concentração de sólidos em suspensão totais, superior a 1400 mg/L, impede o reúso direto desta corrente, ao mesmo tempo que, em circuito aberto, representa uma grande contribuição para a geração de efluentes líquidos. Considerando os fatos acima expostos, apresenta-se uma oportunidade de estudo de reúso contemplando uma etapa prévia de regeneração. Os valores utilizados para o desenvolvimento desta e das demais operações foram obtidos de uma usina siderúrgica típica, de forma a garantir a proximidade dos resultados alcançados nas simulações desenvolvidas nesta dissertação. A concentração pode ser reduzida, em sistema de tratamento semelhante ao descrito no capítulo 2, para 21 mg/L.

Aplicando-se o algoritmo DFA, obtém-se o diagrama mostrado na Figura 4.13. A análise do DFA mostra que há uma redução no consumo de água de 73,87% em relação ao cenário base. Este valor representa uma redução de 7,57% em relação ao cenário 12 (bloco preparação de cargas) e de 10,21% em relação ao cenário 5 (reciclo das correntes de resfriamento por contato indireto, porém sem regeneração para reúso das correntes de contato direto), indicando que a regeneração da corrente aquosa que atende às operações de resfriamento e limpeza dos gases dos altos fornos é tecnicamente viável.

Os demais indicadores de consumo registram um consumo específico de 58,86 m<sup>3</sup>/t, que foi motivado pelo reúso mais significativo apontado pelo cenário, que foi de 8.392 t/h, que representa uma taxa de reúso de 20,51%, valor 36,09% superior ao registrado no último cenário. Quanto à geração de efluentes líquidos, foi observada uma redução para 34.437 t/h, valor 8,94% menor que o registrado no cenário 12 e 12,05% menor do que o registrado no cenário 5

A análise econômica evidencia que o melhor desempenho deste cenário foi acompanhado de um menor custo anual operacional, de R\$ 51.847.734,94.

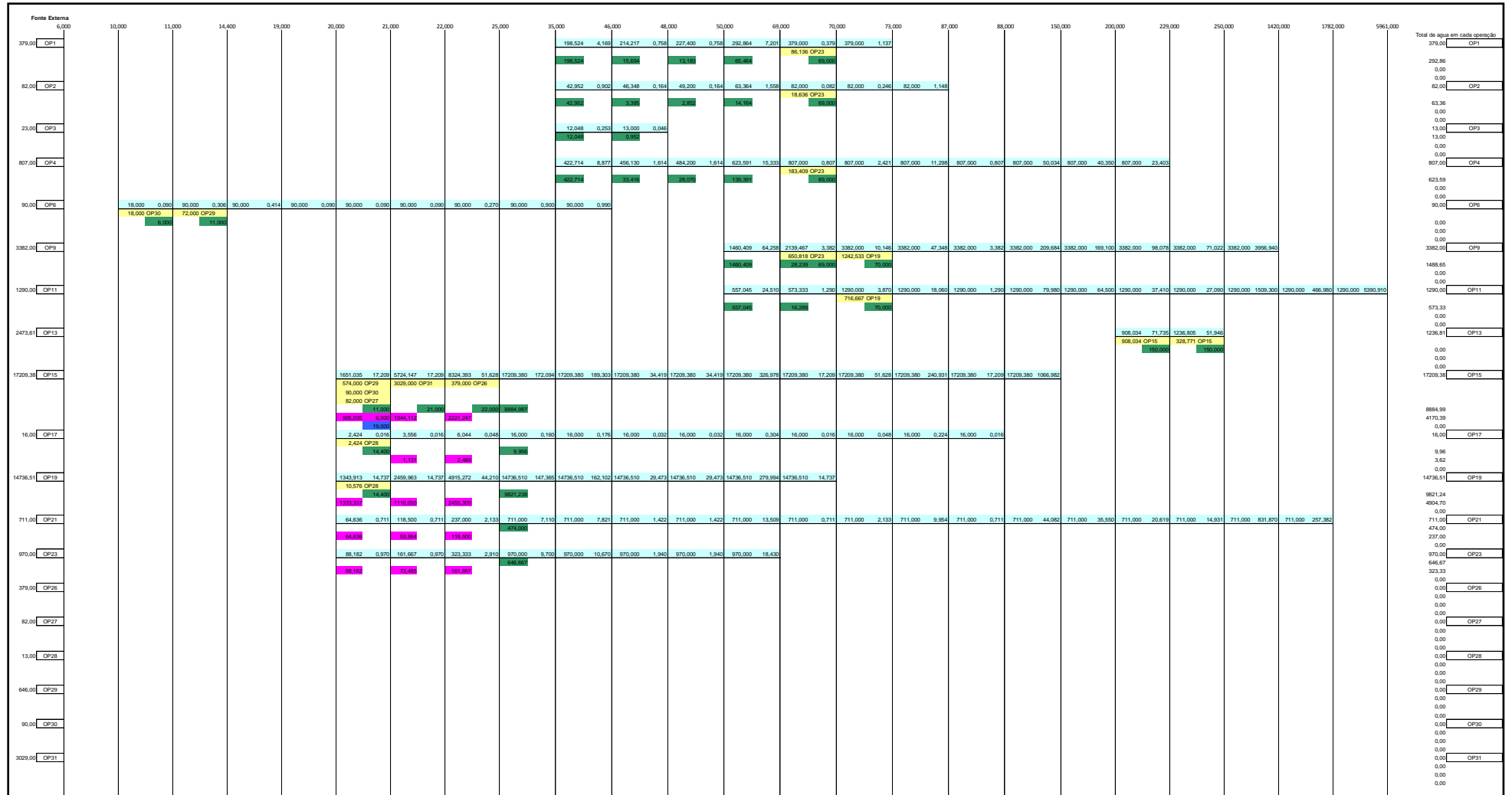


Figura 4.13 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 13.

#### 4.15 Cenário 14

Este cenário contempla além dos resultados obtidos de forma evolutiva ao longo dos cenários anteriores a hipótese de regeneração da operação 11, isto é, o tratamento dos efluentes gerados no processo de resfriamento por contato direto dos gases resultantes do processo de conversão de ferro gusa em aço, que ocorre na aciaria. Ao contrário da corrente aquosa da operação 9, os efluentes gerados pela operação 11 apresentam menor vazão (1290 t/h) e maior concentração (5961 mg/L), o que dificulta o reúso direto, isto é, sem regeneração das correntes aquosas. Dados obtidos de uma usina siderúrgica indicam que é possível reduzir a concentração de sólidos em suspensão totais para 71 mg/L, utilizando-se tratamento físico-químico.

Definidas as condições de entrada da simulação desenvolveu-se o Diagrama de Fontes de Água apresentado na Figura 4.14. A análise crítica do diagrama indica uma redução no consumo de água de 73,87% em relação ao cenário base, exatamente o mesmo índice registrado no cenário 13, o que indica que a regeneração da corrente aquosa proveniente da operação 11 (operação 32), apesar da expressiva redução na concentração de sólidos em suspensão totais (98,81%) não foi suficiente para permitir o seu reúso. Os outros indicadores de desempenho também se mantiveram praticamente inalterados. O consumo específico, como esperado, manteve-se em 58,86 m<sup>3</sup>/t, assim como o índice de reúso e geração de efluentes líquidos industriais, que se mantiveram em 20,51% e 34.437 t/h, respectivamente.

A análise econômica indicou que a inclusão da etapa de regeneração da operação 11 agrega um custo operacional anual de R\$ 1.137.060,74 em relação ao cenário anterior, motivado pelo aumento na vazão de efluente tratada.

Embora a inclusão da operação 32 tenha se mostrado técnica e economicamente inviável, ela será mantida para o desenvolvimento dos próximos cenários devido a dois motivos principais. Em primeiro lugar, como se busca desenvolver este estudo o mais próximo possível de uma planta real, não se deve olvidar que as altas concentrações de sólidos em suspensão totais características desta operação violariam leis e regulamentos quanto ao lançamento de efluentes em, praticamente, qualquer país no mundo que tenha um órgão ambiental minimamente atuante. Em segundo lugar, embora não se tenha conseguido

enquadrar esta corrente para reúso, é importante lembrar que uma das funções de um estudo é o levantamento de oportunidades para trabalhos futuros. Neste caso, por exemplo, podem ser estudadas diferentes técnicas de tratamento terciário visando à adequação desta corrente aos níveis de qualidade requeridos para o reúso. Como as informações sobre tratamento de efluentes deste estudo se basearam em dados de uma usina siderúrgica real, optou-se por evitar se trabalhar com eficiências teóricas definidas por fabricantes de sistemas de tratamento, de forma a manter a consistência do trabalho desenvolvido. Contudo, não se descarta a importância do desenvolvimento de estudos complementares neste tema.



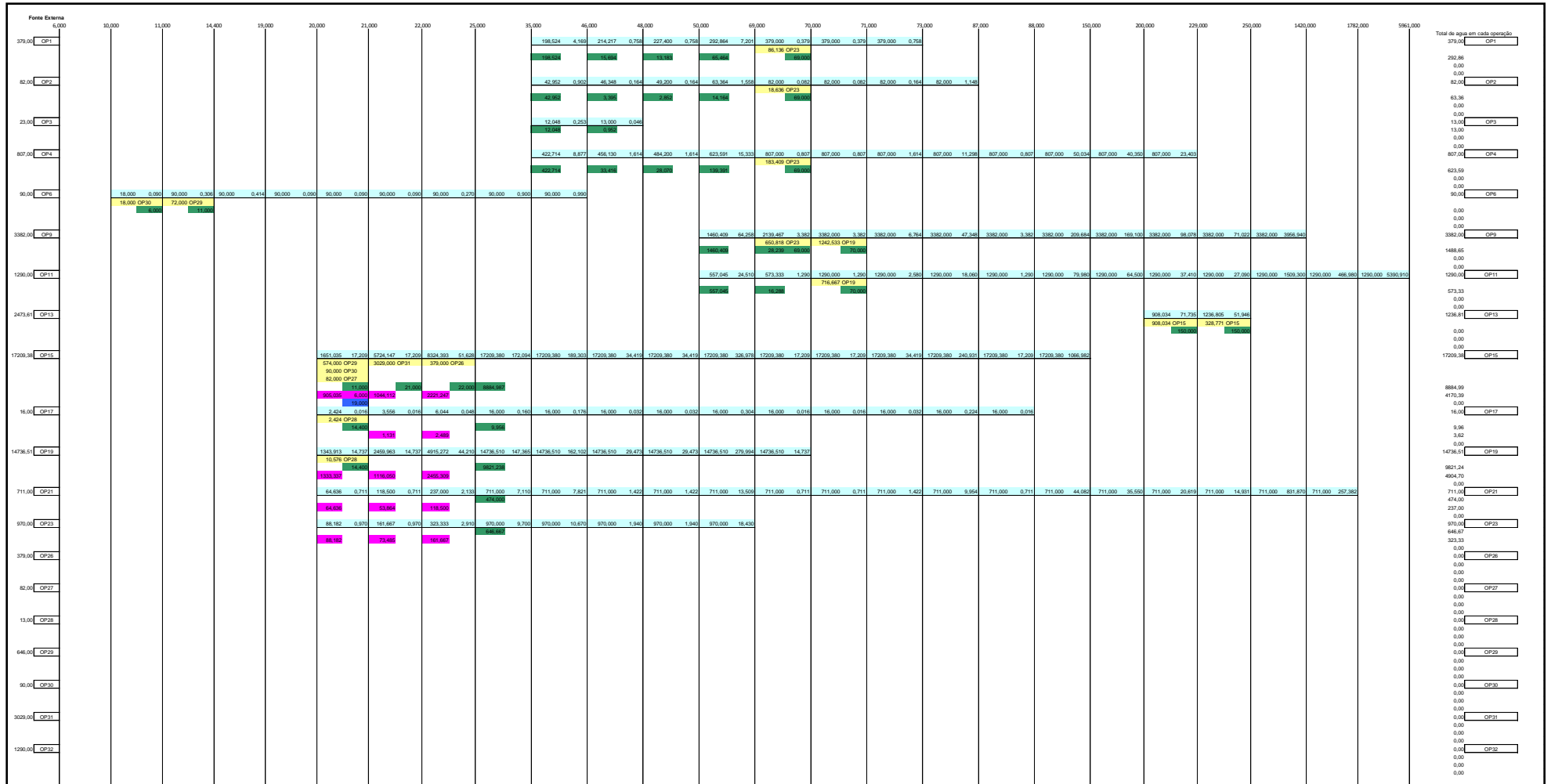


Figura 4.14 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 14.

#### 4.16 Cenário 15

Outra importante operação na unidade siderúrgica aciaria é a etapa de refino do aço. Os dados levantados em uma usina siderúrgica típica indicam que esta operação demanda uma vazão operacional de 2.474 t/h, das quais 74 t/h são perdidas por processos de evaporação e respingos, podendo-se reduzir a concentração de SST de 250 para 108 mg/L. Utilizando-se estratégias de reúso, constata-se dos cenários anteriores que esta vazão pode ser diminuída quando a operação 13 reusa água da operação 15. Como a concentração de entrada da operação 13 é menor do que a concentração de entrada máxima tem-se um consumo de água também menor, neste caso igual a 1.237 t/h. A regeneração desta corrente, entretanto, gera outra com concentração ainda alta de sólidos em suspensão totais, o que compromete o reúso da mesma. Os resultados muito próximos aos encontrados no Cenário 14, como se pode observar na Figura 4.15, diferenciando-se apenas na geração de efluentes, que devido à nova operação com perdas por evaporação, apresentou-se um pouco menor, e ao custo, levemente superior ao registrado no cenário anterior.

Na mesma linha de raciocínio, prevê-se aqui outra oportunidade de estudo com técnicas de tratamento terciário, visando o atendimento desta corrente às especificações técnicas necessárias para o seu pleno aproveitamento. Ressalta-se que estes estudos devem levar em conta a avaliação econômica para as diferentes possibilidades apresentadas de forma a permitir uma avaliação de custo e benefício antes da definição da melhor estratégia de tratamento complementar. Manter-se-á, considerando as questões ambientais envolvidas, os resultados alcançados para o desenvolvimento de novos cenários de reúso.

Como conclusão parcial dos resultados obtidos para o conjunto de operações que compõe a terceira grande etapa da siderurgia, constituída pela conversão e pelo refino, percebe-se que, com exceção dos processos de resfriamento por contato indireto, as demais correntes de processo não contribuíram significativamente para o desenvolvimento de um cenário otimizado de reúso.

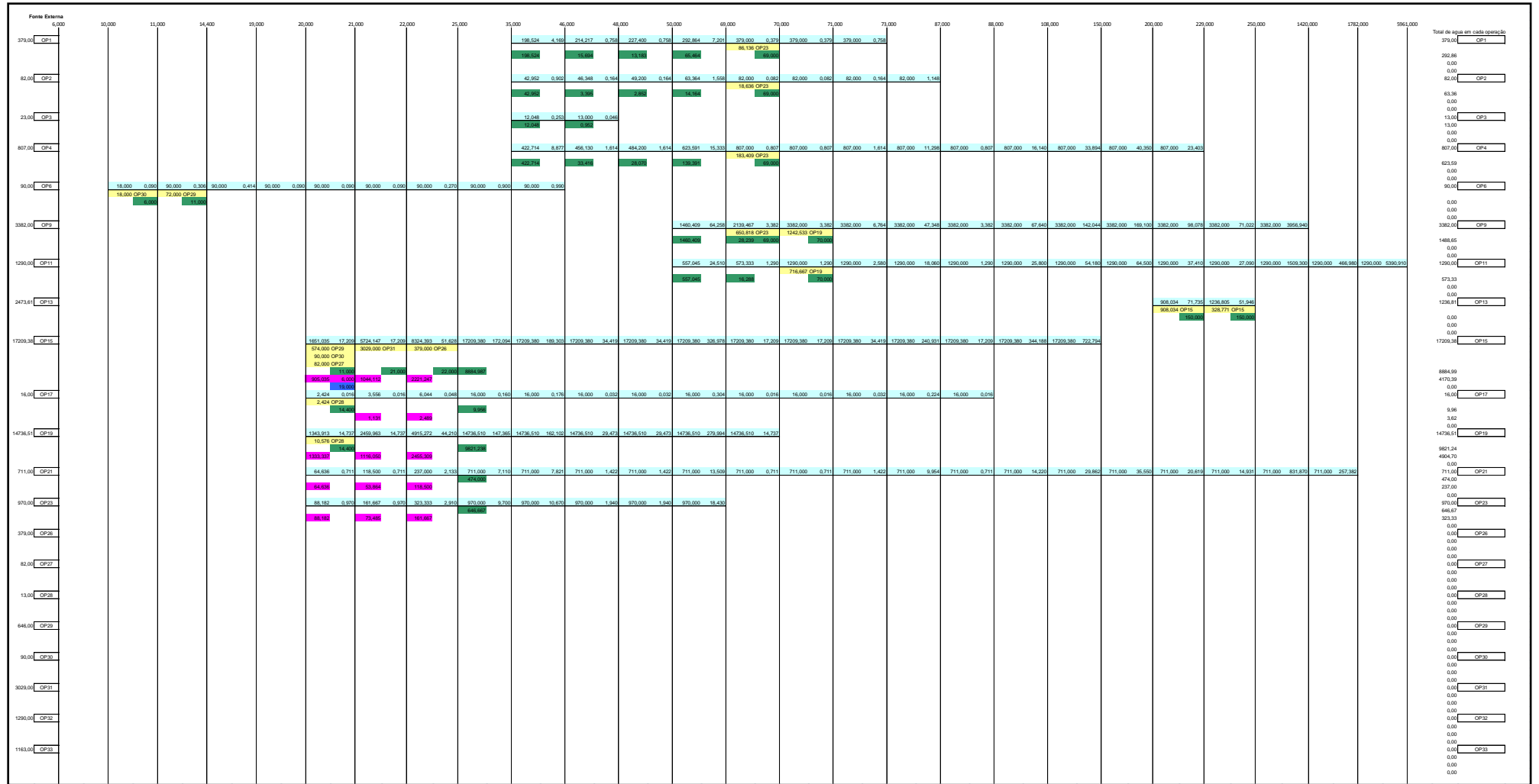


Figura 4.15 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 15.

#### 4.17 Cenário 16

Neste cenário, foi considerada a regeneração dos efluentes gerados na quarta etapa do processo siderúrgico integrado: o lingotamento contínuo. Nesta operação, que é responsável por nada menos que a transformação do aço líquido refinado em aço sólido, nas mais diversas formas e para as mais diversas aplicações, é demandada a maior vazão de água de todos os processos siderúrgicos, totalizando mais de 17.000 t/h. Ao contrário das operações da etapa de redução, é possível obter uma corrente regenerada com baixas concentrações de sólidos em suspensão totais, da ordem de 10 mg/L, e dos outros contaminantes de interesse. Entretanto, é imprescindível considerar que o tratamento utilizado deve contemplar uma etapa de remoção de óleos e graxas, de forma que este parâmetro não interfira negativamente nas operações onde a corrente for reusada. A despeito da necessidade de tratamento complementar, a grande vazão operacional associada a esta operação constitui, no mínimo, em grande potencial para reúso.

Desenvolvendo-se e analisando-se o Diagrama de Fontes de Água associado a este cenário (Figura 4.16) observa-se que houve uma redução de 87,20% no consumo de água em relação ao cenário base. Este cenário indicou o consumo total de 18.103 t/h, sendo 13.676 t/h associados às operações de contato direto e 4.427 relacionados à reposição de correntes de resfriamento por contato indireto. Foram reusados para o primeiro propósito 25.951 t/h, o que representa 65,49% em relação ao consumo total de água nestas operações. Este número representa um grande avanço em relação aos cenários anteriores, pois pela primeira vez foi registrada uma redução no consumo de água acima de 80%. Conseqüentemente, o consumo específico de água foi o mais baixo registrado, de apenas 28,83 m<sup>3</sup>/t., contra um cenário base de 225,28 m<sup>3</sup>/t. A redução na geração de efluentes também foi impulsionada pela redução no consumo de água, atingindo inéditos 89,55% de redução em relação ao cenário base. Pela primeira vez também a vazão de efluentes gerados (14.779 t/h) foi menor que a vazão de correntes efluentes reusadas (25.951 t/h).

A análise econômica indica que os custos operacionais anuais são de R\$ 44.147.920,40, assim distribuídos: R\$ 3.135.437,89 (outorga); R\$ 19.117.467,10 (tratamento de água); e R\$ 21.895.015,42 (tratamento de efluentes). Embora o custo com tratamento de efluentes tenha aumentado consideravelmente em relação ao

último cenário, a redução causada nos custos de outorga e, em maior destaque, nos custos de tratamento de água, permitiram uma redução de quase R\$ 10.000.000,00, indicando grande viabilidade técnica e econômica.



#### 4.18 Cenário 17

Este cenário considera o reúso de correntes aquosas provenientes de um novo conjunto de operações siderúrgicas, a laminação e acabamento. Diferentemente do adotado até aqui, optou-se pela não utilização da operação 17 no cenário de reúso. Isto se deve à limitação técnica do MINEA de se trabalhar com, no máximo, 25 operações simultaneamente. Uma vez que estão sendo consideradas no presente estudo treze operações com contato direto, não seria possível a simulação com uma operação de regeneração para cada operação, motivo pelo qual se escolheu remover a operação que apresentava menor vazão e, conseqüentemente, o menor potencial de reúso, e por esse motivo foi removida a operação 17, cuja vazão operacional é de apenas 16 t/h. A operação seguinte, laminação a quente (operação 19), por outro lado, apresenta vazão operacional de 14.737 t/h, sendo o tratamento convencionalmente utilizado suficiente para reduzir a concentração de sólidos em suspensão totais para 10 mg/L, além de adequação dos outros parâmetros de interesse.

A análise do DFA deste cenário (Figura 4.17) indica que houve uma grande evolução em relação ao cenário anterior, pois 94,24% do consumo das operações com contato direto foi suprido com água de reúso, por meio de uma corrente aquosa de 34.724 t/h. A redução do consumo de água em relação ao cenário base foi de 95,37%, sendo o consumo, neste caso, dedicado, em sua maior parte, à reposição das perdas por evaporação e respingos das correntes de resfriamento por contato indireto. O consumo específico de água também foi o menor registrado ao longo da evolução dos cenários de reúso, com apenas 10,43 m<sup>3</sup>/t. A redução da geração de efluentes acompanhou a mesma tendência, tendo sido registrada uma redução de 97,93% neste indicador.

Quanto à avaliação econômica, o atual cenário apresentou custo operacional anual de R\$ 41.006.562,39, distribuídos da seguinte forma:

- Custo anual de outorga: R\$ 1.336.350,96
- Custo anual de tratamento de água: R\$ 6.969.032,01
- Custo anual de tratamento de efluentes: R\$ 32.701.179,42

Estes resultados indicam viabilidade técnica e econômica do cenário ora em análise, uma vez que foram obtidos os melhores resultados referentes ao consumo

de água e geração de efluentes líquidos e o menor custo operacional anual, dentre todos os cenários até então desenvolvidos.



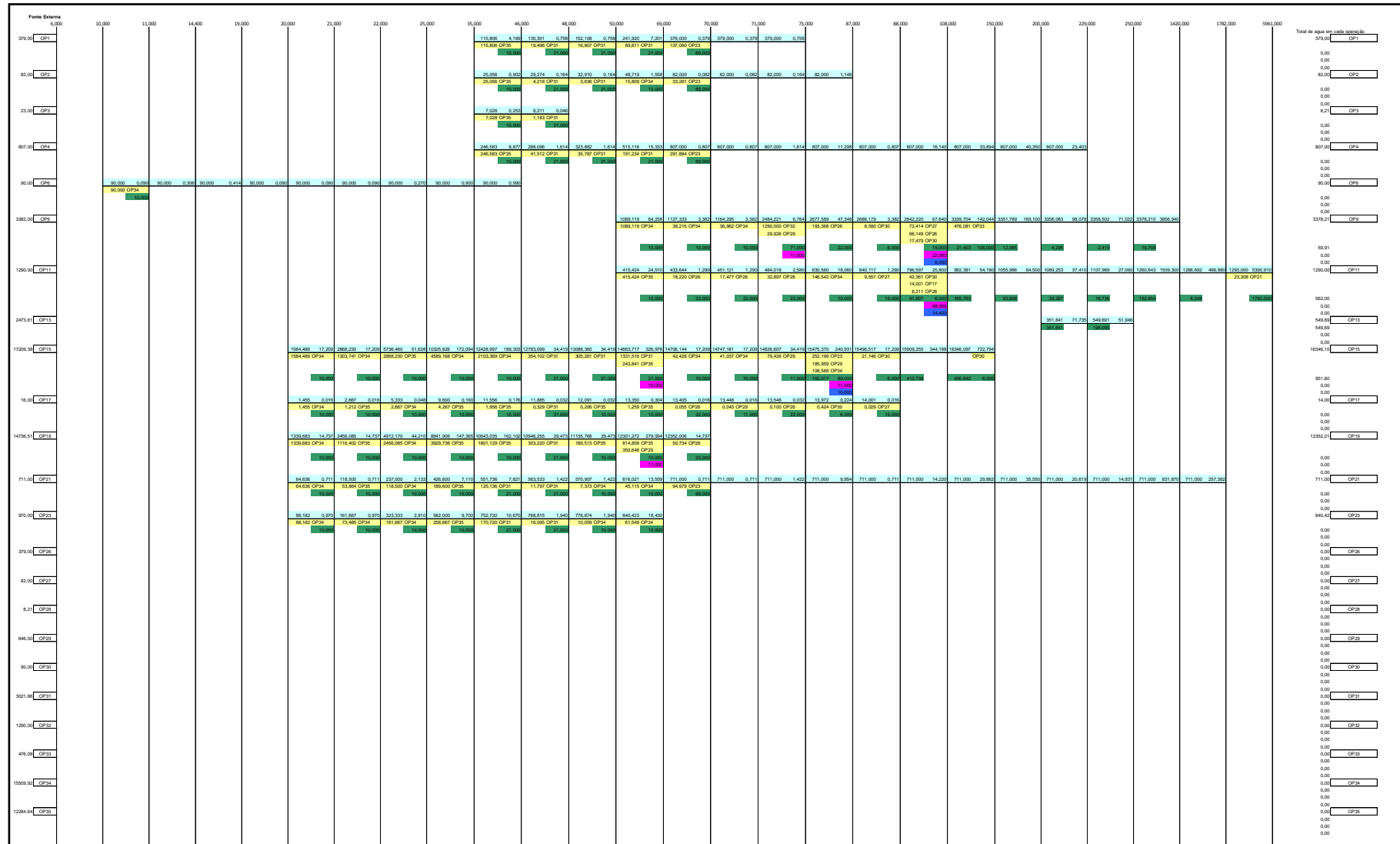


Figura 4.17 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 17.

#### 4.19 Cenário 18

O desenvolvimento deste cenário, assim como do cenário 19, visou avaliar a contribuição complementar que a regeneração das demais operações do conjunto laminação e acabamento na definição de um melhor cenário de reúso. A próxima operação é a laminação a frio. Esta operação é caracterizada por uma vazão operacional de 711 t/h, sem perdas de vazão devido à evaporação. Tipicamente a corrente aquosa efluente da operação apresenta concentração de sólidos em suspensão totais de 1782 mg/L, que pode ser diminuída para 11 mg/L após passar por sistema de regeneração apropriado, conforme descrito no capítulo 2.

De posse destas informações foi desenvolvido novo Diagrama de Fontes de Água, apresentado na Figura 4.18. Os resultados alcançados mostraram que houve redução de 10,68% no consumo de água, motivado pelo reúso possibilitado com a regeneração da corrente proveniente da operação 21. Esta contribuição permitiu a redução do consumo específico de água para 9,32 m<sup>3</sup>/t, primeiro valor abaixo de 10 m<sup>3</sup>/t, registrado no presente estudo. A geração de efluentes líquidos industriais diminuiu para 2.225 t/h, o que representa 98,43% de redução em relação ao cenário base.

Economicamente, a instalação de regeneração para a operação 21 resultou na redução dos custos operacionais totais de R\$ 41.006.562,39 por ano, no cenário 17, para R\$ R\$ 40.847.398,10 por ano, dos quais R\$ 1.226.536,51 representam custos com outorga, R\$ 6.233.946,45 estão associados ao custo de tratamento de água e R\$ 33.386.915,14 ao custo do tratamento de efluentes líquidos.

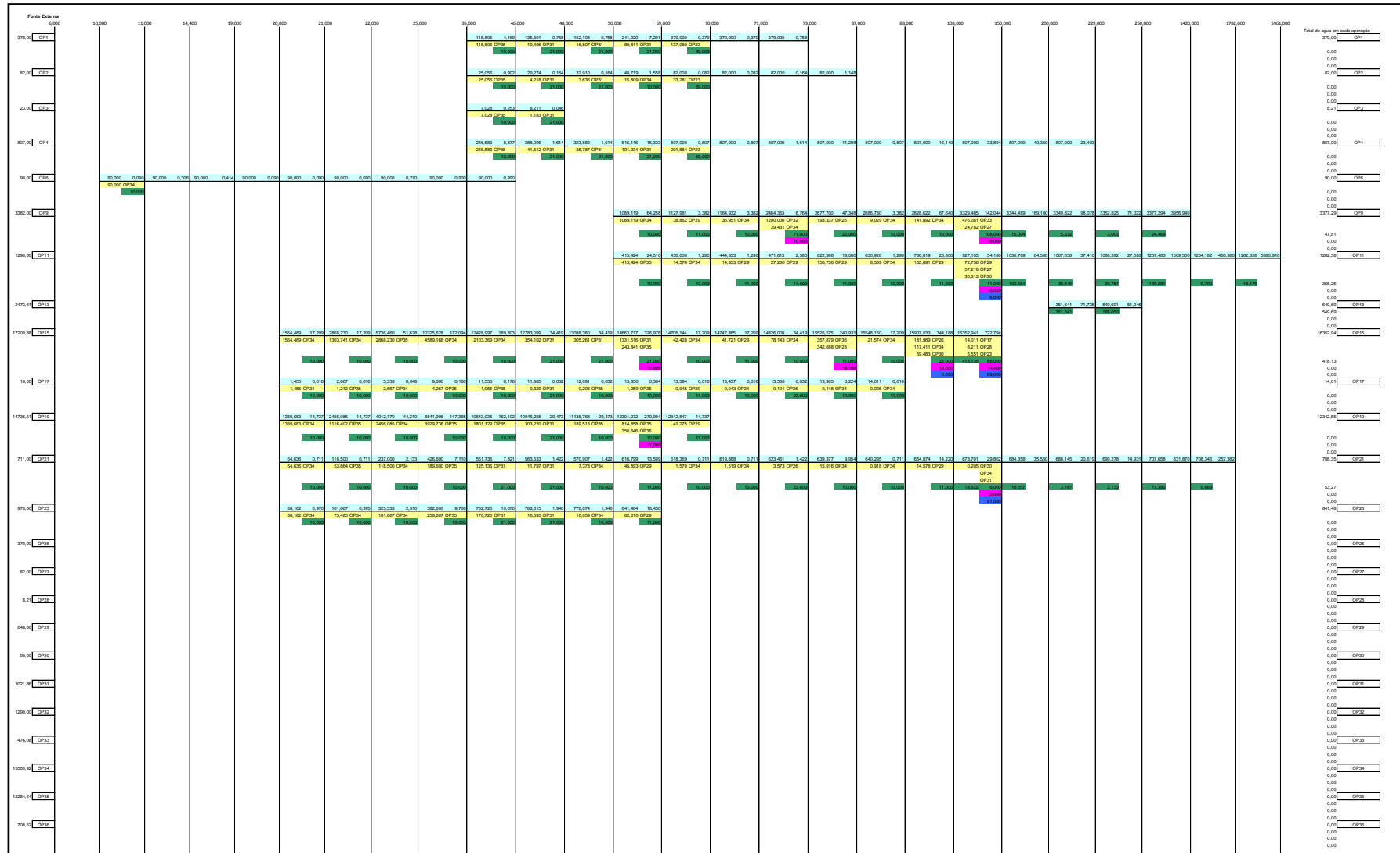


Figura 4.18 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 18.

#### 4.20 Cenário 19

Dando prosseguimento a sequência evolutiva dos cenários de reúso ao longo do processo siderúrgico, resta estudar a influência da operação 21 na melhoria das condições de reúso. Esta operação compreende as sub-operações de acabamento, que apresentam uma vazão operacional típica de 970 t/h, com perdas de vazão da ordem de 31 t/h. A concentração de sólidos em suspensão totais no efluente é de, aproximadamente, 69 mg/L, podendo a regeneração reduzir este valor para 8 mg/L.

Aplicando o algoritmo DFA, obtém-se resultados próximos aos obtidos no cenário 18, indicando que a regeneração da corrente aquosa proveniente da operação 23, assim como observado no cenário anterior para a corrente aquosa efluente da operação 21, não representaram melhorias significativas no cenário de reúso (Figura 4.19). Contudo, cabe ressaltar que a regeneração é necessária para enquadramento dos efluentes líquidos industriais quanto aos padrões de lançamento estabelecidos em leis e regulamentos vigentes.

Desta forma, tem-se um cenário caracterizado pelo consumo de 6.135 t/h de água, o que equivale a uma redução de 95,66% em relação ao cenário base. Esta configuração de correntes permite o reúso 34.883 t/h entre as operações de contato direto, valor equivalente a um percentual de reúso de 95,33%. O consumo específico registrado foi de 9,77 m<sup>3</sup>/t, valor consideravelmente inferior ao associado ao cenário base, que foi de 225,28 m<sup>3</sup>/t. A geração de efluentes foi de 2478 t/h, o que representa em relação ao cenário base uma redução de 98,25%. Uma possibilidade para estudo futuro é a regeneração das correntes de purga geradas nos diferentes processos. A reutilização destas correntes constitui a última parcela para o alcance de um cenário com lançamento zero de efluentes líquidos. Infelizmente, devido a limitações técnicas do MINEA este estudo não pôde ser realizado. Contudo, ressalta-se para o grande potencial que a regeneração destas correntes significa, uma vez que além do descarte zero, tão perseguido por todos, haveria possibilidade de se alcançar um patamar ainda mais baixo para o consumo específico de água, para valores da ordem de 5,92 m<sup>3</sup>/t ou menos.

A avaliação econômica mostrou que os custos operacionais deste cenário somam R\$ 41.553.784,50 por ano, distribuídos entre custos de outorga, tratamento de água e tratamento de efluentes. O principal aumento de custo em relação ao

cenário anterior ocorreu devido ao aumento do custo de efluentes líquidos, o que é justificado pela consideração de um sistema de tratamento adicional.

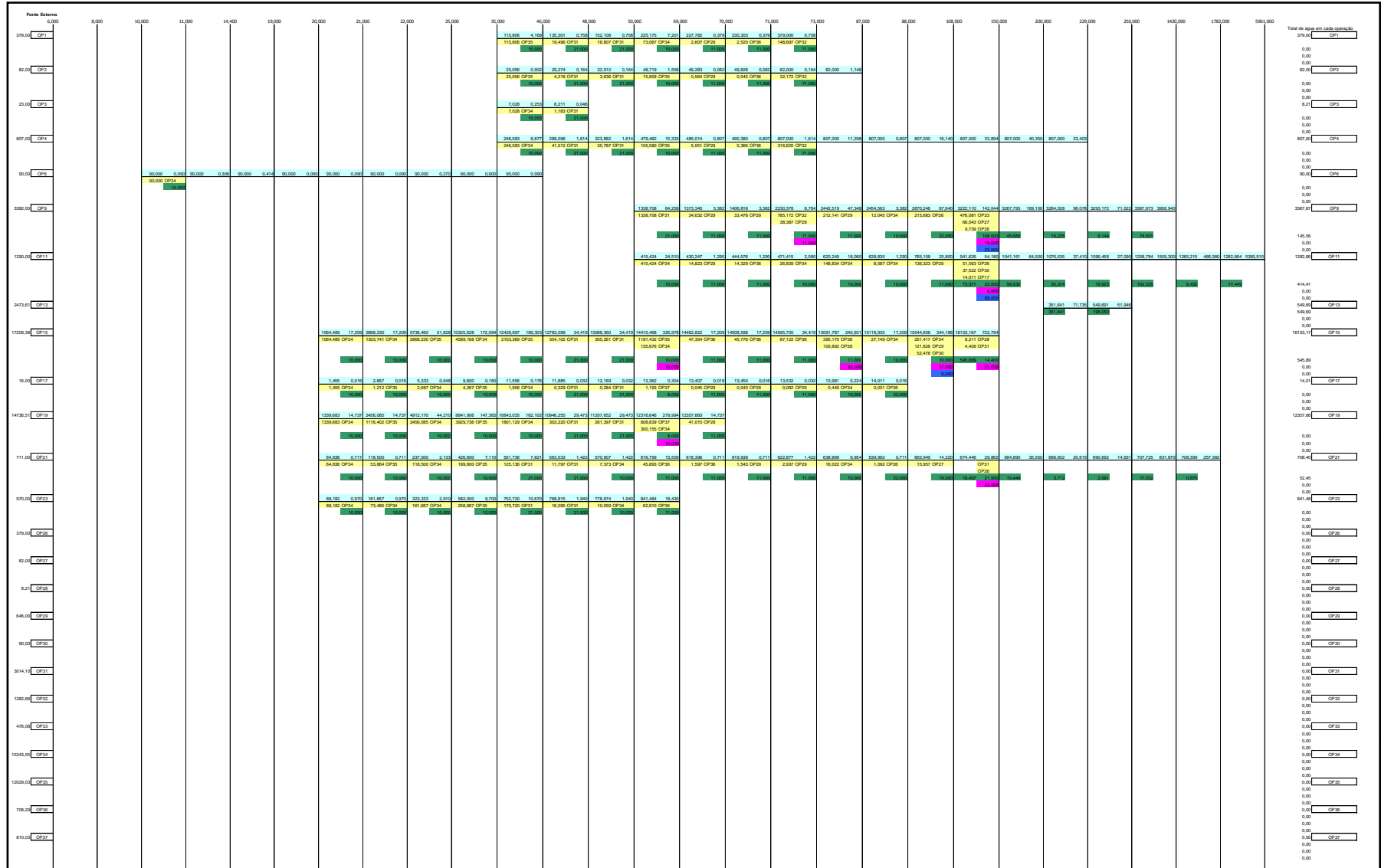


Figura 4.19 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 19.

#### 4.21 Cenário 20

Finalmente, propõe-se o desenvolvimento de um cenário mais restritivo que considere limitações técnicas no recebimento de correntes em uma determinada operação. Assim, conservadoramente, desenvolveu-se este cenário considerando apenas regeneração e reciclo entre correntes de contato direto, para avaliar o efeito desta estratégia na redução do consumo de água e na geração de efluentes líquidos, assim como avaliar se esta estratégia, comumente utilizada pelo setor se apresenta economicamente viável frente às estratégias de regeneração e reúso.

Desenvolvendo-se o algoritmo DFA obteve-se o diagrama apresentado na Figura 4.20. Os resultados obtidos são muito próximos aos obtidos no cenário 19, diferenciando-se apenas no custo de tratamento de água, que aumentou neste cenário, em função da necessidade de captação e tratamento de uma pequena vazão de água para atender a operação 17, que antes recebia água de reúso. Embora este cenário apresente uma geração de efluentes líquidos um pouco inferior ao do cenário anterior, os custos totais anuais aumentaram de R\$ 41.553.784,50 para R\$ 42.101.331,75, indicando que, a estratégia de regeneração e reúso é um pouco mais atrativa economicamente que a estratégia de regeneração e reciclo. Deve-se considerar, entretanto, que no reciclo, a preocupação com outros contaminantes de interesse é relativamente menor, pois são contaminantes, que embora tenha que ser controlados, são provenientes do próprio processo, e, portanto, menos sujeitos a alterações significativas nos resultados finais. De maneira análoga ao constatado no item anterior, incentiva-se a pesquisa sobre regeneração de correntes de purga, não abrangida na presente dissertação por falta de abrangência e de dados reais, de forma a conseguir desenvolver um cenário com lançamento de efluentes zero e um patamar de consumo específico de água mais baixo, preferencialmente menor que 5.

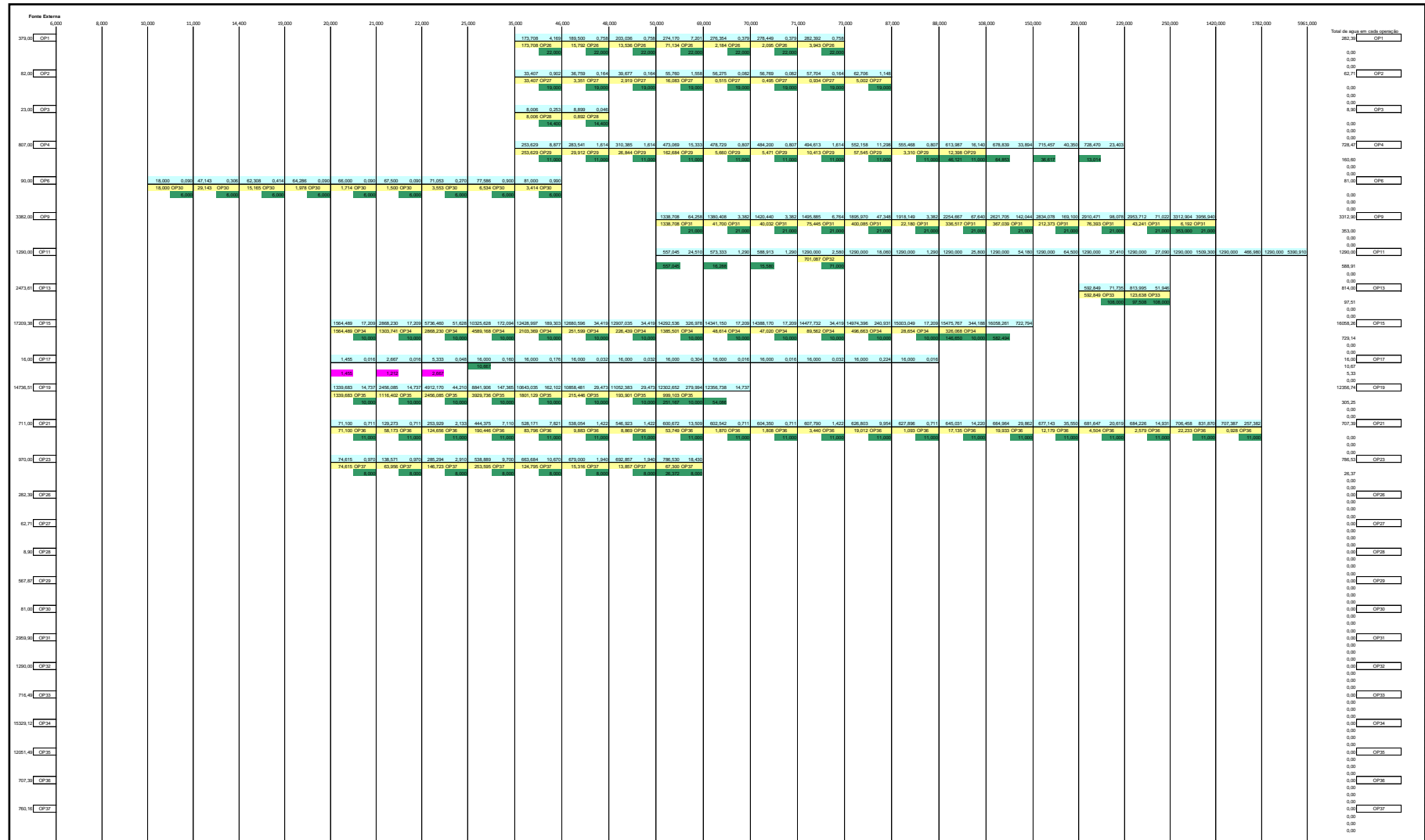


Figura 4.20 – Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 20.



## 4.22 Conclusões parciais

Com o desenvolvimento dos diversos cenários é possível estabelecer tendências e avaliar de uma forma mais integrada à viabilidade técnica e econômica das estratégias de reutilização empregadas nos cenários 1 a 20. A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos, considerando a vazão de captação de água, a vazão de lançamento de efluentes e o custo operacional anual.

Tabela 4.4 – Consolidação dos resultados obtidos considerando a vazão de captação de água, a vazão de lançamento de efluentes e os custos operacionais anuais.

Cenário	Vazão de captação de água (t/h)	Vazão de lançamento de efluentes líquidos (t/h)	Custo outorga anual (R\$/ano)	Custo tratamento de água anual (R\$/ano)	Custo tratamento de efluentes anual (R\$/ano)	Custo operacional anual (R\$/ano)
<b>Base</b>	<b>141441,14</b>	<b>141441,14</b>	<b>34.217.440,59</b>	<b>148.733.867,96</b>	<b>0,00</b>	<b>182.951.308,55</b>
1	26037,57	26037,57	6.299.009,97	27.380.075,81	0,00	33.679.085,78
2	36732,62	36732,62	8.886.354,77	38.832.921,37	0,00	47.719.276,15
3	37129,05	32701,73	8.982.259,19	39.256.909,16	0,00	48.239.168,34
4	41800,54	39793,54	10.112.385,99	36.944.933,13	0,00	47.057.319,12
5	41160,65	39153,50	9.957.583,83	43.570.916,09	0,00	53.528.499,93
6	40781,65	38774,50	9.865.896,15	43.169.990,36	366.812,28	53.402.698,80
7	40699,65	38692,50	9.841.463,17	43.083.164,01	446.175,36	53.370.802,53
8	40696,76	38689,62	9.840.547,85	43.080.126,17	458.757,31	53.379.431,33
9	40693,00	38685,86	9.839.676,13	43.076.009,37	458.757,31	53.374.442,81
10	40678,65	38510,50	9.799.999,20	43.060.913,64	1.083.983,52	53.944.896,36
11	40047,00	37878,86	9.647.417,41	42.289.418,77	1.083.983,52	53.020.819,70
12	39987,00	37818,86	9.611.636,32	42.320.111,72	1.171.089,34	53.102.837,39
13	36958,00	34436,86	8.624.851,68	39.120.199,19	4.102.684,07	51.847.734,94
14	36958,00	34436,86	8.513.395,68	39.120.199,19	5.351.200,81	52.984.795,68
15	36958,00	34362,86	8.334.828,79	39.120.199,19	6.476.801,55	53.931.829,54
16	18103,28	14779,14	3.135.437,89	19.117.467,10	21.895.015,42	44.147.920,40
17	6550,51	2924,37	1.336.350,96	6.969.032,01	32.701.179,42	41.006.562,39
18	5851,47	2225,33	1.226.536,51	6.233.946,45	33.386.915,14	40.847.398,10
19	6135,32	2478,17	1.273.686,20	6.532.429,58	33.747.668,73	41.553.784,50
20	6135,32	2478,17	1.272.930,02	7.130.644,89	33.697.756,85	42.101.331,75

A Tabela 4.5 resume os resultados obtidos para outros indicadores importantes como redução na captação de água, redução no lançamento de efluentes, percentual de reúso entre as operações de contato direto e consumo específico de água.

Tabela 4.5 – Consolidação dos resultados obtidos para indicadores de desempenho.

Cenário	Redução na captação de água (%)	Redução no lançamento de efluentes (%)	Reutilização (%)	Consumo específico de água (m <sup>3</sup> /t)
<b>Base</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>225,28</b>
1	81,59	81,59	28,49	41,47
2	74,03	74,03	21,85	58,51
3	73,75	76,88	21,00	59,14
4	70,45	71,87	8,70	66,58
5	70,90	72,32	10,24	65,56
6	71,17	72,59	11,16	64,95
7	71,23	72,64	11,36	64,82
8	71,23	72,65	11,37	64,82
9	71,23	72,65	11,38	64,81
10	71,24	72,77	11,42	64,79
11	71,69	73,22	12,96	63,78
12	71,73	73,26	13,11	63,69
13	73,87	75,65	20,51	58,86
14	73,87	75,65	20,51	58,86
15	73,87	75,71	20,51	58,86
16	87,20	89,55	65,49	28,83
17	95,37	97,93	94,24	10,43
18	95,86	98,43	96,13	9,32
19	95,66	98,25	95,33	9,77
20	95,66	98,25	95,32	9,77

Os cenários 1 a 5 contemplaram a evolução de considerações mais restritivas em relação ao cenário base. Nos cenários 6 a 12 foi avaliada a influência do tratamento de efluentes da etapa preparação de cargas, enquanto no cenário 13 considerou-se o efeito complementar do tratamento dos efluentes líquidos da etapa de redução. Os cenários 14 a 15 foram desenvolvidos visando avaliar o efeito do

tratamento de efluentes provenientes da etapa de conversão e refino. A evolução dos cenários considerando o tratamento das águas residuárias do lingotamento contínuo foi representada no cenário 16. Em sequência, um conjunto de modificações na regeneração das correntes oriundas nas operações de laminação e acabamento foi contemplado nos cenários 17 a 19. O último cenário desenvolvido, cenário 20, considerou, com base na evolução dos cenários anteriores, a hipótese de regeneração e reciclo entre correntes de contato direto, de forma a avaliar o efeito desta consideração mais restritiva.

Utilizando-se os resultados acima listados, desenvolveram-se gráficos de tendências, mostrados nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, de forma a avaliar a relação entre os indicadores de desempenho.

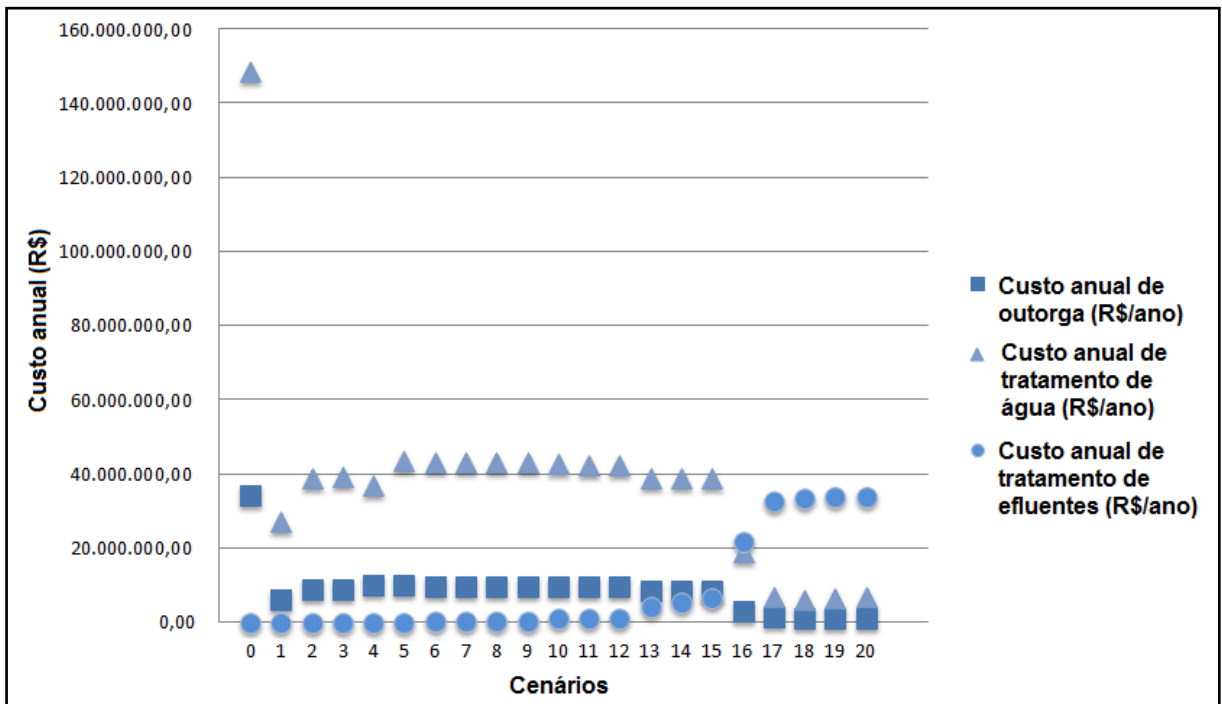


Figura 4.21 – Evolução dos custos anuais com outorga, tratamento de água e tratamento de efluentes.

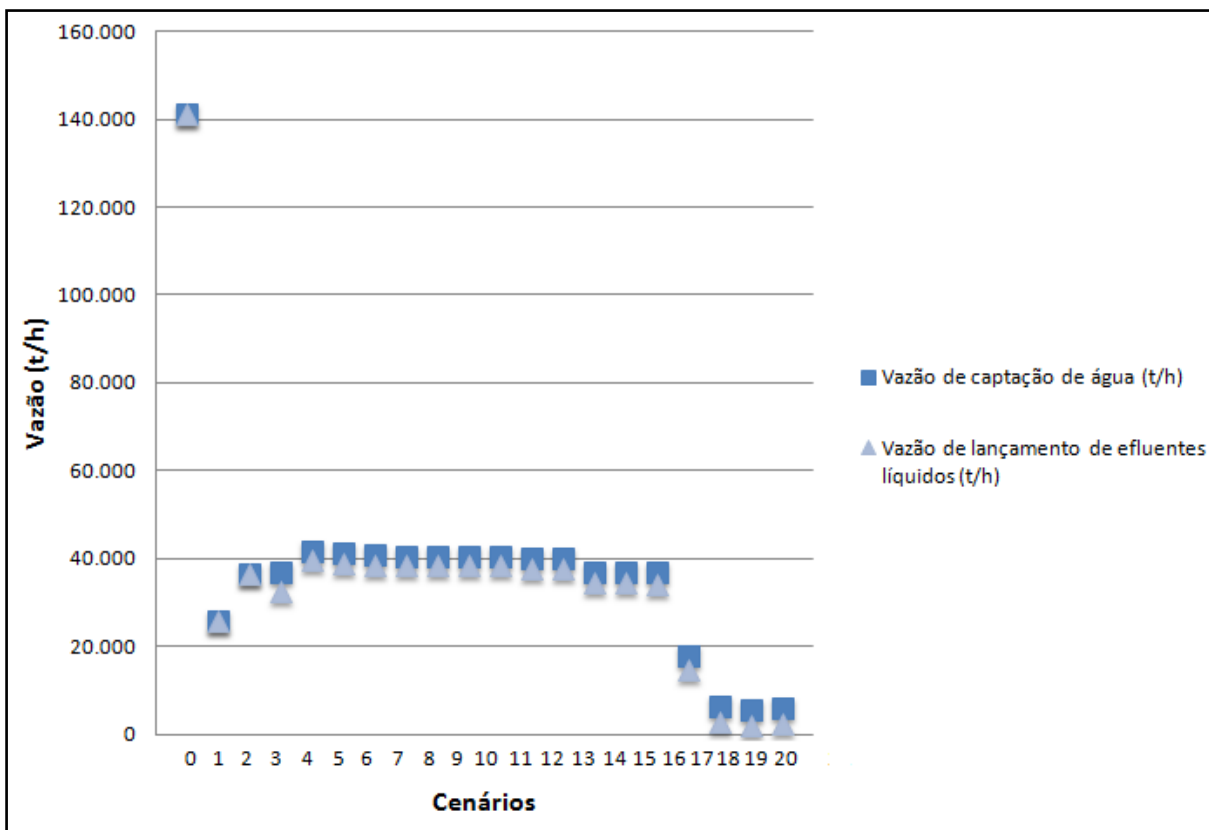


Figura 4.22 – Evolução do consumo de água e da geração de efluentes.

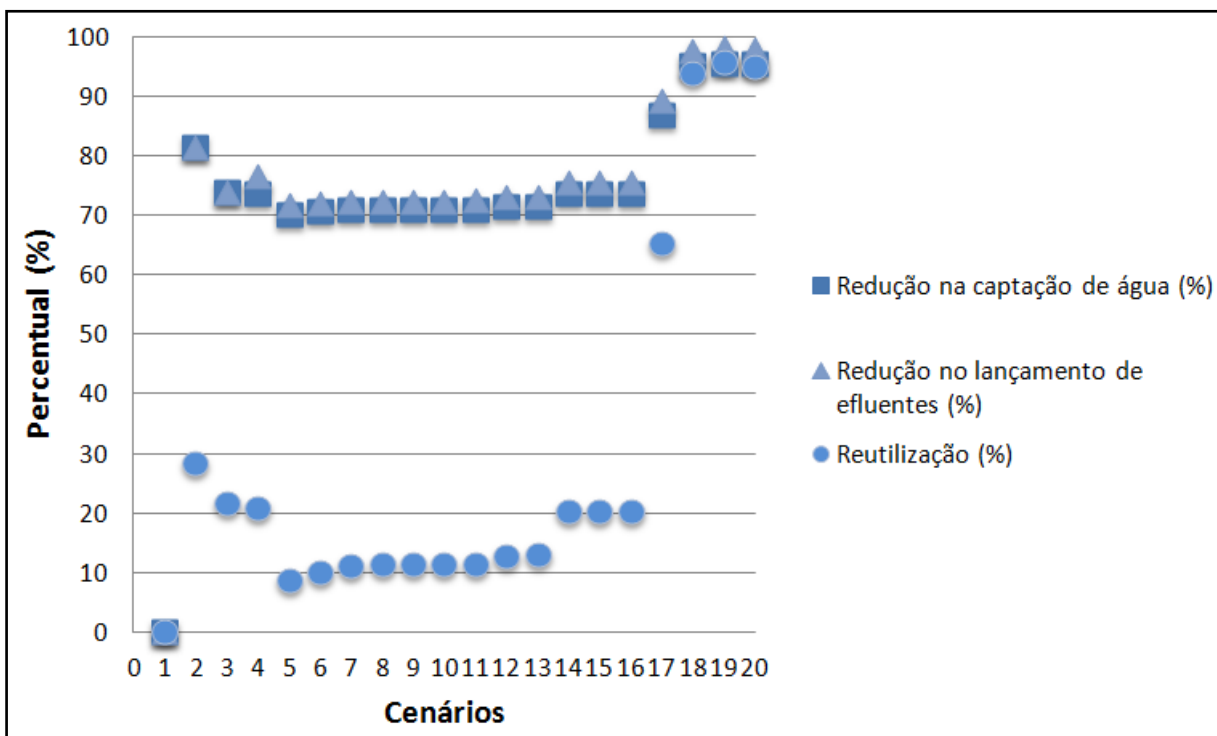


Figura 4.23 – Evolução percentual da redução no consumo de água, geração de efluentes líquidos e reutilização (reúso e reciclo).

Analisando-se os dados acima, percebe-se uma nítida evolução nos cenários de reúso. As correntes aquosas provenientes das operações de lingotamento contínuo e laminação a quente se destacaram como as mais importantes para a obtenção dos melhores resultados, ao passo que as contribuições das etapas de preparação de cargas, redução e conversão apresentaram limitada contribuição para o desenvolvimento de um cenário otimizado de reúso, o que indica a possibilidade de estudos futuros envolvendo a viabilidade técnica e econômica de tratamento terciário complementar.

Do reúso zero, condição do cenário base, ao lançamento de efluentes próximo de zero e consumo de água mínimo, registrado nos últimos cenários, a evolução do estudo revelou a viabilidade técnica e econômica das estratégias desenvolvidas, mostrando que os resultados mais ambientalmente sustentáveis são também aqueles que representam menores custos operacionais para a indústria, o que indica que é possível ser ambientalmente sustentável e ainda assim ser mais competitivo.

## Capítulo 5

# CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

“Os  
recursos naturais  
de transformação da água  
em água potável são lentos, frágeis e  
muito limitados. Assim sendo, a água deve  
ser manipulada com racionalidade e precaução”

Princípio 4 da Declaração Universal dos Direitos da Água

(ONU, 1992)

## 5.1 Conclusões

O aumento da consciência sobre a importância da conservação dos recursos naturais, em especial dos recursos hídricos, fundamentais para a manutenção da vida em suas diferentes formas, acompanhado do reconhecimento da água como dotada de valor econômico, e, ao mesmo tempo, do estabelecimento de leis e regulamentos cada vez mais rígidos quanto ao seu consumo e às condições de lançamento de efluentes líquidos, tem tornado imperativa a mudança de paradigmas para o uso racional deste importante recurso. Neste sentido, o desenvolvimento de estudos visando à conservação da quantidade e da qualidade das águas nos corpos hídricos tem apresentado cada vez mais destaque nas discussões sobre sustentabilidade.

O desenvolvimento do presente estudo permitiu concluir que o algoritmo Diagrama de Fontes de Água é uma poderosa e prática ferramenta para avaliação preliminar do potencial de reúso em processos siderúrgicos, indicando para uma possível redução do consumo de água dos corpos receptores, diminuindo o impacto sobre a disponibilidade hídrica, ao mesmo tempo em que resulta na menor geração de efluentes líquidos, contribuindo para a minimização de alterações em sua qualidade.

A viabilidade técnica e econômica preliminar foi atestada por meio de diversos cenários evolutivos que consideraram diferentes estratégias de reutilização. Embora não tenham sido considerados custos de capital, acredita-se que a expressiva redução do custo operacional torne esses sistemas alternativos economicamente atraentes. Ao final do desenvolvimento do estudo constatou-se que é possível realizar a redução do consumo específico de 225 m<sup>3</sup>/t para menos de 10 m<sup>3</sup>/t, o que representou uma expressiva redução no consumo de água e na geração de efluentes líquidos, de 95,66% e 98,25%, respectivamente.

O desenvolvimento de estudos de tratabilidade para as correntes de purga dos sistemas de resfriamento pode permitir o desenvolvimento de um cenário com consumo mínimo de água e ausência de lançamento de efluentes líquidos industriais.

A mais importante conclusão do presente trabalho é que, ao contrário do que o senso comum pode indicar, a minimização do consumo de água e da geração de

efluentes líquidos industriais não representa apenas um expressivo ganho ambiental. O desenvolvimento de estratégias de reutilização representa também significativas vantagens econômicas, conforme demonstrado no desenvolvimento dos cenários, apresentando-se, portanto, como indispensável ferramenta no estabelecimento de um desenvolvimento cada vez mais sustentável.

## 5.2 Sugestões

Como sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros indica-se a necessidade de se estudar tratamentos complementares para os efluentes líquidos industriais, com especial destaque para os tratamentos de nível terciário, não contemplados no presente estudo devido a pouca disponibilidade de dados de caracterização. Dentre as correntes pesquisadas, algumas apresentaram alta vazão operacional, contudo devido à limitada atuação dos sistemas de tratamento de nível primário e secundário, mostraram limitadas possibilidades de reutilização.

Recomenda-se também a pesquisa de uma maior quantidade de dados de monitoramento. Uma dificuldade observada nas referências consultadas foi a disponibilidade reduzida de dados de caracterização de água e efluentes líquidos para uma maior gama de contaminantes, considerando a totalidade das operações do processo em análise. Além disso, constatou-se na bibliografia consultada que muitos estudos de reúso destacam ou dados de monitoramento associados à qualidade da água industrial ou dados de tratamento de efluentes para atendimento de requisitos legais quanto ao lançamento, sendo pequena a oferta de informações, de parâmetros comuns aos dois aspectos, o que poderia contribuir para o enriquecimento dos estudos de reúso.

Ressalta-se, também, que o desenvolvimento do presente estudo não descarta a necessidade do desenvolvimento de estudos de tratabilidade e estudos complementares para as correntes analisadas de forma a comprovar a compatibilidade entre as mesmas e possíveis restrições técnicas não percebidas no presente estudo, de fundamentação teórica.

Outrossim, destaca-se a necessidade de aprimoramento constante das ferramentas para estudos de reutilização, devendo ser a metodologia DFA aplicada para estudos de reúso de outros setores industriais, a fim de consolidar a sua aplicação e, ao mesmo tempo, de se identificar oportunidades de melhoria visando



sua maior abrangência, levando-se em consideração eventuais particularidades dos setores industriais.

Incentiva-se também que seja cada vez mais incorporada às análises de viabilidade ambiental, além dos estudos de reúso, a possibilidade da não geração de efluentes líquidos e resíduos, devendo-se ganhar cada vez mais espaço discussões sobre mudanças nas rotas tecnológicas, substituições de matérias primas, alterações de características do produto, adequabilidade dos programas de manutenção de equipamentos de processo e de controle ambiental e elaboração de planos de prevenção de poluição.

O desenvolvimento de processos e equipamentos com maior eficiência energética também pode representar avanços consideráveis, diminuindo o consumo de água tanto nos sistemas de resfriamento quanto nas unidades de geração de vapor para propósitos de aquecimento. Considera-se importante, neste sentido, o estudo da possibilidade de aproveitamento da grande quantidade de vapor de água gerado nos processos de resfriamento para operações de secagem ou outros processos de aproveitamento térmico, incluindo a viabilidade de aproveitamento de parcela condensável para fins de reúso. Tal medida poderia além de diminuir custos com energia, possibilitar a redução de parte de água captada perdida por processos de evaporação, diminuindo os custos com seu consumo.

Outra possibilidade que apresenta um grande potencial para redução do consumo de água em indústrias é o aproveitamento de águas pluviais. Usinas siderúrgicas, assim como outros setores industriais, ocupam áreas da ordem de alguns quilômetros quadrados e apresentam edifícios com grande área de cobertura que podem funcionar como grandes coletores de águas de chuva.

Acredita-se que a busca do consumo mínimo de água para manutenção dos processos industriais, seja devido aos crescentes conflitos e custos relacionados à obtenção de água ou pelo estabelecimento de leis e regulamentos ambientais cada vez mais restritivos no que tange à sua devolução ao corpo receptor, terá papel determinante no sucesso de novos projetos e na manutenção de processos existentes, que terão a sua sustentabilidade ambiental avaliada por uma sociedade cada vez mais consciente e atuante, estejam seus representantes nos governos, nas entidades que representam a sociedade civil ou nos próprios setores industriais.

# REFERÊNCIAS

---

ABCEM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. **Revista Construção Metálica**. Publicação Especializada. 104 ed., 2011, ISSN 1414-6517. Disponível em: <[www.abcem.org.br](http://www.abcem.org.br)>. Acesso em: 09 jul. 2012, 17:00:00.

ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Estudos Estratégicos. Brasília, 2008. Disponível em: <[http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011\\_4\\_19\\_9\\_7\\_29\\_2193\\_1.pdf](http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_19_9_7_29_2193_1.pdf)>. Acesso em: 09 jul. 2012, 18:15:00.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Acesso à informação**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/acessoainformacao/perguntasfrequent.es.aspx>>. Acesso em: 20 jun. 2012, 21:08:00.

AISI – AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **Coke Production For Blast Furnace Ironmaking**. Disponível em: <<http://www.steel.org/>>. Acesso em: 17 jul. 2012, 11:15:00.

ALVA-ARGAÉZ, A., VALLIANATOS, A., KOKOSSIS, A., “A multi-contaminant transshipment model for mass exchange networks and wastewater minimization problems”; **Computers and Chemical Engineering**, 23, 1439-1453, 1999.

ALY, S., ABEER, S., AWAD, M., “A new systematic approach for water network design”, **Clean Techn Environ Policy**, 7, 154-161, 2005.

ARAÚJO, L. A., **Manual de Siderurgia**, vol. I, 1 ed., São Paulo: Editora Arte e Ciência, 1997

BOLOTA, José Roberto. **Introdução à Siderurgia**. 1 ed., Refino Secundário de Aço, São Paulo: ABM, 2007.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constitui%C3%A7ao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constitui%C3%A7ao.htm)>. Acesso em: 11 abr. 2012, 20:07:00.

BRASIL. **Decreto nº 4.613, de 11 de março de 2003.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2003/D4613.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2003/D4613.htm)>. Acesso em: 17 abr. 2012, 18:50:00.

BRASIL. **Decreto nº 24.643, de 10 de jun de 1934.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/d24643.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643.htm)>. Acesso em: 18 jun. 2012, 20:30:00.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm)>. Acesso em: 11 abr. 2012, 19:30:00.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/l9433.htm)>. Acesso em: 15 abr. 2012, 19:45:00.

BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9984.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm)>. Acesso em: 15 abr. 2012, 21:15:00.

CASTRO, P., MATOS, H., FERNANDES, M.C., PEDRO NUNES, C., “Improvements for mass-exchange networks design”, **Chemical Engineering Science**, 54, 1649-1665, 1999.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Conjunto de normas legais: recursos hídricos.** 7 ed. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2011. Disponível em: <<http://www.cnrh.gov.br/>>. Acesso em: 21 abr. 2012, 18:40:00.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resoluções do Conama: Resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012.** Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/61AA3835/LivroConama.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2012, 14:00:00.

DELGADO, B.E.P.C., **Minimização de efluentes aquosos em plantas industriais – Extensão do algoritmo diagrama de fontes de água para regeneração diferenciada**, Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

DELGADO, B.E.P.C., **Síntese de Sistemas de Regeneração e Tratamento Final de Efluentes**, Tese de D.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Revista Informe Mineral**. Jul./Dez. 2011. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/mostra\\_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=6950](http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=6950)>. Acesso em: 16 jul. 2012, 11:15:00.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Iron And Steel Production**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch12/final/c12s05.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2012, 22:15:00.

EUROFER. **Review of Coke Oven Plants Chapter**. 2007, p.62.

FACO, Rubens José. **Introdução à Siderurgia**. 1 ed., Lingotamento Contínuo do Aço, São Paulo: ABM, 2007.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. **Norma Técnica NT-202.R-10, de 12 de dezembro de 1986**. Disponível em: <<http://200.20.53.7/Ineaportal/Legislacao.aspx?ID=EC2F0291-AA60-4D29-B059-B6FC7BEDEA4A>>. Acesso em: 13 abr. 2010, 20:15:00.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. **Norma Técnica NT-213.R-4, de 18 de outubro de 1990**. Disponível em: <<http://200.20.53.7/Ineaportal/Legislacao.aspx?ID=EC2F0291-AA60-4D29-B059-B6FC7BEDEA4A>>. Acesso em: 13 abr. 2010, 20:30:00.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. **Norma Técnica DZ-205.R-6, de 08 de novembro de 2007**. Disponível em: <<http://200.20.53.7/Ineaportal/Legislacao.aspx?ID=EC2F0291-AA60-4D29-B059-B6FC7BEDEA4A>>. Acesso em: 13 abr. 2010, 20:35:00.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. **Norma Técnica DZ-215.R-4, de 05 de outubro de 2007**. Disponível em: <<http://200.20.53.7/Ineaportal/Legislacao.aspx?ID=EC2F0291-AA60-4D29-B059-B6FC7BEDEA4A>>. Acesso em: 13 abr. 2010, 20:00:00.

FENG, X., ZHANG, Z., “A design methodology for multiplecontaminant water networks with single internal water main”, **Computers and Chemical Engineering**, 27, 903-911, 2003.

FOO, D.C.Y., MANAN, Z.A., TAN, Y.L., “Use cascade analysis to optimize water networks”. **Chemical Engineering Progress**, 102, 45-52, 2006b.

FOO, D.C.Y, “Flowrate targeting for threshold problems and plant-wide integration for water network synthesis”, **Journal of Environmental Management**, 88, 253-274, 2008.

GLOWIMAGES. Disponível em:  
<<http://glowimages.com.pa/snippets/previewimage/index.cfm?imgid=54800431&tab>  
=> Acesso em: 09 jul. 2012, 16:50:00.

GOMES, J.F.S., **Procedimento para minimização de efluentes aquosos**, Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

GOMES, J.F.S., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., “Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant”, **Journal of Cleaner Production**, 15, 474-485, 2006.

GONÇALVES, Marcelo. **Introdução à Siderurgia**. 1 ed., Laminação de Produtos Planos e Não-Planos, São Paulo: ABM, 2007.

GORNI, Antonio Augusto. **Laminação de Produtos Planos e Não-Planos de Aço**. ABM, 2008.

HALLALE, N., “A new graphical targeting method for water minimization”, **Advances in Environmental Research**, 6, 377-390, 2002.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Consumo per capita de aço na Turquia**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/numeros--mercado.asp>>. Acesso em: 09 jul. 2012, 16:42:00.

INDIA-BRAZIL CHAMBER. **Consumo per capita de aço na Turquia**. Disponível em: <<http://www.indiabrazilchamber.org/en/?p=2990>>. Acesso em: 20 jul. 2012, 23:10:00.

INEA a. **Cobrança pelo Uso da Água**. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/mais/financeiro.asp>>. Acesso em: 13 jul. 2012, 21:30:00.

INEA b. **Resolução/CERHI-RJ nº 18 de 08 de novembro de 2006**. Disponível em: <[http://www.inea.rj.gov.br/cerhi/res\\_18.asp](http://www.inea.rj.gov.br/cerhi/res_18.asp)>. Acesso em: 20 jul. 2012, 20:40:00.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Indústria do Aço e o Mercado**. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder\\_Aco\\_Brasil\\_2012\\_Institucional.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder_Aco_Brasil_2012_Institucional.pdf)>. Acesso em: 09 jul. 2012, 18:15:00.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 16 jul. 2012, 09:30:00.

IPCC. **Iron and Steel Production**. Industrial Emissions Directive. European Commission, 2010.

IRON AND STEEL INDUSTRY. **Iron and Steel Production**. Disponível em: <<http://www.docin.com/p-230127105.html>>. Acesso em: 09 jul. 2012, 17:00:00.

JOHNSON, Rick. **Water Use in Industries of the Future: Steel Industry**. Washington, D.C: U.S. Department of Energy, jul. 2003.

KEFAN MACHINERY. **Active Lime Process Flow Chart**. Disponível em: <[http://www.kf-rotarykiln.com/html/Product/Active\\_Lime\\_Equipment/active-lime-process-flow-chart.Html](http://www.kf-rotarykiln.com/html/Product/Active_Lime_Equipment/active-lime-process-flow-chart.Html)>. Acesso em: 09 jul. 2012, 15:27:00.

KIM, J. *et al*, “A simultaneous optimization approach for the design of wastewater and heat exchange networks based on cost estimation”, *Journal of Cleaner Production*, 17, 162-171, 2009.

LIU, Z.-Y., ZHANG, J.Z., HU, L., WU, Z., “Wastewater minimization using a heuristic procedure”, **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, 2, 1-10, 2004.

LIU, Y.J., YUAN, X.G., LUO, Y.Q., “Improved concentration interval method for synthesis of water utilization network”, **Process System Engineering**, Seoul, Korea, 2005.

MACEDO, Jorge. **Águas & Águas**. 3 ed. Minas Gerais: CRQ-MG, 2007.

MACHADO, Marcelo. **Siderurgia para Não-Siderurgistas**. Espírito Santo: ABM, 2003.

MALYNOWSKYJ, Antonio. **Introdução à Siderurgia**. 1 ed., Fabricação de Aço Líquido em Conversor a Oxigênio, São Paulo: ABM, 2007.

MANAN, Z.A., TAN, Y.L., FOO, D.C.Y., “Targeting the minimum water flowrate using water cascade analysis technique”, **AIChE Journal**, 50, 3169-3183, 2004.

MANCUSO, P.C.S. **Reúso de Água para Torres de Resfriamento**, 2002. Disponível em: <<http://www.bvs-sp.fsp.usp.br/tecom/docs/2001/man001.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2012, 19:45:00.

MARQUES, S.V., **Minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos – Estudos de Casos**, Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Histórico Institucional**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/o-ministerio/historico-institucional>>. Acesso em: 17 abr. 2012, 20:20:00.

MIRRE, R.C., **Recuperação e Reúso de Água na Indústria de Petróleo: Síntese de Redes de Transferência de Massa**, Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

MOURÃO, José Murilo. **Minério de Ferro e Pelotas – Situação Atual e Tendências 2025**. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico. Brasília, 2008. Disponível em: <[http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011\\_4\\_19\\_9\\_7\\_29\\_2193\\_1.pdf](http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_19_9_7_29_2193_1.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2011, 20:20:00.

MOURÃO, Marcelo Breda. **Introdução à Siderurgia**. 1 ed., Redução de Minérios de Ferro por Redução Direta e Processos Alternativos, São Paulo: ABM, 2007.

ONU. **Declaração Universal dos Direitos da Água**. U.S., Organização das Nações Unidas, mar. 1992.

PERLINGEIRO, C.A.G. **Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. 1 ed., São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2005.

QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., “Water source diagram procedure: wastewater reduction for single contaminant”, **Paper presented in the Ninth Conference on Process Integration, Modeling and Optimisation for Energy Saving and**

**Pollution Reduction (PRES 2006) in conjunction with 17th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA)**, Praha, Czech Republic. 2006.

REVISTA PORTOS E NAVIOS. **Consumo per capita de aço na China**. Disponível em: <<http://www.portosenavios.com.br/site/noticias-do-dia/geral/17396-setor-de-quer-incentivo-ao-consumo-de-aco-nacional>>. Acesso em: 20 jul. 2012, 21:07:00.

RIO DE JANEIRO. **Lei Estadual nº 3.239, de 02 de agosto de 1999**. Disponível em: <[http://www.inea.rj.gov.br/l\\_estadual/lei3239.asp](http://www.inea.rj.gov.br/l_estadual/lei3239.asp)>. Acesso em: 15 jul. 2012, 21:05:00.

RIO DE JANEIRO. **Lei nº 4.247, de 16 de dezembro de 2003**. Disponível em: <[http://www.inea.rj.gov.br/l\\_estadual/lei4247.asp](http://www.inea.rj.gov.br/l_estadual/lei4247.asp)>. Acesso em: 15 jul. 2012, 20:20:00.

RIO DE JANEIRO. **Lei nº 5.234, de 05 de maio de 2008**. Disponível em: <[http://www.inea.rj.gov.br/l\\_estadual/lei5234.asp](http://www.inea.rj.gov.br/l_estadual/lei5234.asp)>. Acesso em: 11 abr. 2012, 21:30:00.

RIZZO, E.M.S., **Processo de fabricação de ferro gusa em alto forno**. 1 ed., São Paulo: Ed. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2009.

SANTOS, R.P., **Extensão e automatização do Diagrama de Fontes de Água usado no gerenciamento e redução do consumo de água em plantas industriais**, Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, R.P., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., **MINEA – Minimização de Efluentes Aquosos**, 2006.

STEEL UNIVERSITY. **Steel**. Disponível em: <<http://www.steeluniversity.org/>>. Acesso em: 10 jun. 2012, 21:30:00.

SUVIO, P. **Water management for sustainable steel industry**. Ironmaking & Steelmaking, V. 39, N. 4, Maio 2012, pp. 263-269. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/ias;jsessionid=2eeql7bev2ldp.alexandra>>. Acesso em: 24 jul. 2012, 19:30:00.

ULRICH, G. D., VASUDEVAN, P.T., “How to Estimate Utility Costs”, **Chemical Engineering**, 4, 66-69, 2006.



UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **In Defence of the Environment, Putting Poverty to the Sword**. Disponível em: <<http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?ArticleID=3810&DocumentID=288>>. Acesso em: 16 jul. 2012, 20:20:00.

US EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Emission Factor Documentation for AP-42**. Section 12.2. Coke production. Draft July 2001, U.S., 2001, p. 313.

USS – UNITED STATES STEEL. **The making, shaping and treating of steel**. 10 ed., Association of Iron and Steel Engineers (AISE), USA: Pittsburgh, Pennsylvania, 1985.

VIZAGSTEEL. **Blast Furnace**. Disponível em: <<http://www.vizagsteel.com/code/Infrastr/bf.asp>>. Acesso em: 23 jul. 2012, 13:33:00.

WANG, Y.P., SMITH, R., “Wastewater minimisation”, **Chemical Engineering Science**, 49, 981-1006, 1994.

WANG, Y.P., SMITH, R., “Wastewater minimization with flowrate constraints”, **Transactions of the Institute of Chemical Engineers**, Part A, 73, 889-904, 1995a.

WANG, Y.P., SMITH, R., “Time pinch analysis”, **Transactions of the Institute of Chemical Engineers**, Part A, 73, 905-914, 1995b.

WIKIMEDIA, Disponível em: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/GermanyFirstBlastFurnaceMiniatuDM.jpg> Acesso em: 13 jun. 2012, 20:45:00.

WSA – WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel**. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/>>. Acesso em: 10 jul. 2012, 19:45:00.

YOKOJI, Akira. **Introdução à Siderurgia**. 1 ed., Produtos Siderúrgicos, São Paulo: ABM, 2007.