



# APLICAÇÃO DE MODELO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO PARA O REÚSO DE EFLUENTES EM SIDERURGIA

Mariana de Souza dos Santos

## **Projeto de Final de Curso**

### **Orientadores**

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Reinaldo Coelho Mirre, D.Sc.

**Junho de 2017**

# **APLICAÇÃO DE MODELO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO PARA O REÚSO DE EFLUENTES EM SIDERURGIA**

Mariana de Souza dos Santos

Projeto de Final de curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de engenheiro químico.

Aprovado por:

---

Prof. Carlos Augusto G. Perlingeiro, D.Sc.

---

Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

---

Nathália Oliveira dos Santos, M.Sc.

Orientado por:

---

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

---

Reinaldo Coelho Mirre, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ- Brasil

Julho de 2017

## CIP - Catalogação na Publicação

d194a de Souza dos Santos, Mariana  
Aplicação de modelo de gerenciamento integrado para o reúso de efluentes em siderurgia / Mariana de Souza dos Santos. -- Rio de Janeiro, 2017.  
65 f.

Orientador: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.  
Coorientador: Reinaldo Coelho Mirre.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2017.

1. Siderurgia. 2. Reúso de águas e efluentes .  
3. Integração de Processos . 4. Projeto Final. I.  
Luiz Pellegrini Pessoa, Fernando , orient. II.  
Coelho Mirre, Reinaldo , coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Aos meus pais,  
Que sempre me apoiaram e incentivaram,  
A vocês minha eterna gratidão.

*“ Nunca me deixes esquecer  
Que tudo o que tenho  
Tudo o que sou, e o que vier a ser  
Vem de Ti, Senhor ”*  
(Vem de Ti, Diante do Trono)

## AGRADECIMENTOS

Ao autor da minha fé, ao invisível aos olhos, mas sensível no coração, obrigada Deus por realizar meu sonho de menina de concluir a graduação na UFRJ. Por todas as vezes que sua presença foi o gás final em vésperas de provas e a sua paz foi à tranquilidade nos dias em que mais precisei. A ti a honra, glória e louvor.

Aos meus pais Willian e Elenice, que muitas vezes postergaram os seus sonhos para que eu e meus irmãos vivêssemos os nossos. Sem vocês eu nada seria. Obrigada por todo incentivo, amor, broncas. Esta vitória é tão de vocês quanto é minha.

Aos meus irmãos, Gabriel e Letícia, que tiveram paciência quando eu estava estressada, que me impulsionaram, sem ao menos saber, a prosseguir nessa longa jornada. Obrigada pelo silêncio quando precisei escrever, pelas palavras, pelos abraços, obrigada por tudo.

Ao meu namorado Leonardo pelo apoio incondicional durante os últimos períodos da graduação, pelos lanches depois dos dias exaustivos em que dedicava tempo para esse projeto e por todas as vezes em que sua presença me deu forças para continuar

A toda minha família que compreendeu a ausência em muitas reuniões familiares. Obrigada pelas suas orações. Em especial deixo meu agradecimento a minha avó Tereza (*in memoriam*) que mesmo possuindo pouquíssimo estudo sempre me incentivou.

Aos meus amigos de graduação, aos meus queridos mestres destacando-se o Dsc. Reinaldo pelo acompanhamento em todo o decorrer deste trabalho, muitíssimo obrigada pela paciência, por todas as correções e reuniões e ao prof. Fernando Pellegrini pela disposição de orientar e agregar conhecimento.

Agradeço aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e contribuição.

Resumo de Projeto de Final de Curso, apresentado a Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de engenheiro químico.

## **APLICAÇÃO DE MODELO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO PARA O REÚSO DE EFLUENTES EM SIDERURGIA**

Mariana de Souza dos Santos

Julho de 2017

Orientadores: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Reinaldo Coelho Mirre, D.Sc.

O uso racional dos recursos naturais e a recente crise de abastecimento da água colocam em evidência a necessidade de se buscar medidas para o uso responsável e controlado dos recursos hídricos. O aumento de demanda, principalmente em grandes cidades, sobrecarrega as fontes de abastecimento público, levando as indústrias a reajustar o padrão de consumo de suas atividades. O uso de procedimentos sistemáticos e técnicas de otimização para resolver este tipo de abordagem constitui uma das principais contribuições da área de Integração de Processos Químicos. Um modelo de gerenciamento do uso da água em processos industriais é o chamado P+ÁGUA, elaborado para a tomada de decisão quanto à identificação de oportunidades de reúso e/ou reciclo de correntes em processos químicos, sustentado no tripé (i) Produção mais Limpa, (ii) método de Integração de Processos, e (iii) valor de impacto ambiental de descarte de efluentes. O modelo utiliza o método algorítmico-heurístico Diagrama de Fontes de Água (DFA), voltado para a síntese de redes de águas pela realocação de correntes de água com máximo reúso. Este trabalho tem como objetivo gerar redes de águas e selecionar aquelas consideradas promissoras para estudos de viabilidade de implantação. Para tanto, foi utilizado um estudo de caso representativo de uma indústria siderúrgica aonde foi realizado o balanço hídrico. Com os dados de vazão e concentração do contaminante relevante ao processo, gera-se o fluxograma base e os balanços hídricos para a aplicação do procedimento de filtragem de cenários do modelo P+ÁGUA. Os resultados obtidos mostram que nem sempre o critério de menor custo total da rede de água indica a melhor opção de cenário, uma vez que outros fatores, como o próprio realinhamento de correntes, e a análise complementar do valor do impacto ambiental, também interferem na avaliação. Verifica-se a flexibilidade do modelo como avaliação preliminar e alternativa para o gerenciamento do reúso sustentável em processos industriais. Assim, espera-se que a abordagem contribua para o alcance de resultados com maior praticidade, envolvendo cenários numerosos e complexos, e inserida no contexto de prevenção da poluição e de uso racional da água.

## Sumário

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos e apresentação dos capítulos.....	3
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1 Indústria siderúrgica .....	4
2.1.1 Breve histórico e panorama da produção .....	4
2.1.2. O processo siderúrgico .....	6
I. Preparação da carga.....	8
II. Redução.....	12
III. Conversão e refino.....	14
IV. Lingotamento .....	14
V. Laminação e acabamento.....	15
VI. Unidades auxiliares .....	15
2.2 P+ÁGUA: Um modelo para o gerenciamento sustentável do uso racional da água em processos químicos .....	16
2.2.1. DFA – Uma ferramenta para geração de rede de águas .....	17
I. O procedimento algorítmico.....	19
2.2.2 Etapas da metodologia para a integração mássica com o DFA.....	22
I. Etapas para seleção de cenários promissores .....	23
3. Metodologia .....	27
3.1. Descrição da metodologia implementada .....	27
3.2. Estudo de caso .....	29
4. Resultados e discussão .....	32
4.1. Descrição dos cenários.....	37
4.2 Resultados da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica .....	43
4.3 Discussão dos resultados .....	45
5. Conclusões e sugestões .....	48
6. Referências bibliográficas .....	49
Apêndices .....	52
Anexos.....	59



## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Distribuição da produção de Aço Mundial (WSA, 2016) .....	5
Figura 2.2 - Os 10 maiores produtores mundiais (WSA, 2016) .....	5
Figura 2.3 - Distribuição do Aço no País (IABr, 2016) .....	6
Figura 2.4 - Fluxo Simplificado de produção (IABr, 2016) .....	7
Figura 2.5 - Aspersão de água em pátio de matéria-prima (ARCELORMITTAL TUBARÃO 2016) .....	9
Figura 2.6 - Instalações constituintes dos altos fornos (IASI, 2012) .....	13
Figura 2.7 - Representação do modelo integrado de reúso sustentável (P+ÁGUA) (MIRRE, 2012) .....	16
Figura 2.8 - Representação do Diagrama de Fontes de Água .....	21
Figura 2.9 - Exemplo de rede de água obtida com os dados da aplicação do DFA (GOMES, 2002) .....	21
Figura 2.10 - Procedimento de cálculo para seleção de cenários com oportunidades de reúso (MIRRE, 2012) .....	24
Figura 3.1 - Esquema ilustrativo da metodologia aplicada neste trabalho .....	27
Figura 4.1 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário base .....	33
Figura 4.2 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário base simplificado .....	34
Figura 4.3 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 1 .....	37
Figura 4.4 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 2 .....	38
Figura 4.5 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 3 .....	39
Figura 4.6 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 4 .....	40
Figura 4.7 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 5 .....	41
Figura 4.8 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 6 .....	42
Figura 4.9 - Vazão de captação da água .....	45
Figura 4.10 - Custo operacional anual .....	46
Figura 4.11 - Custos associados aos cenários promissores (R\$/ano) .....	47
Figura 4.12 - Redução nos percentuais .....	47

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Dados limites do problema exemplo de máximo reuso e único contaminante. Fonte: Wang e Smith (1994a) .....	21
Tabela 3.1 - Coeficientes da equação de cálculo de custo de tratamento de água e efluentes (ULRICH E VASUDENAN, 2006) .....	29
Tabela 4.1 - Dados do processo simplificado.....	35
Tabela 4.2 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma base simplificado.....	36
Tabela 4.3 - Dados para aplicação do modelo P+ÁGUA.....	43
Tabela 4.4 - Primeira da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica.....	43
Tabela 4.5 - Segunda etapa da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica .....	44
Tabela 4.6 - Quarta etapa da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica ..	44
Tabela 4.7 - Quinta etapa da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica ..	45
Tabela 4.8 - Sexta etapa da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica ....	45
Tabela A.0.1 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 1 .....	53
Tabela A.0.2 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 2 .....	54
Tabela A.0.3 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 3 .....	55
Tabela A.0.4 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 4 .....	56
Tabela A.0.5 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 5 .....	57
Tabela A.0.6 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 6 .....	58

## 1. Introdução

A água, além de ser a molécula mais abundante da terra, também é responsável pelo equilíbrio funcional e pela manutenção de vida no Planeta. Não existe nenhum processo metabólico que ocorra sem a participação da água, seja de forma direta ou indireta. Cerca de 2/3 da superfície do Planeta é coberto por água; entretanto, 97,5% correspondem a água salgada e apenas 2,5% é composto por água doce. Deste percentual, 68,9% encontram-se congelados na Antártica, no Ártico e em geleiras, 29,9% são de águas subterrâneas, 0,9% estão na umidade do solo, nos pântanos e nas geadas e apenas 0,3% estão em rios e lagos. (BARROS, 2005).

A negligência do ser humano em relação ao meio ambiente culminou em diversos danos tais como a contaminação de solos e corpos hídricos, a deterioração de vegetações, a degradação progressiva da atmosfera terrestre e a escassez de recursos naturais (SCARLATI, 2013).

Ademais, problemas como a distribuição irregular de água e o seu desperdício, associados ao aumento populacional e ao crescimento do setor industrial contribuem para que esse recurso natural se torne mais escasso a cada dia.

Em 2014, cerca de 700 milhões de pessoas em 43 países estavam vivendo em condições de falta d'água. Ademais, prevê-se que 1,8 bilhão de pessoas viverão em países ou regiões com escassez de água absoluta em 2025. (ODLARE, 2014).

Segundo a FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação), dentre os ramos que utilizam água destacam-se o setor industrial, consumindo cerca de 19% de toda a água doce do mundo. No Brasil, esse percentual é cerca de 17% (FAO, 2012). O crescimento do setor industrial nos países está diretamente atrelado ao seu consumo. Estima-se que até 2025 a captação total de água aumentará em 50% em países em desenvolvimento e 18% em desenvolvidos. (ONU, 2014).

Um dos setores que mais utilizam água é a indústria siderúrgica. Na siderurgia, é possível dividir em três grandes objetivos a utilização da água: (i) para transferência de calor; (ii) para controle de poluição do ar e condicionamento de gases; e (iii) para condicionamento de matérias.

No Brasil, por conter cerca de 15 % de toda a água doce disponível no mundo, não havia uma grande preocupação com o uso desmedido da mesma. Contudo, as recentes crises hídricas vividas no Sudeste em 2015 fomentaram novas discussões sobre o uso

racional dela. Frente à ameaça de interrupção do abastecimento, surgem pressões pela economia no consumo tanto doméstico quanto industrial. Em meio à crise de 2015, o Governo do Estado do Rio de Janeiro anunciou a possibilidade de criação de uma lei que obrigue empresas de grande porte a reusarem efluentes aquosos (REUTERS BRASIL, 2015).

Tendo em vista todo este panorama, o Comitê de Bacias Hidrográficas, que são organismos colegiados que fazem parte do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e existem no Brasil desde 1988, tem como suas principais competências estabelecer mecanismos e sugerir os valores da cobrança pelo uso da água e pelo descarte de efluentes nos corpos hídricos (ANA, 2016).

Dada a importância deste bem, é crescente o número de pesquisas que envolvem métodos sistemáticos de reúso, reciclo e regeneração de correntes hídricas tendo como objetivo o melhor aproveitamento deste recurso natural. Segundo o IABr (Instituto do Aço Brasil, 2016), em 2015, empresas do setor siderúrgico investiram cerca de 1,3 bilhão de reais em projetos de pesquisa que envolvem principalmente recirculação de água, conservação de energia, reaproveitamento de resíduos e redução de emissão.

O uso de procedimentos sistemáticos e técnicas de otimização para resolver este tipo de abordagem constitui uma das principais contribuições da área de Integração de Processos Químicos. Entende-se como Integração de Processos Químicos toda análise e otimização de processos industriais através da interligação de processos. Portanto, todas as melhorias feitas para sistemas de processo, suas operações unitárias constituintes, e suas interações para maximizar o uso eficiente de energia, água e matérias-primas constituem este ramo.

Um modelo de gerenciamento do uso da água em processos industriais é o chamado P+ÁGUA (MIRRE et al., 2009; MIRRE et al., 2012), elaborado para a tomada de decisão quanto à identificação de oportunidades de reúso e/ou reciclo de correntes em processos químicos, sustentado no tripé (i) Produção mais Limpa, (ii) método de Integração de Processos, e (iii) valor de impacto ambiental de descarte de efluentes.

O método de Integração de Processos é realizado através do método algorítmico-heurístico Diagrama de Fontes de Água (DFA) (GOMES et al., 2013). Essa metodologia é baseada na Tecnologia *Pinch* (Tecnologia do Ponto de Estrangulamento) onde apresenta uma técnica de análise sistemática de dados de processos baseados em fundamentos termodinâmicos e de transporte.

A partir de diferentes cenários obtidos com o DFA, o modelo procura por oportunidades promissoras de reúso e/ou reciclo de correntes, considerando custos de água operacional e de investimento em processos regenerativos.

### **1.1. Objetivos e apresentação dos capítulos**

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral selecionar cenários de reúso considerados promissores para estudos de viabilidade de implantação em processos industriais, por meio de um modelo integrado de gerenciamento do uso da água. Para tanto, os objetivos específicos são:

- Aplicar um estudo de caso com os dados representativos de processos da indústria siderúrgica;
- Elaborar os diagramas de blocos (fluxogramas) a partir de cenários de reúso obtidos previamente com o método diagrama de fontes água (DFA);
- Realizar o balanço hídrico dos cenários de reúso;
- Aplicar uma ferramenta de seleção de cenários que compõe um modelo de gerenciamento do uso da água.

Tendo como motivação a importância não só do uso racional da água, bem essencial a vida, mas o máximo aproveitamento, espera-se que a abordagem reafirme a importância do método algorítmico-heurístico para a integração de processos; e contribua para o alcance de resultados com maior praticidade, envolvendo cenários numerosos e complexos, inserida no contexto de prevenção da poluição e de uso racional da água.

O texto está estruturado da seguinte forma:

**CAPÍTULO 2** - revisão bibliográfica dividida em duas partes: breve descrição dos processos siderúrgicos que vai desde as operações que o compõe até as principais formas de tratamento de efluentes gerados e abordagem sobre o DFA com uma explanação sobre o modelo P+ÁGUA.

**CAPÍTULO 3** - descrição da metodologia empregada neste trabalho.

**CAPÍTULO 4** - expõem-se e discute-se os resultados obtidos.

**CAPÍTULO 5** - apresenta às conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1 Indústria siderúrgica

#### 2.1.1 Breve histórico e panorama da produção

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. 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).

O desenvolvimento na produção de ferro é tão importante para a sociedade que, dentro da história da humanidade, existe um período conhecido como “Idade do Metal”. Época em que houve a substituição do bronze pelo ferro produzido em fornos primitivos denominados fornos de lupas, garantindo aos materiais maior dureza e mais resistência à corrosão do que os fabricados em bronze (NAVARRO, 2006). A partir de então, houve muitas mudanças na forma de exploração do ferro, até que se chegou aos moldes da indústria conhecidos hoje.

A progressão da exploração do ferro passou por um período de produção em forma pastosa para forma líquida, o que permitiu o surgimento da técnica de fundição. A partir desta, uma gama de novos utensílios pôde ser feita a base de ferro. A técnica de fundição era realizada a partir da utilização de altos fornos. O alcance de altíssimas temperaturas resultou na produção de aço, que é uma liga de ferro com maior resistência ao desgaste, à corrosão, ao impacto e maior dureza. Tais características, alinhadas ao baixo custo, resultou que o aço representou aproximadamente 90% de todos metal consumidos na revolução industrial (FRANÇA, 2012).

Historicamente, a produção de aço é um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país. Seu consumo cresce proporcionalmente à construção de edifícios, execução de obras públicas, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos. (IABr, 2016)

Atualmente, o maior produtor de aço é a China, produzindo o equivalente a quase metade da produção mundial (WSA, 2016). De acordo com o relatório divulgado pela *World Steel Association* (WSA, 2016), referente ao ano base de 2015 foram produzido 1,621 bilhão de toneladas de aço bruto.

A China, dado seu rápido crescimento, foi o país com maior crescimento na participação da produção mundial. Nos últimos 10 anos, sua participação aumentou mais de 15%. O percentual, que em 2005 era de 31%, aumentou para 49,6% em 2015, culminando no aumento da participação da Ásia. Em contrapartida, todos os demais continentes diminuíram sua produção. Fato que pode ser explicado pela grave crise econômica mundial ocorrida nos últimos anos. (WSA, 2016)

A distribuição da produção mundial de aço pode ser observada na Figura 2.1.

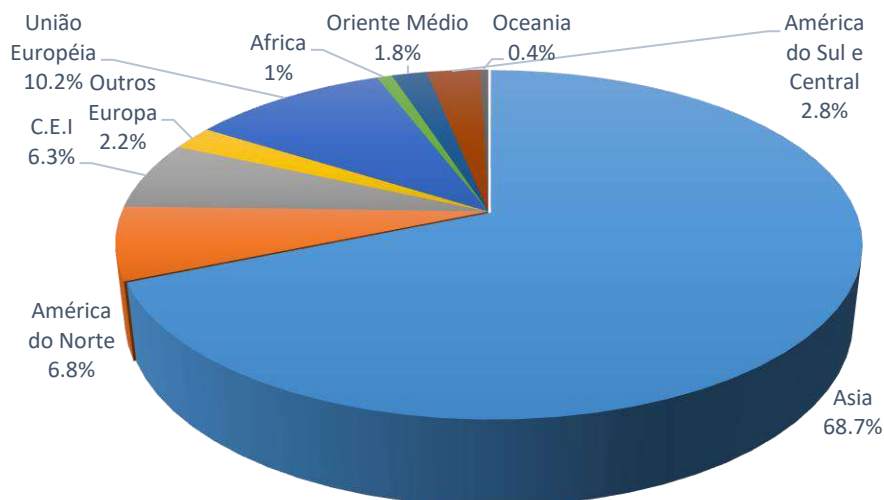


Figura 2.1 - Distribuição da produção de Aço Mundial (WSA, 2016)

Na Figura 2.2 observa-se os dez maiores países produtores de aço no mundo. O Brasil, que ocupa a 8ª posição, é o único representante da América do Sul.

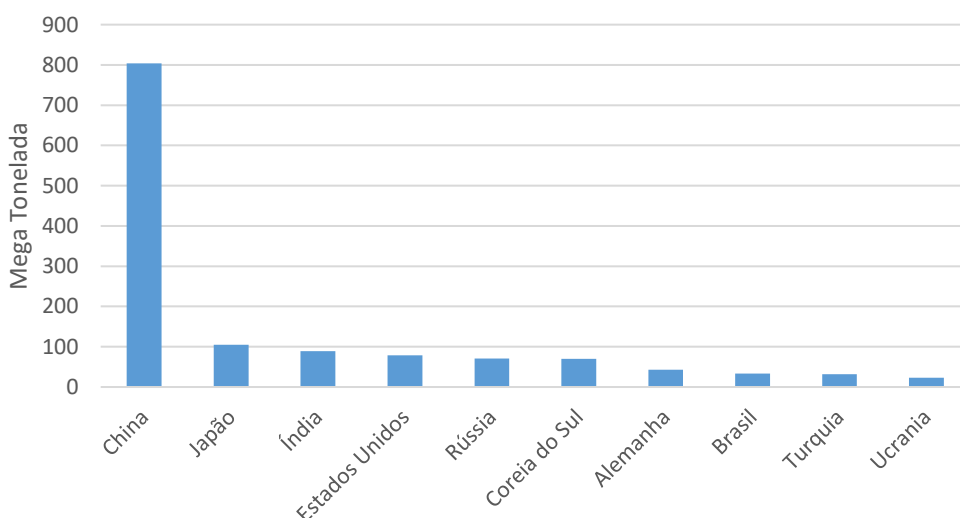


Figura 2.2 - Os 10 maiores produtores mundiais (WSA, 2016)

Sobre a produção brasileira, é imprescindível destacar que o aumento da competitividade se iniciou na década de 1990, após a privatização do setor. Por meio da privatização, um grande afluxo de capitais gerou a modernização das indústrias siderúrgicas. Além disso, muitas empresas passaram a fazer parte de um parque industrial no qual há a integração com outras indústrias, com o objetivo de alcançar a economia de escala e tornar-se competitivo (IABr, 2015)

Segundo o IABr (2015) o setor siderúrgico do Brasil é composto por 29 usinas administradas por 11 grupos empresariais. As fábricas estão instaladas em 10 estados do território brasileiro, têm uma capacidade instalada total de 48,9 milhões de toneladas/ano de aço bruto, empregam mais de 110 mil trabalhadores e exportam para mais de 100 países.

O aço é utilizado nas mais variadas indústrias, com diferentes aplicações. As diversas aplicações do aço no país podem ser observadas na Figura 2.3.

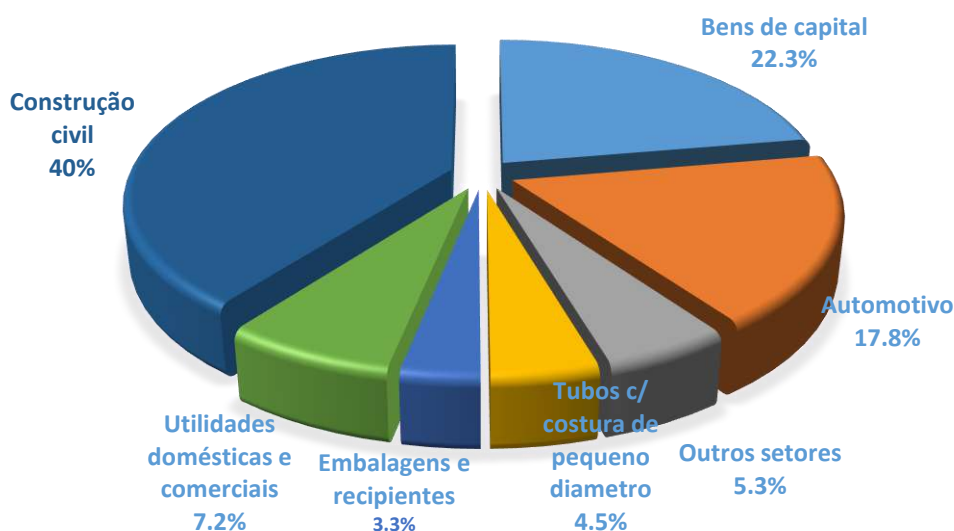


Figura 2.3 - Distribuição do Aço no País (IABr, 2016)

Em um estudo de prospecção do setor, a siderurgia brasileira, em relação à mundial, estará sendo suprida com os minérios mais puros existentes no mercado e poderá tirar partido dessa condição para aumentar a sua produtividade e competitividade (ABM, 2008).

### 2.1.2. O processo siderúrgico

O aço é um dos materiais mais reciclados do mundo, por permitir sua total reutilização. Por isso, existem dois tipos de processos siderúrgicos para atender as duas



diferentes demandas. Um deles, o processo integrado, tem como matéria-prima o minério de ferro e é composto, basicamente, por três fases básicas: redução, refino e laminação (IABr, 2016).

Em contrapartida, o processo semi-integrado tem como matéria-prima as sucatas de ferro, ou seja, não é necessário a etapa de redução. Assim, este é composto pelas etapas de refino e laminação (IABr, 2016)

No presente trabalho, o enfoque será no processo integrado, por ser mais complexo e requerer maior atenção para minimizar tanto o consumo de água como a geração de efluentes. Além de ser composto por três etapas, pode-se dividir a produção em cinco grandes blocos como pode ser visto na Figura 2.4.

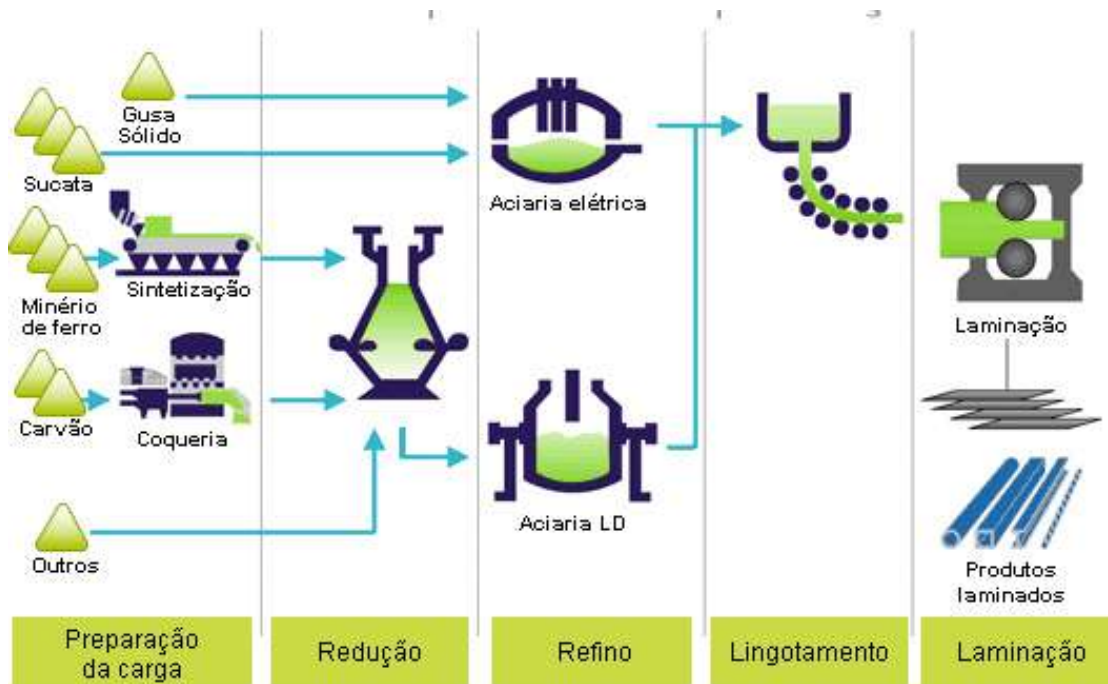


Figura 2.4 - Fluxo Simplificado de produção (IABr, 2016)

As operações onde o consumo de água é expressivo são na coqueificação, na laminação, na redução e na conversão, que é parte integrante da unidade de aciaria no refino.

Johnson (2003) relatou que as unidades responsáveis pela troca de calor utilizam cerca de 75% da água. Entretanto, Suvio (2012) ao avaliar os dados de gerenciamento do consumo de água em 29 usinas siderúrgicas, observou que o consumo de água 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.

Dessa forma, entende-se que grande parte da água é utilizada para trocar calor. Nas indústrias este processo é realizado em ciclo semi-aberto, possibilitando o reciclo e captando somente a quantidade de água que, eventualmente, foi perdida por respingos e evaporação; e a necessária para manter o ciclo de concentração constante, ou seja, a água destinada a purgas no sistema (FRANÇA, 2012).

Contudo, os outros processos precisam ser estudados para a total minimização do consumo de água e da geração de efluentes.

A seguir será explicado de maneira simplificada o processo siderúrgico e como ocorre cada etapa do processo produtivo.

## I. Preparação da carga

A preparação de cargas engloba as seguintes operações: armazenamento e beneficiamento de matérias-primas; armazenamento e beneficiamento de carvão e coque; calcinação; coqueificação; carboquímica e sinterização.

- **Armazenamento e beneficiamento de matérias-primas:**

As matérias-primas chegam, geralmente, no complexo siderúrgico pelo transporte marítimo e/ou ferroviário. Pelas grandes quantidades o transporte rodoviário dificilmente é utilizado. Entende-se como matéria-prima o minério de ferro, fundentes e escorificantes, como o calcário, o dolomito e a fluorita, cuja principal função é 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 são armazenadas em grandes pátios que contêm pistas com retomadoras e correias transportadoras que, posteriormente, irão conduzi-las aos silos de armazenamento para o beneficiamento. O armazenamento é feito em pilhas que precisam ser pulverizadas com água para garantir que não haja aspersão de material sólido particulado pelo vento (ARCELORMITTAL TUBARÃO 2016).

É recomendado que esses pátios possuam sistemas de drenagem para reaproveitamento da água pluvial. No mais, estes sistemas também possibilitariam o reúso da água utilizada para pulverização. Dessa forma, a captação de água limpa e o descarte de efluentes seriam minimizados. Entretanto, antes da água ser reusada é preciso passá-la por um decantador para retirar as partículas sólidas imersas nela. Contudo, cabe observar que a remoção alcançada apenas com a bacia de decantação é limitada, mesmo quando esta é bem projetada e operada (ARAÚJO, 1997).

Assim, a utilização de tratamentos mais sofisticados possibilitaria uma reutilização ainda maior. Um tratamento muito utilizado para a remoção de metais pesados é o físico-químico, que tem as etapas de coagulação, floculação e sedimentação. Sabe-se que a coagulação só acontece em certas faixas de pH, o que demanda estudos para a viabilização do método.



*Figura 2.5 - Aspersão de água em pátio de matéria-prima (ARCELORMITTAL TUBARÃO 2016)*

Dados obtidos de uma siderúrgica mostram que a vazão utilizada nesta etapa é de 379 ton/h, valor expressivo se comparado com outros processos industriais, mas pouco expressivo se comparado com outras etapas da siderurgia. Os efluentes líquidos dos pátios de matérias primas apresentam uma concentração média de 73 mg/L de SST (sólidos suspensos totais) e o tratamento proporcionado pela bacia de decantação é suficiente para a redução desta concentração para 22 mg/L SST (FRANÇA, 2012).

É necessário deixar claro que o parâmetro SST foi o único a ser levado em consideração no presente trabalho pois se apresenta como o mais significativo parâmetro global para controle e monitoramento, devido às características dos processos siderúrgicos (UNITED STATES STEEL, 1985). Contudo, outros parâmetros importantes para controle são DQO (demanda química de oxigênio), ferro, materiais sedimentáveis, pH e temperatura.

Se considerado o tratamento físico-químico, a concentração de SST pode ser reduzida ainda mais, para 10 mg SST/L. Porém, destaca-se que para aplicação de tal tratamento é necessário controle de pH.

- **Armazenamento e beneficiamento de carvão e coque:**

O processo de armazenamento e beneficiamento de carvão é muito similar ao descrito anteriormente. A principal diferença é que as matérias primas são direcionadas para a unidade de sinterização e calcinação, e o carvão é direcionado para uma unidade conhecida como coqueria na qual a principal função é transformar o carvão em coque. O coque é utilizado na manutenção das altas temperaturas nos fornos e para a reação de redução do minério (ARAÚJO, 1997).

A utilização de água também é dada pela necessidade de pulverização. Mesmo com os efluentes líquidos apresentando características distintas, a composição de sólidos em suspensão totais é quase 20% maior do que a registrada na operação anterior, com uma concentração de 87 mg SST/L. A vazão utilizada é 82 ton/h, consideravelmente menor do que a utilizada acima (FRANÇA, 2012).

Com o tratamento de decantação é possível reduzir os SST para 19 mg/L o que também possibilita a recirculação (FRANÇA, 2012).

Como as características dos efluentes são distintas, além dos parâmetros de controle mencionados acima, deve-se monitorar a presença de cianetos, fenol, manganês, nitrogênio amoniacal e sólidos dissolvidos totais.

- **Calcinação**

A calcinação é o processo em que ocorre a transformação do calcário em Óxido de Cálcio, também conhecido como Cal, com liberação de gás carbônico. É composto por algumas etapas, dentre as quais se destacam a britagem, para aumentar a superfície de contato, e calcinação do calcário, que é o aquecimento a altas temperaturas em fornos rotativos, onde ocorre a decomposição em cal e CO<sub>2</sub>.

A água neste processo é utilizada para a hidratação da cal virgem e para a aspersão para abatimento a úmido de material particulado no descarregamento. A vazão necessária para suprir tais atividades é de 23 ton/h. O efluente gerado apresenta 38mg SST/ (FRANÇA, 2012).

O tratamento em tanques de sedimentação gravitacional seguido de neutralização, dada a alcalinidade dos efluentes gerados, permite diminuir este valor para 14,4 mg SST/L (FRANÇA, 2012).

Outros parâmetros que devem ser controlados são: dureza, sílica, cloretos, DQO, óleos e graxas, metais, materiais sedimentáveis e turbidez.

- **Coqueificação**

Coqueificação é o processo que gera coque. Nele, o carvão é submetido a fornos com elevadas temperaturas, entre 900°C e 1100°C, e com deficiência de oxigênio, com o objetivo de concentrar o carbono. (ARAÚJO, 1997)

O produto desta destilação seca é um 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 o peneiramento, para posterior utilização na sinterização e no alto forno (STEEL UNIVERSITY, 2012).

O coque permite a redução do minério nos altos fornos e é utilizado como fonte de energia para a fusão dos materiais carregados. Segundo a *Iron and Steel Industry* (2015), 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.

Existem dois tipos de processos de coqueificação, que são: (i) coqueificação sem recuperação de coprodutos ou com recuperação de energia e (ii) coqueificação com recuperação de coprodutos. Alguns subprodutos recuperados são amônia e óleos leves (AISI, 2012).

No presente trabalho, o enfoque será na coqueificação com recuperação de coprodutos. Esta escolha deve-se ao fato de que no Brasil a maior parte das indústrias o utilizam, além disso, as plantas que possuem este tipo de processo são as mais antigas, o que implica que as tecnologias nelas aplicadas para o reúso de água são obsoletas por isso são as que precisam de maior enfoque no estudo para minimização de consumo de água.

O principal consumo de água está relacionado à torre de apagamento. A vazão utilizada pode chegar a 807 ton/h, dos quais 161 ton/h são perdidas por evaporação. Os efluentes apresentam 229 mg/L de SST. Este parâmetro pode atingir 69 mg/L depois da sedimentação gravitacional e, atingir concentrações de 11 mg/L se aplicado tratamento físico-químico, floculação seguida por decantação (FRANÇA, 2012).

Parâmetros como pH, temperatura, fenóis, DQO, amônia, cianetos e materiais sedimentáveis também devem ser controlados.

- **Carboquímica**

A unidade carboquímica engloba todos os subprodutos da coqueificação. A principal demanda por água destes subprodutos está associada à necessidade de resfriamento de gases, seja por contato direto ou indireto (FRANÇA, 2012)

Sempre que possível, opta-se por operações que utilizem o contato indireto já que, dessa forma, não há contato entre os gases e a água o que possibilita recirculá-la. Sendo

assim, a captação reduz-se a quantidade perdida pela evaporação, respingos e purgas. (ARAÚJO, 1997)

Dados de uma planta real indicam um consumo de água superior a 5.000 ton/h em relação às operações de resfriamento por contato indireto. Já para operações de contato direto são destinados 90 ton/h de água, contudo este valor pode variar de acordo com o projeto da unidade carboquímica. A concentração é de 46 mg/L de SST no efluente bruto e este valor poderá ser reduzido para 6 mg/L após tratamento biológico (FRANÇA, 2012).

É 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 (FRANÇA, 2012).

- **Sinterização**

Sinterização é um processo de aglomeração no qual a utilização de calor permite transformar uma massa de granulometria fina em carga bitolada. O material sinterizado é mais poroso, o que garante melhor percolação pelos gases no alto forno (ARAÚJO, 1997).

Como o alto forno apresenta limitada tolerância a presença de finos, a etapa de sinterização é responsável por reciclá-los.

A sinterização 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 (FRANÇA, 2012).

A água é utilizada para o resfriamento de equipamentos e como matéria-prima para a elaboração da mistura sinterizada. Dados de uma siderúrgica revelam que o consumo para as operações de resfriamento por contato indireto é da ordem de 800 ton/h. (FRANÇA, 2012).

## II. Redução

As matérias primas preparadas são colocadas nos altos fornos para sofrerem redução. O oxigênio é aquecido a uma temperatura de 1000°C e é soprado pela parte de baixo do alto forno. Para aumentar a eficiência do processo, o coque, o sinter, a pelota e o minério de ferro são alimentados no topo do alto forno. O coque, em contato com o oxigênio, dá início ao processo de redução do minério de ferro (UNITED STATES STEEL, 1985).

O sistema descrito acima pode ser visto na Figura 2.6.

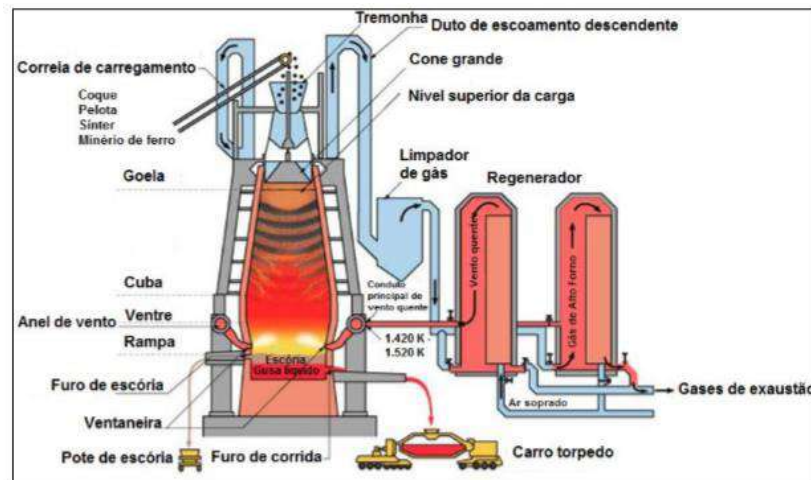


Figura 2.6 - Instalações constituintes dos altos fornos (IASI, 2012)

A redução pode ocorrer de duas formas: direta e indireta. Na primeira não ocorre a fusão da carga no reator, e o produto é um sólido conhecido como ferro esponja. Na segunda ocorre a fusão no reator tendo como produto um metal líquido, o ferro gusa.

Neste estudo será contemplada apenas a redução de forma indireta. O ferro gusa é uma liga de ferro-carbono que será utilizada para a produção de aço.

É importante citar que este processo gera alguns coprodutos importantes, tais como a escória do alto forno, usada na fabricação de cimento, e o gás de alto forno, que pode ser utilizado como combustível na própria siderúrgica. Assim, torna-se possível agregar valor ao resíduo e, conseqüentemente, diminui-se os gastos para dispor dos resíduos gerados (IRON AND STEEL INDUSTRY, 2012).

Os principais pontos de consumo de água no alto forno são o sistema de resfriamento da carcaça do alto forno, que ocorre por contato indireto, na etapa úmida do sistema de limpeza e resfriamento de gases e na granulação de escória, que ocorrem com contato direto (FRANÇA, 2012).

Para uma siderurgia operando com dois altos fornos e capacidade de 5,5 Mtpa, as vazões de água são da ordem de 15000 ton/h. A concentração de SST é de 1400 mg/L podendo ser reduzido para aproximadamente 20 mg SST/L após tratamento em bacia de sedimentação e clarificador, podendo ainda adicionar agentes fluoculantes.

Outros parâmetros que devem ser analisados são: a presença de amônia, cianetos, sulfetos, fenol, materiais sedimentáveis e controle da temperatura (FRANÇA, 2012).

### III. Conversão e refino

A conversão e o refino acontecem em uma unidade denominada aciaria. Nela, o ferro-gusa é convertido em aço, em um equipamento denominado conversor. É posteriormente refinado de acordo com as especificações para cada tipo de aplicação.

No entanto, antes de ir para a aciaria o ferro gusa passa por alguns tratamentos preliminares, como dessiliciação, dessulfuração e desfosforação. Estes tratamentos são necessários para se obter o menor custo na fabricação do aço e a melhor qualidade (MALYNOWSKYJ, 2007).

Dentro deste processo, produz-se a escória de aciaria, que pode ser utilizada como sub-bases para pavimentação de estradas. Outro coproduto importante é o gás de aciaria. Este apresenta um poder calorífico que representa, em média, o dobro do alto forno e a metade do poder calorífico da coqueira (ARAÚJO, 1997). Por este motivo, o gás de aciaria pode ser reaproveitado no próprio complexo siderúrgico como combustível.

Os principais consumidores de água em uma aciaria localizam-se nos equipamentos de resfriamento por contato indireto e limpeza de gases de conversor por contato direto. As vazões são superiores a 7000 ton/h por contato indireto e superiores a 3000 ton/h por contato direto. O parâmetro SST é cerca de 6.000 mg/L no efluente bruto e 70 mg/L após tratamento físico-químico empregando-se tanques de sedimentação, com adição em linha de agentes coagulantes, espaçadores e sistema de desidratação de lamas (FRANÇA, 2012).

Outros parâmetros a serem analisados são sólidos dissolvidos totais, ferro e zinco.

### IV. Lingotamento

No lingotamento ocorre a solidificação do metal líquido aço em um produto semiacabado, denominado lingote, que poderá ser no formato de tarugo, bloco ou placa. (ARAÚJO, 1997)

O processo de lingotamento contínuo pode ser definido pelas seguintes características: o lingotamento é executado para o interior de um molde de extremidades abertas; Peças lingotadas são substancialmente mais compridas que o molde; tamanhos da bitola permitem uma redução mínima em processos subsequentes. (IABr, 2016)

Água é usada para fins de resfriamento por contato indireto, com vazão aproximada de 6000 ton/h, e por contato direto, com vazão maior que 17000 ton/h e SST de 150 mg/L no efluente bruto e 10 mg/L SST no efluente tratado com sedimentação



dotada de raspadores de fundo e de topo 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 (FRANÇA, 2012).

Outro parâmetro importante para controle e monitoramento é óleos e graxas, já que o óleo é usado com propósito de lubrificação.

## V. Laminação e acabamento

A laminação apresenta-se como o principal processo de transformação mecânica do aço, respondendo por uma parcela de 80% do total. Nela, os semiacabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química (GONÇALVES, 2007).

A laminação é a quente, seguida de tratamento térmico e decapagem e depois a frio. Os produtos que seguem para este tratamento são os destinados a aplicações mais nobres que os produtos laminados a quente, sendo utilizados para confecção de produtos que demandam espessuras mais finas, como automóveis e eletrodomésticos (MACHADO, 2003).

Os principais pontos de utilização da água são nos sistemas de resfriamento, e na decapagem e limpeza de laminados, processos que são realizados para o acabamento do produto final. As vazões utilizadas no resfriamento são maiores que 10.000 ton/h com a concentração de SST de 70 e 10 mg/L, respectivamente no efluente bruto e tratado, após processo de sedimentação com flutador (FRANÇA, 2012).

## VI. Unidades auxiliares

Para que todos os processos que utilizam água sejam descritos neste capítulo, é importante citar as unidades que não participam diretamente do processo siderúrgico, mas são imprescindíveis para que a produção do aço seja viável técnico-economicamente. As unidades são as termelétricas e de separação de gases. A demanda de água nestas unidades é exclusivamente para resfriamento, sendo valores de vazão operacional de uma planta típica iguais a, aproximadamente, 40.000 e 8.000 ton/h, respectivamente (FRANÇA, 2012).

## 2.2 P+ÁGUA: Um modelo para o gerenciamento sustentável do uso racional da água em processos químicos

O modelo P+ÁGUA, também denominado de “Gerenciamento Integrado de Processos para o Reúso Sustentável de Águas e Efluentes Industriais”, foi desenvolvido por Mirre (2012) e tem como finalidade auxiliar a tomada de decisão para a escolha da rede de água de máximo reúso de mais viável aplicação.

O modelo baseia-se no tripé econômico – social - ambiental onde a integração ocorre através dos conceitos de produção mais limpa, da integração mássica proporcionada pela aplicação do DFA e da valoração ambiental. A base do modelo é vista na Figura 2.7.

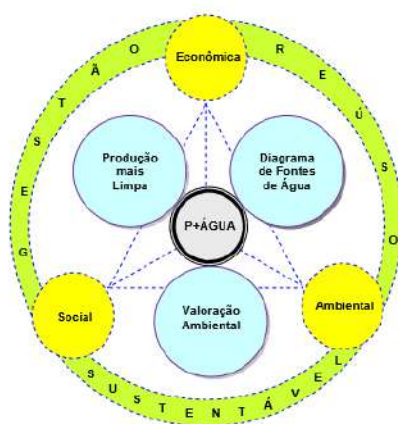


Figura 2.7 - Representação do modelo integrado de reúso sustentável (P+ÁGUA) (MIRRE, 2012)

Um processo industrial comumente leva à formação de resíduos e efluentes, de modo que se torna necessário desenvolver estratégias que permitam reduzir a captação de água e, conseqüentemente, a geração de efluentes industriais. Este conceito está intrínseco na filosofia da produção mais limpa (P+L) que é amplamente aceita como um dos instrumentos que devem ser praticados na direção da sustentabilidade empresarial. (AUDEH, 2015)

Por outro lado, a geração de diversos cenários de plantas com o mínimo consumo de água e a mínima geração de efluentes, por meio de práticas de reaproveitamento sistemático de correntes hídricas é possível por meio do DFA. Este método baseia-se na assimilação da carga mássica de cada contaminante mediante a transferência de espécies de contaminantes de uma corrente de processo para uma corrente aquosa. Para a escolha de cenários considerados promissores, os quais possam subsidiar estudos posteriores para implementação, Mirre (2012) elaborou um conjunto de critérios baseados em conceitos estatísticos, a partir do custo associado a cada cenário avaliado.

Como parte do processo de seleção de cenários, o modelo P+ÁGUA considera o uso de ferramentas de valoração ambiental para complementar a avaliação pelo enfoque social, com métricas que permitam quantificar os impactos ambientais relacionados aos respectivos cenários de reúso. Tal enfoque se torna importante na medida em que possibilita verificar se as alternativas de reaproveitamento hídrico são justificadas não somente pelo aspecto do menor custo privado, mas também à incorporação do seu custo social e ambiental.

### 2.2.1. DFA – Uma ferramenta para geração de rede de águas

Uma forma eficaz de minimizar o uso de água em processos industriais é por meio de métodos que visam estabelecer interconexões nas correntes aquosas. Técnicas para a redução do consumo global de água primária podem ser abordadas por duas vertentes (BAGAJEWICZ, 2000):

1. Métodos com base em programação matemática;
2. Métodos gráficos, procedimentos algorítmicos ou com base em heurísticas.

A primeira categoria é rápida, garante o ótimo se usado um modelo adequado. Porém, muitos pacotes de otimização apresentam dificuldades em encontrar solução de problemas que contenham muitos mínimos locais, dificultando a localização do mínimo global. Já a segunda categoria é aplicável a problemas mais simples e com um contaminante, dada a complexidade envolvida para problemas mais robustos. São baseados na experiência do engenheiro e fundamentos básicos da termodinâmica e conservação de massa, momento ou energia para a síntese e evolução da rede. No entanto, não há garantia de que o resultado obtido seja o ponto ótimo.

Para a segunda categoria existe uma variedade de métodos heurísticos dentre os quais destaca-se o Diagrama de Fontes de Águas (DFA).

O DFA foi desenvolvido por Gomes (2002) a partir dos trabalhos de Wang e Smith (1994b), Wang e Smith (1995) e Castro et al. (1999), aplicando o método para solução de diversos tipos de restrições e considerações.

Wang e Smith (1995) começaram com um problema de máximo reúso de água para um, dois e por fim três contaminantes. Depois, num segundo trabalho (1994b), usaram um sistema de tratamento de correntes de reúso distribuído, em detrimento dos sistemas centralizados que eram usados até então, obtendo menores custos. Ou seja, nesse novo sistema as correntes não mais seguiam misturadas para uma mesma unidade de tratamento.

Por meio de um procedimento algorítmico Gomes (2002) propôs uma sistemática para a minimização do consumo de água em sistemas tanto com um contaminante quanto com três componentes, utilizando os exemplos originais de Wang e Smith.

O DFA utiliza um conjunto de regras heurísticas e o conceito de alocação de vazão para assimilação da carga mássica de contaminante, buscando as melhores configurações entre as correntes, com o objetivo de maximizar o reúso. Pode ser aplicado em problemas com um contaminante e múltiplos contaminantes, para diversos casos: máximo reúso, regeneração com reúso, regeneração com reciclo, restrição de vazão, múltiplas fontes de água e perdas inerentes ao processo. Desse modo, minimiza-se o consumo de água limpa e a geração de efluentes (GOMES et al., 2007).

O DFA é um método aplicado em diversos tipos de indústria. Marques (2008) aplicou-o às indústrias de celulose e papel, de sucos cítricos, têxtil e petroquímica. Dessa forma, evidencia-se a flexibilidade e a versatilidade do DFA.

Mirre (2012) destacou toda a produtividade anual gerada com o DFA no período de 2000-2010, evidenciando a consistência do método, dada a aplicação em um grande número de trabalhos nos mais diversos setores.

França (2012) utilizou este método na indústria siderúrgica. Seu trabalho consistiu na geração de diversos diagramas. No diagrama base não havia nenhuma integração entre os processos e, conseqüentemente, a vazão de captação de água era a maior. A partir daí, progressivamente foram gerados diagramas que aumentavam o reúso até que a geração de efluentes fosse a mínima possível.

O DFA, além de ser uma ferramenta de Integração de Processos, pode ser usado em conjunto com outras técnicas com a finalidade de obter processos mais sustentáveis, ou seja, processos nos quais ocorrem a incorporação das melhores alternativas possíveis para minimizar impactos ambientais e sociais.

Como exemplo, Mirre (2012) propôs um modelo para o gerenciamento do reúso sustentável de águas e efluentes nos processos industriais, denominado P+ÁGUA. Nele, o DFA é um dos pilares, juntamente com conceitos de produção mais limpa e valorização ambiental.

Gomes et al. (2013) ampliou o estudo para sistemas com múltiplos contaminantes, tendo como objetivo o máximo reúso. Sua pesquisa mostrou a necessidade de se escolher um contaminante de referência em sistemas com múltiplos contaminantes, mas também uma operação de referência. Além disso, Gomes et al. (2013) ressaltaram que nessas

operações a transferência de massa de cada contaminante ocorre simultaneamente em cada operação, seguindo uma determinada relação entre elas.

Calixto et al. (2015) por sua vez, propôs um novo tratamento para sistemas com múltiplos contaminantes. A abordagem mostra que a escolha de um contaminante de referencia é importante para tornar possível a simplificação dos cálculos através da adoção de uma estratégia de decomposição. Para exemplificar, o novo método é aplicado em dois grandes exemplos de plantas de processo, e os resultados mostram um bom desempenho da nova abordagem.

Francisco et al. (2015) estendeu a aplicação do DFA para superar as limitações envolvendo problemas de vazão fixa, perda e/ou ganho de água em sistemas com um ou múltiplos contaminantes. Além disso, desenvolveu o Diagrama de Fontes de Água de Resfriamento, que busca o consumo mínimo de água de resfriamento, sem prejudicar a troca térmica. O estudo de caso envolveu dados de uma fábrica brasileira de celulose. Os resultados obtidos foram comparados com diversos outros descritos na literatura, obtendo-se valores similares e, em muitos dos casos, uma maior redução do valor da função objetivo.

## I. O procedimento algorítmico

O algoritmo efetua simultaneamente a especificação de metas de consumo e a síntese da rede. Ele também apresenta outras vantagens, como por exemplo: geração simultânea de fluxogramas alternativos para o processo e a definição de restrições de vazão apenas precisam ser inseridas no estágio final de projeto (CASTRO et al., 1999).

No DFA, as regras heurísticas adotadas são as seguintes (MIRRE, 2012):

- 1) Utilizar fontes externas somente quando não houver fonte interna disponível, tanto em quantidade quanto em qualidade
- 2) Para uma determinada operação, a fonte de água utilizada em um certo intervalo de concentração deve absorver a quantidade de massa a ser transferida no respectivo intervalo. Ou seja, é necessário que a maior quantidade de massa seja transferida dentro do mesmo intervalo de concentração;
- 3) Operações que se fazem presentes em mais de um intervalo, ao mudar de intervalo, a vazão da corrente deve prosseguir através da operação até o término para evitar a divisão das correntes em termos de vazão;

Para cada intervalo  $i$  os cálculos de carga mássica de contaminante ( $\Delta m_{ki}$ ) para cada operação  $k$ , podem ser calculadas conforme a Equação 2.1.

$$\Delta m_{u,c} = f_u(C_{u,c,out} - C_{u,c,in}) \quad (2.1)$$

Na qual  $f_u(\frac{ton}{h})$  é a vazão na operação  $u$ ,  $C_{u,c,in}(ppm)$  é a concentração inicial do componente  $c$  no intervalo  $u$  e  $C_{u,c,in}(ppm)$  é a componente  $c$  no intervalo  $u$ .

As vazões requeridas por cada operação  $k$  no respectivo intervalo  $i$  podem ser calculadas pelas Equações 2.2 e 2.3.

$$f_{p,u,i}^{ext} = \frac{\Delta m_{u,i} - \sum_{p=1}^{N_{fia,i}} f_{p,u,i}^{int}(C_{f,i} - C_{i,p})}{C_{f,i} - C_p^{ext}} \quad (2.2)$$

$$f_{p,u,i}^{int} = \frac{\Delta m_{u,i} - \sum_{p=p-1}^{N_p} f_{p,u,i}^{int}(C_{f,i} - C_{i,p})}{C_{f,i} - C_p^{int}} \quad (2.3)$$

Em que:

$\Delta m_{ui}$  = carga mássica da operação  $u$  no intervalo  $i$ ;

$f_{p,u,i}^{ext}$  = vazão da fonte externa  $p$  utilizada no intervalo  $i$  na operação  $u$ ;

$f_{p,u,i}^{int}$  = vazão da fonte interna  $p$  utilizada no intervalo  $i$  na operação  $u$ ;

$N_{fia,i}$  = número de fontes internas disponíveis no intervalo  $i$ ;

$C_{i,p}$  = concentração na qual a fonte interna  $p$  é usada no intervalo  $i$ ;

$C_{f,i}$  = concentração final do intervalo  $i$ ;

$C_p^{ext}$  = concentração da fonte externa  $p$ ;

$C_p^{int}$  = concentração da fonte interna  $p$ .

Em primeiro lugar, devem ser calculadas todas as fontes internas antes das fontes externas, somente usando a fonte externa na ausência de vazões disponíveis no intervalo. Assim, a vazão mínima de água da fonte externa será calculada pelo somatório de cada vazão direcionada para cada equipamento

Santos (2007) identificou a necessidade de se automatizar o procedimento para facilitar e agilizar a geração e interpretação de cenários de reúso de água com o DFA, por isso elaborou um *software* denominado MINEA® (Minimização de Efluentes Aquosos). O *software* nada mais é do que a automatização no Microsoft Excel® das etapas implementadas por Gomes (2007).

A partir da Tabela 2.1, com os dados do exemplo proposto por Wang e Smith (1994a), e seguindo todas as regras mencionadas é possível gerar o diagrama representado na Figura 2.8.

Tabela 2.1 - Dados limites do problema exemplo de máximo reuso e único contaminante. Fonte: Wang e Smith (1994a)

Operação (k)	$f_k$ (t/h)	$C_{ik,max}$ (ppm)	$C_{fk,max}$ (ppm)	$\Delta m_k$ (kg/h)
1	20	0	100	2
2	100	50	100	5
3	40	50	800	30
4	10	400	800	4

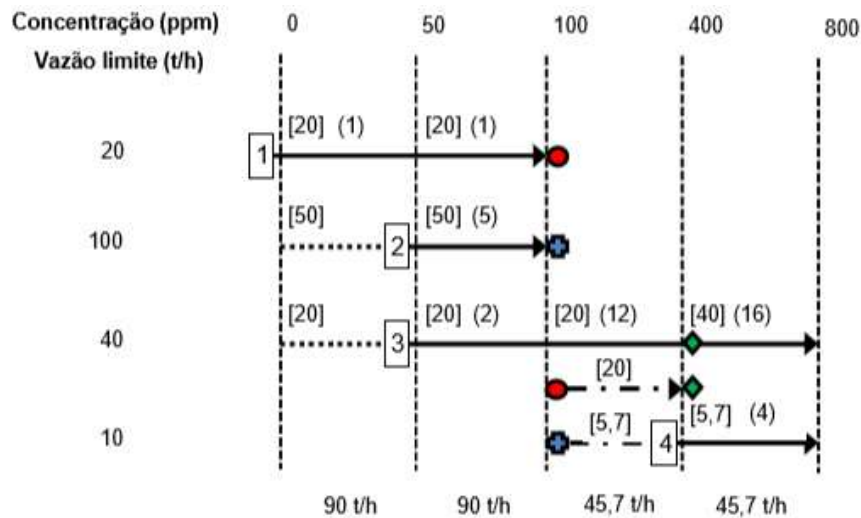


Figura 2.8 - Representação do Diagrama de Fontes de Água

É importante ressaltar que com os resultados da aplicação do DFA, é possível gerar uma rede de água. Como exemplo, a rede de águas é vista na Figura 2.9 foi gerada a partir dos dados da Figura 2.9.

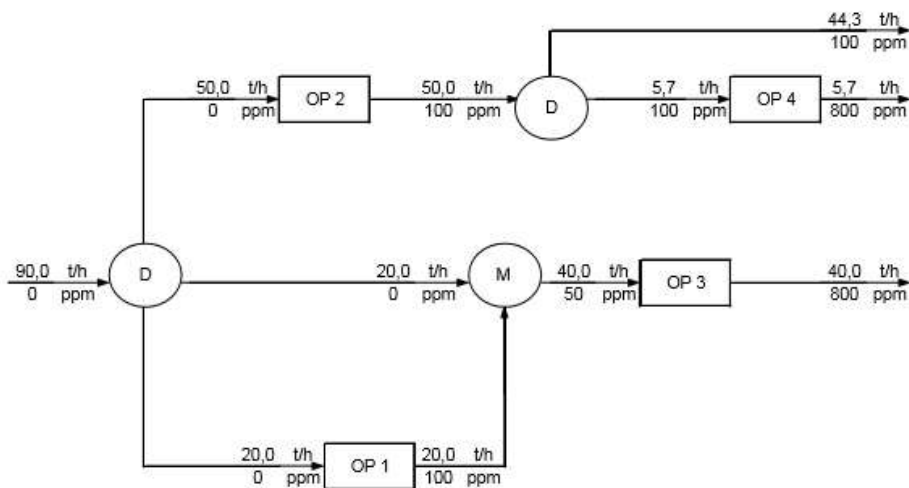


Figura 2.9 - Exemplo de rede de água obtida com os dados da aplicação do DFA (GOMES, 2002)

Esta rede é um diagrama de blocos no qual é possível observar quais correntes são realinhadas. Além disso, é possível fazer o balanço hídrico dos processos estudados. As vazões das correntes são obtidas nos resultados do DFA e a concentração dos contaminantes pode ser obtida através de balanços de massa. Além de todos os dados para a obtenção da rede de água, por meio da aplicação do DFA obtém-se o percentual de reúso, a captação total de água e a geração de efluentes. Para este exemplo, a redução na captação de água foi de 48%.

### 2.2.2 Etapas da metodologia para a integração mássica com o DFA

A metodologia engloba basicamente a incorporação do DFA à base conceitual da P+L.

De forma a esquematizar o modelo são descritas as etapas a serem seguidas para a incorporação do DFA a integração mássica (MIRRE, 2012)

(i) Desenvolvimento de banco de efluentes industriais líquidos e principais matérias-primas utilizadas

Neste ponto, algumas sub-etapas são imprescindíveis, conforme a seguir:

i.1) realização de balanço hídrico - envolve o mapeamento do ciclo hídrico do processo, executando o seu balanço de massa.

i.2) identificação de contaminantes relevantes - é importante ressaltar que a escolha dos contaminantes relevantes deve, prioritariamente, ser a mínima quantidade possível.

Ou seja, a abordagem dos contaminantes deve estar limitada ao menor número possível, dentre aqueles que efetivamente concorrem para a importância do processo.

i.3) mapeamento de restrição de vazão - identificar os processos que precisam manter a vazão constante, por exemplo, perdas por evaporação e respingos e purgas para manter o ciclo de concentração. Devido a perdas, a concentração dos contaminantes presentes na água aumenta, entretanto, para reutilizá-la é necessário que o ciclo de concentração seja mantido constante dentro dos valores aceitáveis para cada processo.

i.4) necessidade de dados precisos - esse fator está diretamente ligado a sensibilidade das metas estabelecidas. Por isso é importante identificar onde ocorre o *pinch*, ponto de estrangulamento, e verificá-lo. Se as metas forem sensíveis a incerteza dos dados, é imprescindível que os dados sejam precisos em torno do *pinch*.

i.5) análise do nível atual de contaminante - determinar o atual nível de contaminantes e as metas do processo.

i.6) análise das condições limitantes do processo - por exemplo, limitações à corrosão.



(ii) Avaliação preliminar das possibilidades de reutilização do efluente líquido nas áreas dos processos.

(iii) Avaliação técnico-econômica das possibilidades existentes

#### I. Etapas para seleção de cenários promissores

Dentro desse modelo, propõe-se a análise de oportunidades de reúso e/ou regeneração de correntes hídricas por meio de um procedimento seletivo que leva em consideração elementos estatísticos. Como resultado, as opções selecionadas como as redes de águas promissoras e passíveis de implementação na prática são em termos de custos e viabilidade de realinhamento.

De modo geral, pode-se fazer uma comparação entre as etapas do modelo a um funil, em função do seu estreitamento do topo até a base, pois, a cada etapa, descartam-se os resultados até que se obtém os cenários promissores, que são aqueles passíveis de implementação na prática.

As etapas descritas a seguir poderão ser encontradas de maneira detalhada no trabalho de Mirre (2012). A Figura 2.10 exemplifica as seis etapas que compõem a metodologia e serão detalhadas a seguir.

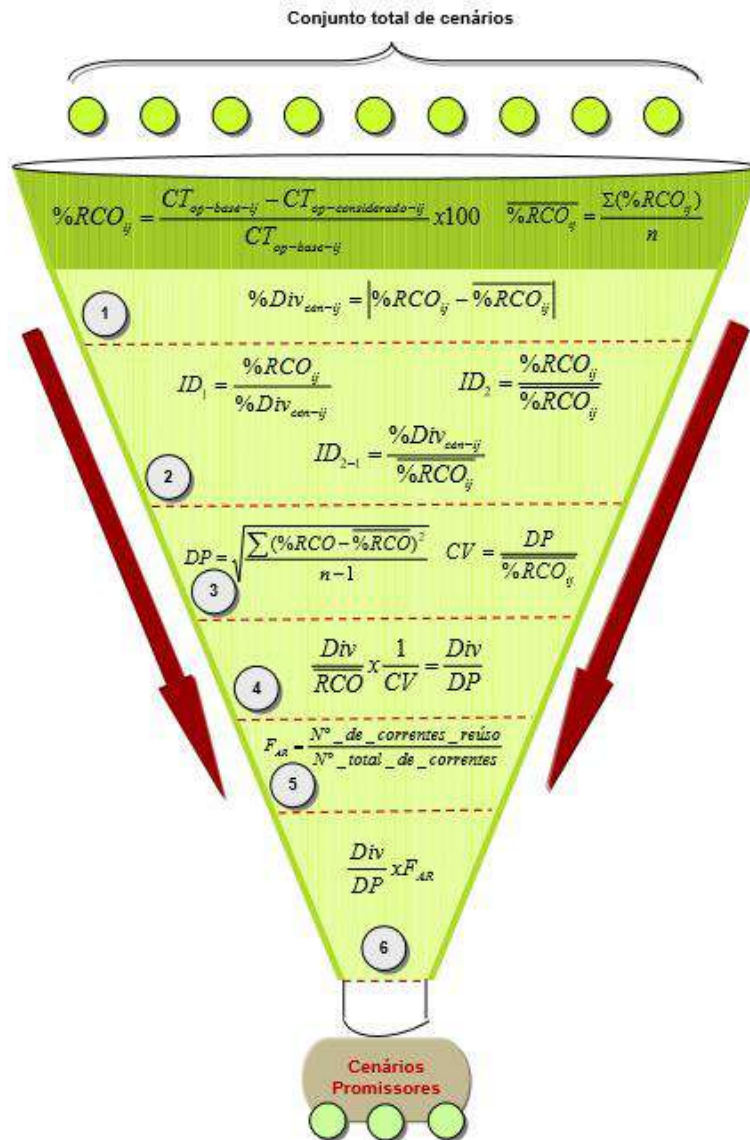


Figura 2.10 - Procedimento de cálculo para seleção de cenários com oportunidades de reúso (MIRRE, 2012)

Cada uma das etapas é composta por fórmulas estatísticas com o objetivo de, ao final do processo, encontrar os cenários promissores para a aplicação.

Ferramentas estatísticas são usadas em muitos problemas de engenharia. Como exemplo, em controle estatístico de processo (CEP) os gráficos de produção ou cartas de controle são gerados para monitoramento de processo. Por meio deles é possível avaliar a variabilidade de dados ao longo do tempo.

No mercado financeiro também são utilizadas ferramentas de estatística. O método aqui estudado assemelha-se ao método da teoria financeira desenvolvido por Markowitz (ABREU FILHO et al., 2007 e SAMANEZ, 2009).

As medidas estatísticas, como medidas de tendência central (média) e de dispersão (desvio médio, variância, desvio-padrão e coeficiente de variação) são a base das fórmulas para encontrar alternativas de investimento em cenários com o maior retorno, ou seja, menor custo operacional, e ao menor risco, dado pela menor variabilidade em relação ao retorno esperado. A seguir, são descritas as etapas para o procedimento.

Etapa 1:

Primeiro são calculados os custos operacionais dos respectivos cenários para calcular a sua redução dos custos operacionais, conforme a Equação 2.4. A Equação 2.5 e a Equação 2.6 apresentam o cálculo da média da redução e a divergência entre as médias, respectivamente.

$$\%RCO_{ij} = \frac{CT_{op-base-ij} - CT_{op-considerado-ij}}{CT_{op-base-ij}} \times 100 \quad (2.4)$$

$$\overline{\%RCO_{ij}} = \frac{\sum(\%RCO_{ij})}{n} \quad (2.5)$$

$$\%Div_{cen-i} = |\%RCO_i - \overline{\%RCO_i}| \quad (2.6)$$

Onde:

$CT_{op-base-ij}$  = Custo total do cenário base;

$CT_{op-considerado-ij}$  = Custo total do cenário considerado;

n = Número de cenários avaliados.

Os dados são separados em duas vertentes que seguem para a etapa dois. Selecionam-se:

- ✓ Os cenários com as maiores reduções nos custos;
- ✓ Os cenários com menor divergência entre a média.

Etapa 2:

Calculam-se os índices de desempenho de divergência ( $ID_1$ ) e de média ( $ID_2$ ), para em seguida calcular a relação  $ID_{2-1}$ . Os cálculos são realizados conforme as Equações 2.7, 2.8 e 2.9, respectivamente.

$$ID_1 = \frac{\%RCO_{ij}}{\%Div_{cen-ij}} \quad (2.7)$$

$$ID_2 = \frac{\%RCO_{ij}}{\overline{\%RCO_{ij}}} \quad (2.8)$$

$$ID_{2-1} = \frac{\%Div_{cen-ij}}{\%RCO_{ij}} \quad (2.9)$$

Prosseguem para a próxima etapa os cenários que possuem a menor relação  $ID_{2-1}$ .

Etapa 3:

Calcula-se o Desvio Padrão (DP), conforme na Equação 2.10, dos custos dos cenários. Com o DP, calcula-se o coeficiente de variação ou de dispersão (CV), conforme a Equação 2.11. Esta etapa é fundamental para cálculos posteriores.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum(\%RCO - \overline{\%RCO})^2}{n - 1}} \quad (2.10)$$

$$CV = \frac{DP}{\%RCO_{ij}} \quad (2.11)$$

Etapa 4:

Deve-se calcular a divergência em relação à média ( $Div / \overline{RCO}$ ), conforme na Equação 2.12.

$$\frac{Div}{RCO} \times \frac{1}{CV} = \frac{DIV}{DP} \quad (2.12)$$

Seguem para o cálculo seguinte os cenários com os menores valores obtidos.

Etapa 5:

Calcula-se um fator denominado Fator Adicional de Reúso (F.A.R). Este é um índice que leva em consideração o número de correntes realinhadas sendo o seu objetivo incorporar à análise o efeito qualitativo no realinhamento de correntes de reúso. Quanto mais correntes forem realinhadas mais será preciso investir em tubulações e mais caro será a implementação. Por isso, utiliza-se este cálculo como forma de eliminar os cenários que teriam seu custo de implementação muito alto, devido ao grande realinhamento de correntes.

O F.A.R é calculado conforme a Equação 2.13

$$F.A.R = \frac{No\ de\ correntes\ de\ reuso}{No\ total\ de\ correntes} \quad (2.13)$$

Etapa 6:

Finalmente, multiplicam-se os resultados da Etapa 4 pelos resultados da Etapa 5, conforme na Equação 2.14.

$$\frac{DIV}{DP} \times F.A.R \quad (2.14)$$

Depois de selecionar os cenários com os menores valores obtidos nesta etapa, tem-se o resultado final, ou seja, os cenários promissores.

### 3. Metodologia

#### 3.1. Descrição da metodologia implementada

A Figura 3.1 esquematiza o conjunto de etapas propostas para a metodologia aplicada a este trabalho.

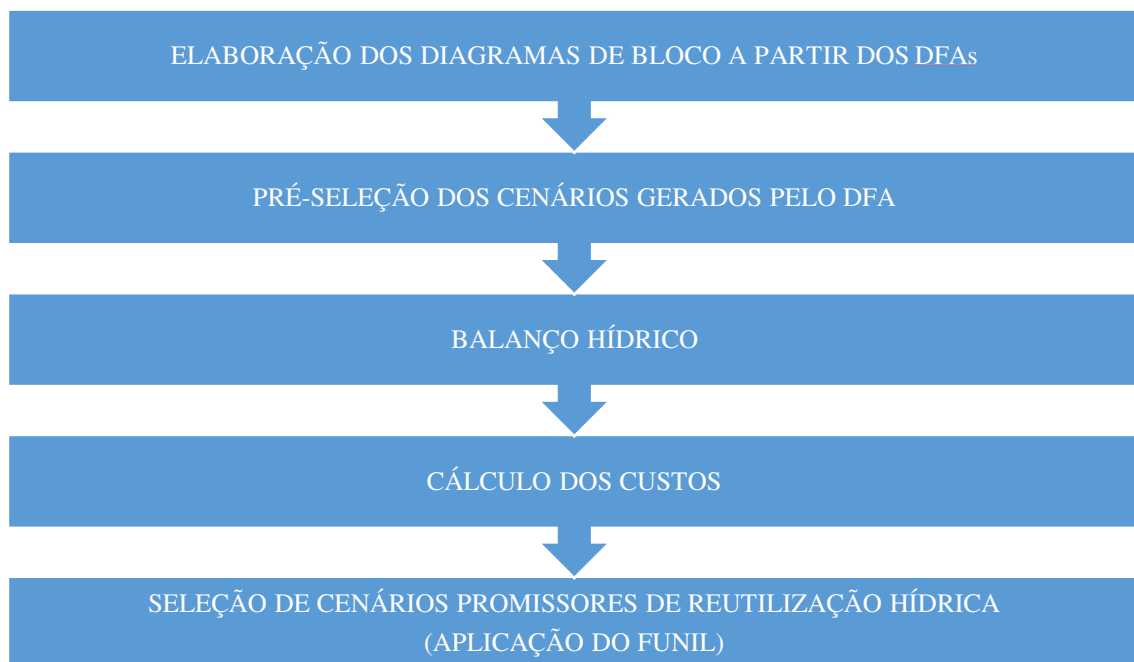


Figura 3.1 - Esquema ilustrativo da metodologia aplicada neste trabalho

De acordo com a metodologia, antes de realizar o balanço hídrico das operações, é necessário a aplicação de uma pré-seleção dos cenários. Para tanto, é preciso calcular o F.A.R., por meio da Equação 2.13. De modo a contar quantas correntes foram reusadas para cálculo do FAR foi preciso elaborar os diagramas de blocos a partir dos DFAs. Após a execução dos cálculos, a escolha deve ser feita pelos cenários que possuem os menores valores encontrados.

O balanço hídrico é realizado através dos dados obtidos no DFA. As vazões de entrada e saída de cada operação são encontradas no resultado da aplicação do DFA e as concentrações são obtidas através de balanços de massa. Com os dados do balanço hídrico torna-se possível obter a vazão correspondente a captação total de água e a vazão de efluente tratado.

Com o cálculo das vazões é possível calcular os custos totais de cada cenário.

A cobrança sobre o uso de recursos hídricos está explícita no Art. 19 da Lei 4.247/03. A equação final de custos é apresentada na Equação 3.1 e pode ser dividida em três partes, na qual a primeira parcela corresponde à cobrança pelo volume de água captada no manancial; a segunda parcela corresponde à cobrança pelo consumo (volume captado que não retorna ao corpo hídrico e a terceira parcela corresponde à cobrança pelo despejo do efluente no corpo receptor (FRANÇA, 2012).

$$C = Q_{cap} k_0 PPU + Q_{cap} k_1 PPU + Q_{cap} (1 - k_1) (1 - k_2 k_3) PPU \quad (3.1)$$

Onde:

PPU (preço público unitário) = R\$ 0,02/metro cúbico;

$K_0 = 0,4$ ;

$Q_{cap}$  e  $k_1$  = informado pelo usuário

$K_2$  = representa a relação entre a vazão de efluente tratada e a vazão de efluente bruta;

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

Para calcular os custos de tratamento de água para fins industriais e de efluentes líquidos e águas residuais utiliza-se a Equação 3.2, que corresponde a metodologia proposta por Ulrich e Vasudevan (2006)

$$COP = a X + b Y \quad (3.2)$$

Na qual:

COP: 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)

Os parâmetros (a) e (b) seguem conforme a Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Coeficientes da equação de cálculo de custo de tratamento de água e efluentes (ULRICH E VASUDENAN, 2006)

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

Com todas as etapas anteriores realizadas, prosseguiu-se para a etapa do procedimento de seleção de cenários promissores de reutilização hídrica. Por meio dele, serão selecionadas as redes de águas promissoras para implementação.

### 3.2. Estudo de caso

França (2012) desenvolveu em seu trabalho a temática de reúso de água na indústria siderúrgica. Ele usou o método do DFA para desenvolver diversos cenários de reúso que são base para a geração de vinte redes de água. Entretanto, não houve a geração de nenhum dos balanços hídricos correspondentes aos diagramas gerados pelo DFA. Além dessa necessidade, observou-se a importância de um estudo capaz de selecionar as redes de água promissoras. Por isso, o presente trabalho irá se desenvolver a partir dos diagramas gerados por França (2012).

#### 1) Pré-seleção dos cenários já gerados pelo DFA

Tendo em vista o grande número de cenários e o trabalho gerado ao desenvolver todo balanço hídrico, etapa fundamental no modelo P+ÁGUA, de cada um deles foi proposto uma pré-seleção através de cálculo do F.A.R. A Tabela 3.2 mostra os resultados após a aplicação do F.A.R. Por meio dela é possível ver que os cenários selecionados para prosseguirem para o balanço hídrico são 4, 5, 6, 7, 8 e 9. Neste caso, optou-se por escolher

um fator de corte de 25%. Por isso os escolhidos foram aqueles que possuíam um FAR no qual houve um realinhamento de correntes menor do que 25%. Justifica-se a escolha pois um menor valor de FAR implica em um menor custo adicional para o realinhamento das correntes. Em todos os outros cenários, o grande número de correntes realinhadas envolveria um maior custo inviabilizando o reúso. Para o prosseguimento da análise os cenários escolhidos foram renumerados de 1 a 6, de maneira que o primeiro cenário escolhido, ou seja o 4, é o cenário 1 do presente trabalho e o último escolhido, o cenário 9, corresponde ao cenário 6.

*Tabela 3.2 - Dados referentes a aplicação do F.A.R*

<b>Cenários</b>	<b>Nº de correntes de reúso</b>	<b>Nº total de correntes do sistema</b>	<b>Fator adicional de reúso</b>
<b>1</b>	24	53	0.4528
<b>2</b>	37	53	0.6981
<b>3</b>	24	53	0.4528
<b>4</b>	10	45	0.2222
<b>5</b>	9	45	0.2000
<b>6</b>	10	45	0.2222
<b>7</b>	10	45	0.2222
<b>8</b>	11	45	0.2444
<b>9</b>	11	45	0.2444
<b>10</b>	12	45	0.2667
<b>11</b>	12	45	0.2667
<b>12</b>	13	45	0.2889
<b>13</b>	14	45	0.3111
<b>14</b>	16	45	0.3556
<b>15</b>	16	45	0.3556
<b>16</b>	22	45	0.4889
<b>17</b>	53	45	1.1778
<b>18</b>	54	45	1.2000
<b>19</b>	56	45	1.2444
<b>20</b>	17	45	0.3778

## 2) Balanço Hídrico

Depois de desenvolvido o cenário base, foi realizado o balanço e, a partir dele, os demais balanços para cada cenário escolhido. Os dados de entrada para o DFA e, consequentemente, essenciais para o desenvolvimento do balanço hídrico para o estudo de caso foram resumidos na Tabela 3.3, 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 SST.



Tabela 3.3 - Tabela do estudo de caso com as concentrações e vazões em uma indústria siderúrgica considerando o parâmetro SST (FRANÇA, 2012)

Etapas		Operação	Vazão operacional (ton/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	1.29	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 Contínuo	14	Resfriamento de moldes por contato indireto	6.069	10	10	6,07
	15	Resfriamento com <i>sprays</i> – contato direto	17.209	20	150	2.237.219

Tabela 3.3 - Tabela do estudo de caso com as concentrações e vazões em uma indústria siderúrgica considerando o parâmetro SST (FRANÇA, 2012)(continuação)

Etapas	Operação	Vazão operacional (ton/h)	Concentração de entrada máxima (ppm)	Concentração de saída máxima (ppm)	Carga mássica ( $\Delta m$ ) (g/h)	
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 Separação de Gases	25	--	8.360	20	20	8,36

#### 4. Resultados e discussão

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação do modelo P+ÁGUA a um estudo de caso de uma indústria siderúrgica, elaborado a partir de dados que caracterizam a realidade dos processos hídricos.

A partir dos dados de França (2012), foi gerado um fluxograma base, conforme visto na Figura 4.1, e um balanço hídrico base, como na Tabela 4.1, para, a partir deles, gerar

tanto os balanços hídricos como as redes de águas correspondentes a cada um dos cenários estudados.

- Cenário Base:

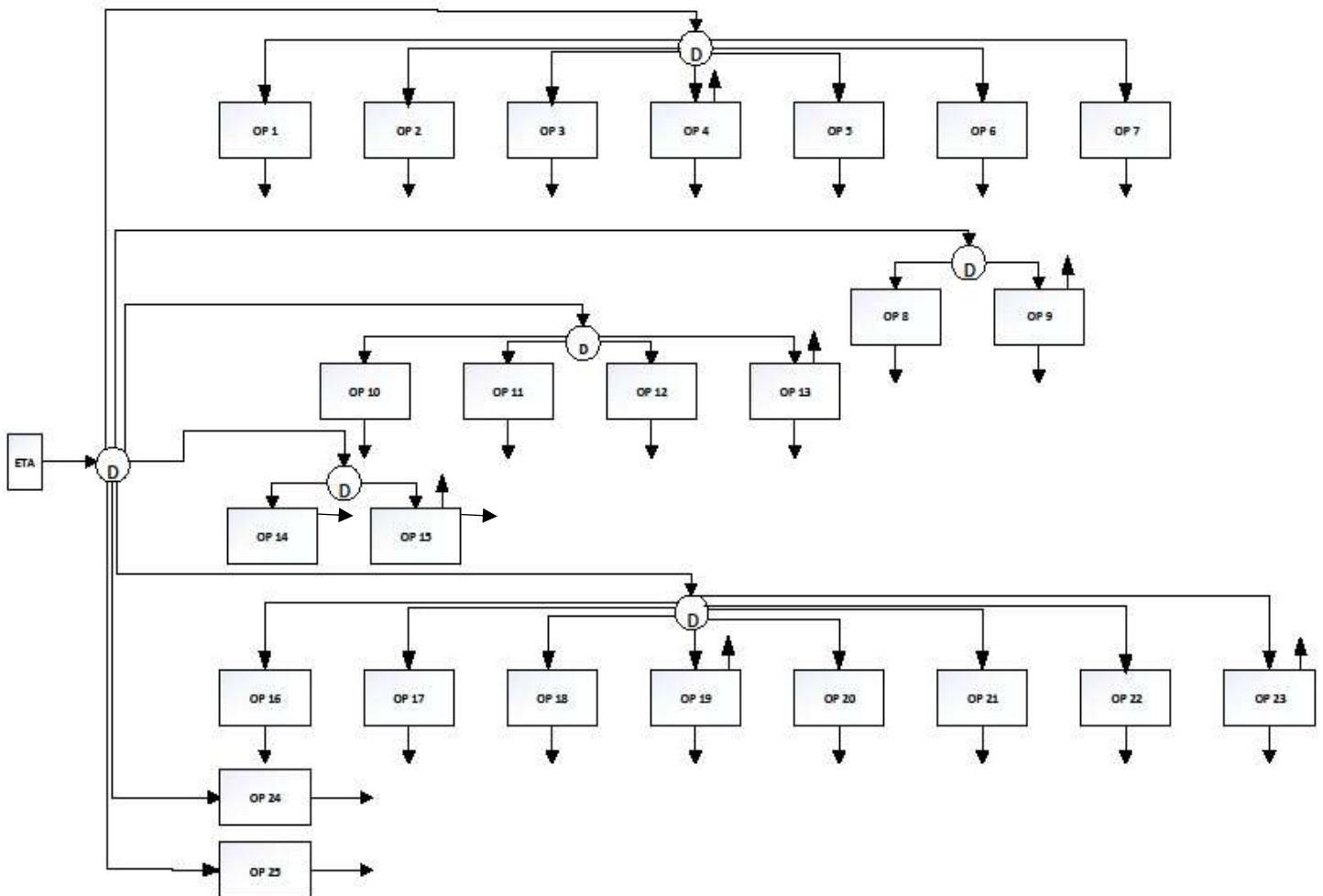


Figura 4.1 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário base

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.

Dessa forma, deixam de constar no diagrama todas as correntes de resfriamento por contato indireto, às quais se aplicarão a consideração de circuito semi-aberto de recirculação empregando-se torres de resfriamento.

Assim, a captação de água destinada a estas operações, que no processo original era de 99.272 ton/h passou a ser somente de 4.427 ton/h. Esta quantidade é recomendada

para manter o ciclo de concentração, dada a quantidade de água perdida por evaporação, respingos e purgas. Por isso, em cada um dos cenários analisados haverá um acréscimo do valor citado na vazão da água captada. Sendo assim, o fluxograma simplificado adotado como base para este projeto é visto na Figura 4.2.

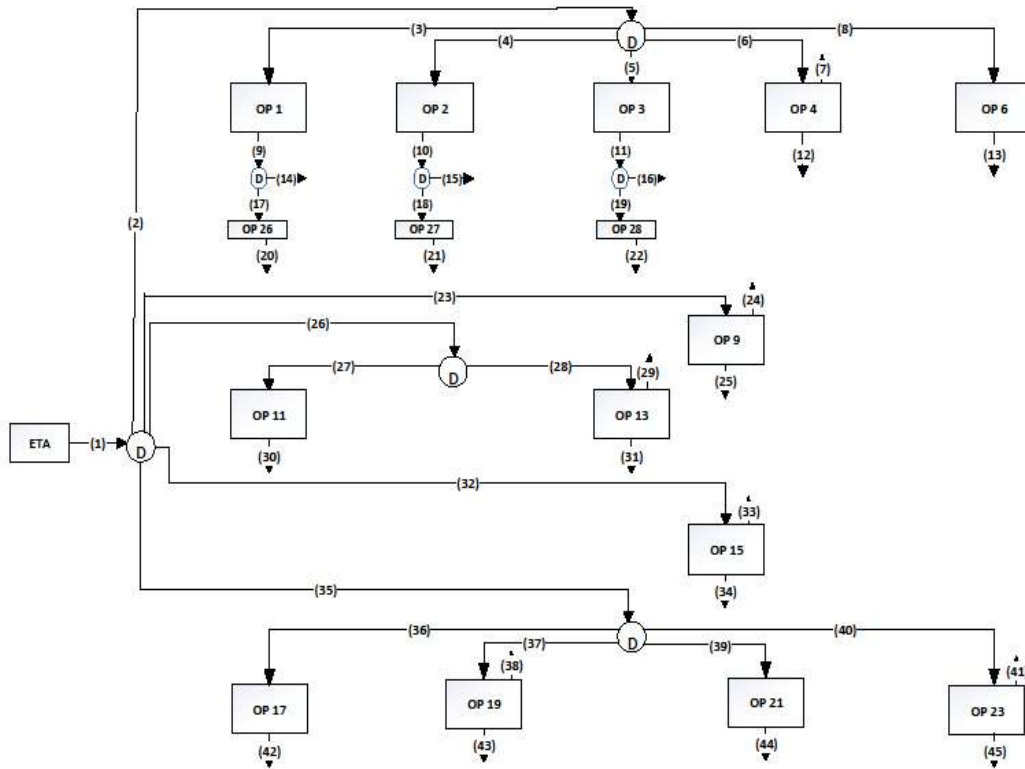


Figura 4.2 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário base simplificado

No qual os valores entre parênteses são ao número das correntes que serão usados no balanço hídrico. A única modificação presente na Figura 5.2 é a omissão de todas as operações de contato indireto. Os dados de entrada das operações no DFA estão representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dados do processo simplificado

Etapas		Operação	Vazão operacional (ton/h)	Perdas de vazão (ton/h)	Concentração de entrada máxima (35ppm)	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	3.24
Redução (Altos Fornos)	9	Resfriamento de gases (contato direto)	3.382	353	50	1.42	4.633.340
Conversão e Refino (Aciaria)	11	Conversão resfriamento de gases por contato direto	1.29	0	50	5.961	7.625.190
	13	Refino – resfriamento de gases por contato direto	2.474	74	200	250	123.68
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 – operações com contato direto	711	0	20	1.782	1.252.782
	23	Acabamento – operações com contato direto	970	31	20	69	47.53

A partir do diagrama de blocos da Figura 4.2 juntamente com os dados apresentados na tabela, tendo como foco a vazão total de água captada, desenvolveu-se o seguinte o balanço hídrico simplificado.

Tabela 4.2 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma base simplificado

Número corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nome	Saída ETA	Soma (1+2+3+4+6)	Entrada OP1	Entrada OP2	Entrada OP3	Entrada OP4	Perda OP4	Entrada OP6	Saída OP1	Saída OP2	Saída OP3	Saída OP4	Saída OP6	Efluente OP1	Efluente OP2
Vazão (ton/h)	42169.49	1381	379	82	23	807	161	90	379	82	23	807	90	379	82
Concentração SST (ppm)	20.98	24.02	25	25	25	25	219	10	63	87	38	219	46	63	87

Número corrente	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome	Efluente O P3	Entrada O P26	Entrada OP27	Entrada OP28	Saída OP26	Saída OP27	Saída OP28	Entrada OP9	Perda OP9	Saída OP9	Soma Bloco3	Entrada OP11	Entrada OP13	Perda OP13	Saída OP11
Vazão (ton/h)	23	0	0	0	0	0	0	3382	353	3029	3763.61	1290	2473.61	74	1290
Concentração SST (ppm)	38	63	87	38	22	22	14.4	25	1395	1395	25	25	25	75	5936

Número corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Nome	Saída OP13	Entrada OP15	Perda OP15	Saída OP15	Soma Bloco5	Entrada OP17	Entrada OP19	Perda OP19	Entrada OP 21	Entrada OP23	Perda OP23	Saída OP17	Saída OP19	Saída OP21	Saída OP23
Vazão (ton/h)	2399.61	17209.31	729	16480.31	16433.57	16	14736.57	302	711	970	31	16	14434.57	711	939
Concentração SST (ppm)	75	20	150	150	20	20	20	70	20	20	69	88	70	1782	69

## 4.1. Descrição dos cenários

- Cenário 1

No primeiro cenário avaliado há um reúso de 3.559 ton/h provenientes das operações 3, 6, 15, 19 e 23, o que representa 8,70% de reúso. A redução na captação é de 70,90% em relação ao cenário base, o que significa uma captação de 40.800,54 ton/h. Nenhum tratamento de efluentes é utilizado pois, neste cenário, o objetivo foi avaliar as possibilidades de reúso com o efluente bruto, ou seja, sem tratamento. A redução na captação gerou uma redução nos custos de 74,28% em relação ao cenário base.

Neste cenário, a corrente de purga das operações indiretas foi considerada como fonte externa.

O diagrama de blocos gerado a partir do DFA do cenário 1 pode ser visto na Figura 4.3.

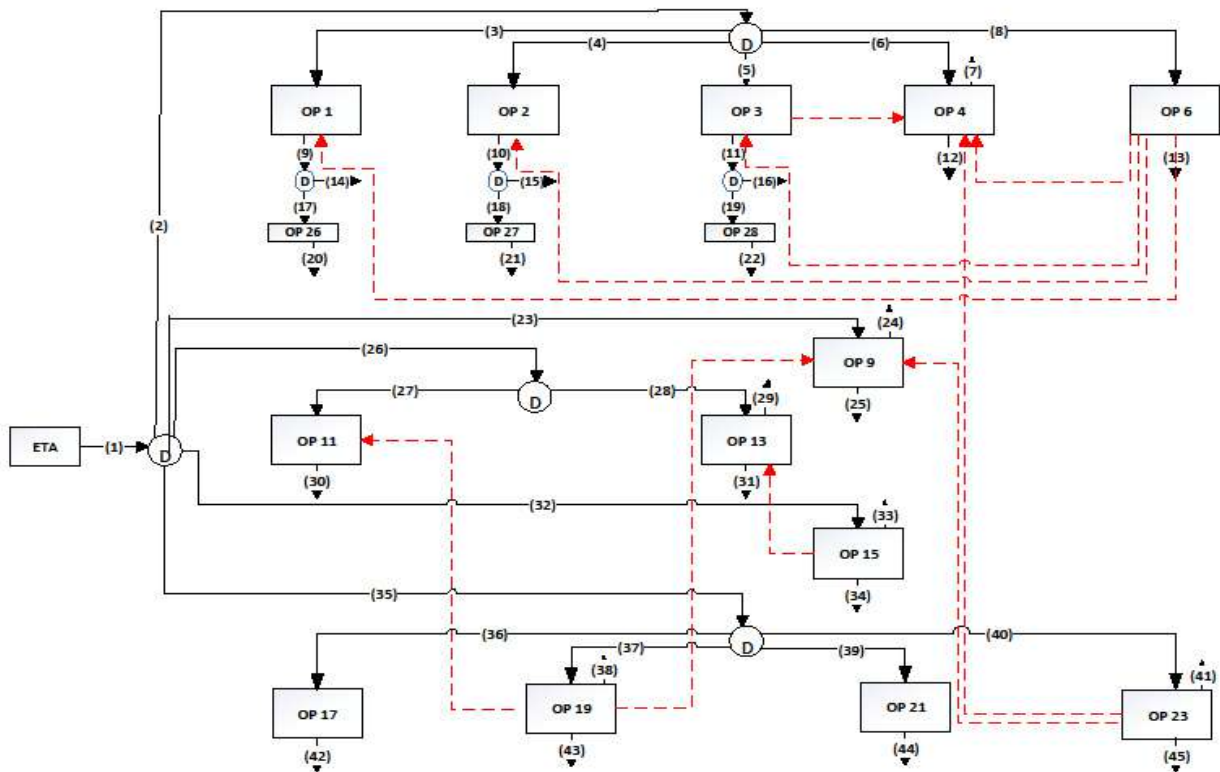


Figura 4.3 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 1

- Cenário 2

O reúso neste caso foi ligeiramente maior do que o do cenário anterior, com vazão de 4.189 ton/h sendo as correntes provenientes das operações 3, 6, 15, 19 e 23. Ainda assim, não foi aplicado nenhum tratamento de efluentes. A captação foi de 41.161 ton/h, o que representa uma redução de 71,17%. A partir deste cenário as correntes de purga não serão consideradas como fonte externa, mas sim como efluentes do processo (já que uma limitação do MINEA® é a consideração ilimitada de fontes externas e as correntes de purgas são finitas). O custo total foi 70,74% menor do que o cenário base.

O diagrama de blocos gerado a partir do DFA do cenário 2 é observado na Figura 4.4.

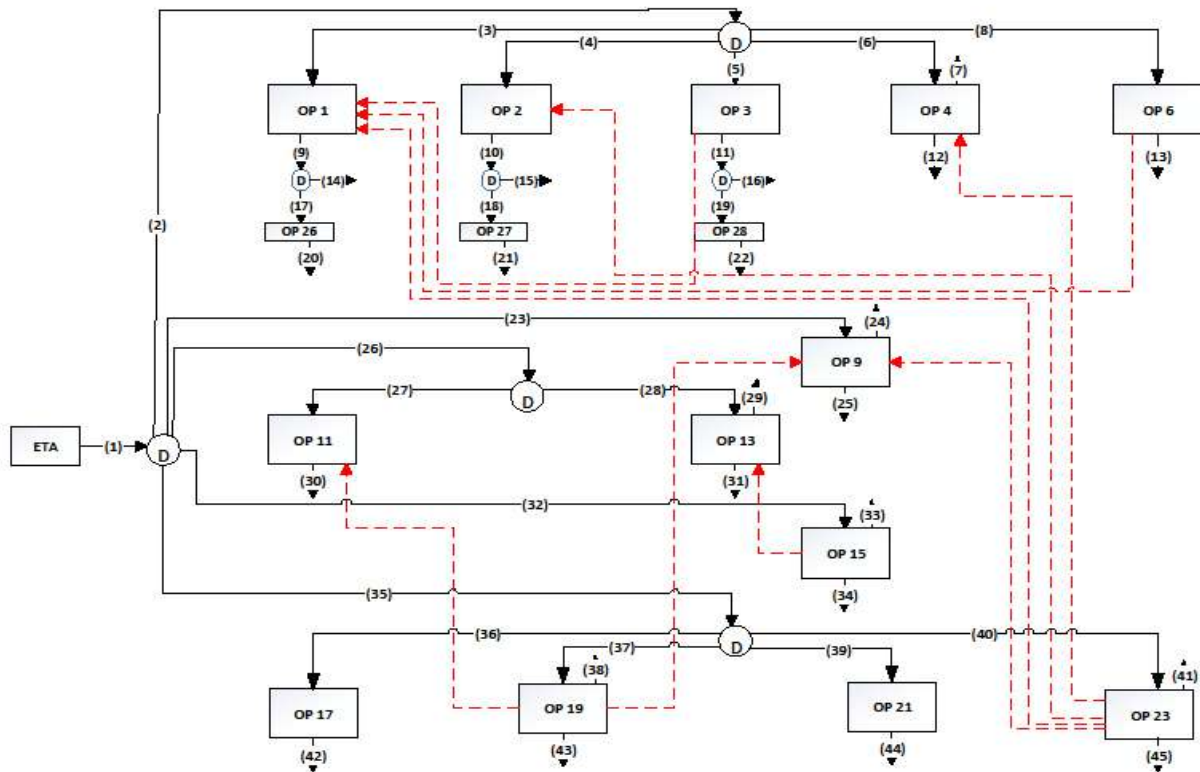


Figura 4.4 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 2



- Cenário 3

A partir deste cenário será considerada a regeneração das correntes de forma evolutiva, ou seja, serão inseridos tratamento de efluentes seguindo o fluxo dos processos siderúrgicos. 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 como sendo a operação 26, e assim sucessivamente. Portanto, a primeira corrente a ser regenerada será à do bloco de preparação das cargas, mais especificamente do pátio de estocagem de matérias primas (OP1). O tratamento de efluente utilizado é o de decantação no qual o parâmetro analisado sofre um declínio de 73 mg/L para 22 mg/L, o que sugere um potencial de reúso nas demais unidades.

O reúso neste caso foi maior do que os dos cenários anteriores apresentando vazão de 4.568 ton/h, o que corresponde a 11,16% em relação ao total de água captada. A captação de água apresentou uma redução de 71,22% em relação ao cenário base. O custo relacionado ao tratamento de efluente para reúso foi de R\$ 366.812,28, acarretando em um custo total 70,81% inferior ao cenário base.

O diagrama de blocos gerado a partir do DFA do cenário 3 é apresentado na Figura 4.5.

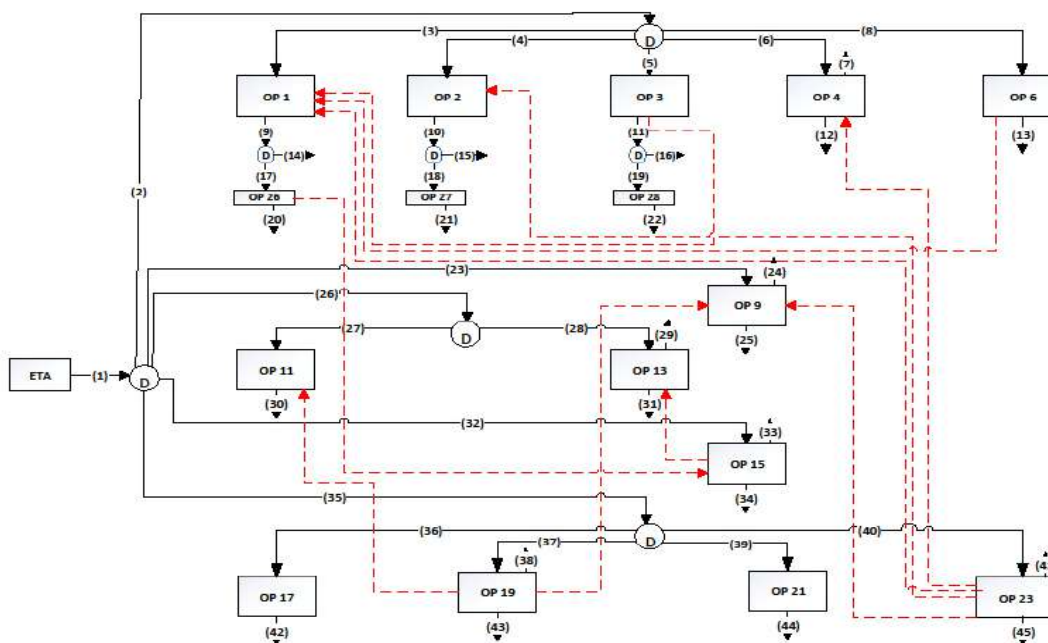


Figura 4.5 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 3

- Cenário 4

Continuando a sequência proposta no cenário 3, a corrente a ser regenerada é a do pátio de estocagem do carvão (OP2). Após o tratamento de decantação, o parâmetro SST vai de 87 mg/L para 22 mg/L.

O reúso neste caso foi maior do que os dos cenários anteriores com vazão de 4.650 ton/h, que representa 11,36% em relação a vazão total de captação de água. A redução da captação foi de 71,23% em relação ao cenário base. O custo atrelado ao tratamento de efluentes foi de R\$ 446.175,36 acarretando em um custo total 70.83% inferior ao cenário base.

O diagrama de blocos gerado a partir do DFA do cenário 4 é visto na Figura 4.6.

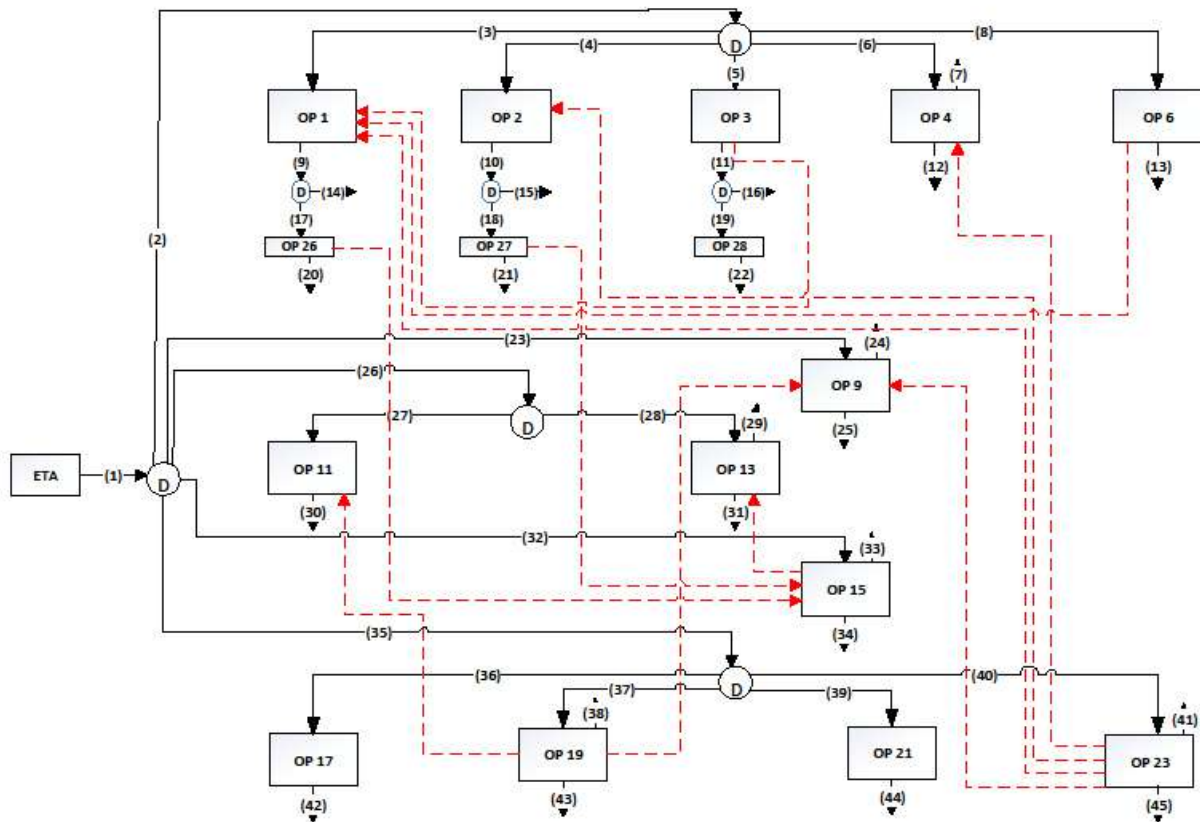


Figura 4.6 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 4

- Cenário 5

A corrente a ser regenerada é a usada na calcinação. Contudo, o primeiro tratamento utilizado que é a decantação seguida por neutralização reduz a concentração de SST para 38 mg/L. Por isso, o reúso desta poderá ser comprometido.

O reúso neste caso foi praticamente igual ao do cenário anterior. A captação de água foi de 40.693,00 ton/h o que significa uma redução de água foi de 71.23% o que gerou uma redução de 70.82% dos custos se comparado ao cenário base.

O diagrama de blocos gerado a partir do DFA está representado na Figura 4.7

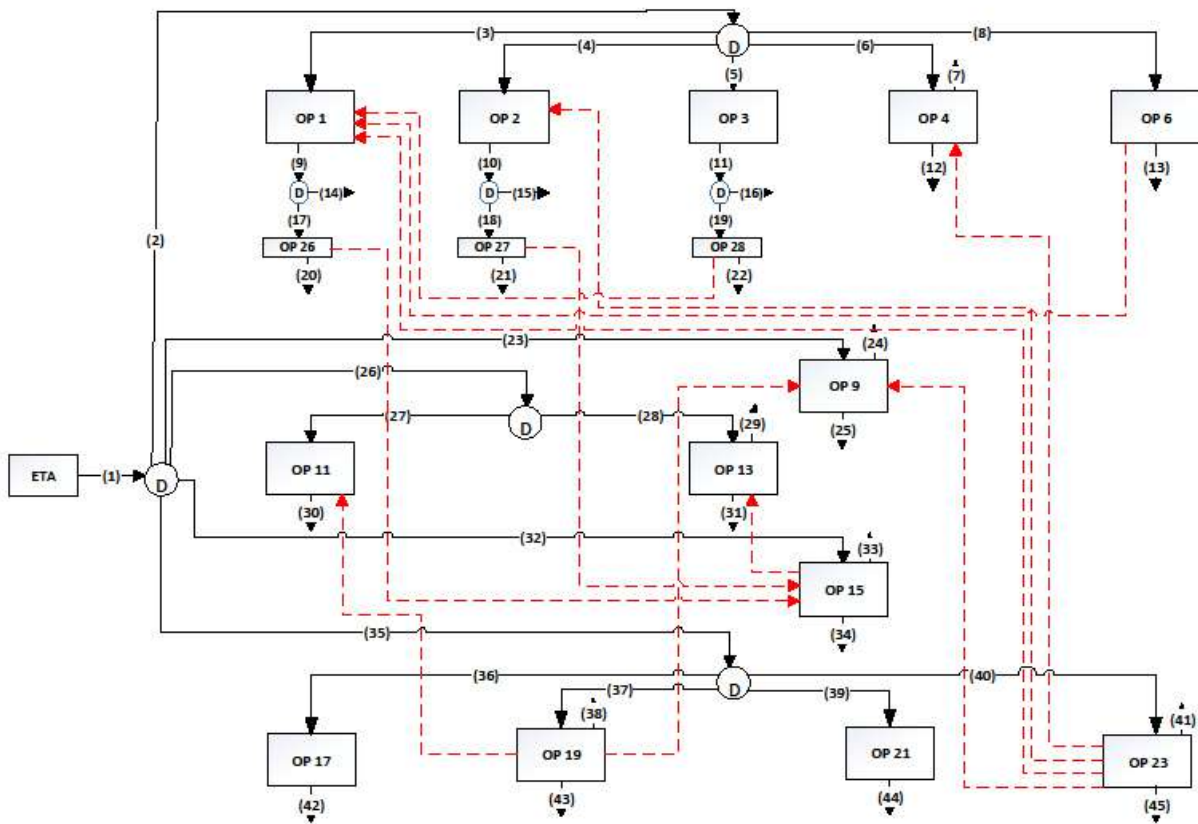


Figura 4.7 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 5

- Cenário 6

Para que seja possível o reaproveitamento da corrente 3, optou-se por avaliar o outro tratamento capaz de minimizar a concentração de SST na saída da calcinação. Com isso, o parâmetro que antes era de 38 mg/L após tratamento físico-químico, ou seja, floculação seguido de decantação, diminuiu para 14,4 mg/L, tornando viável a regeneração desta em outras operações.

Do mesmo modo, o reúso neste caso foi praticamente igual ao do cenário anterior, tendo um acréscimo de apenas 0,09% com o reúso de 4.657 ton/h. A captação foi de 40.693 ton/h, o que equivale a 71,23% em relação ao valor do cenário base. A redução do custo total foi 70,82%, valor muito próximo ao encontrado no cenário 5. O diagrama de blocos gerado a partir do DFA do cenário 6 é visto na Figura 4.8.

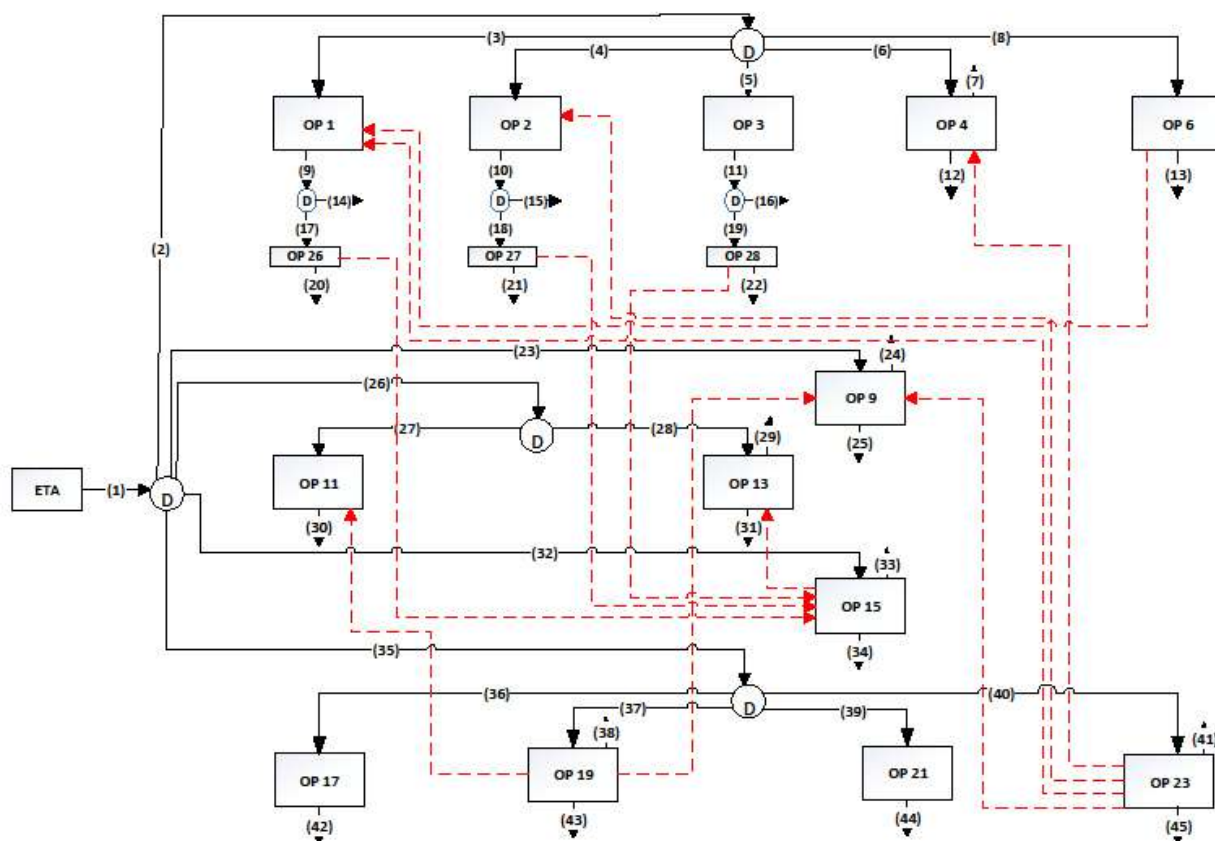


Figura 4.8 - Diagrama de blocos do processo hídrico referente ao cenário 6

## 4.2 Resultados da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica

Uma vez apresentado os diagramas correspondentes aos cenários, seguiu-se para a aplicação da seleção dos cenários promissores. Para tal, calculou-se a vazão de captação, e, com ela, os custos totais anuais. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dados para aplicação do modelo P+ÁGUA

Cenário	Vazão de captação de água (ton/h)	Custo total anual (R\$/ano)
Base	141.441,14	182.951.308,55
1	41.800,54	47.057.319,12
2	41.160,65	53.528.499,93
3	40.781,65	53.402.698,80
4	40.699,65	53.370.802,53
5	40.696,76	53.379.431,33
6	40.693,00	53.374.442,81

Como visto no capítulo 3, primeiro calculou-se a redução percentual nos custos operacionais para, em seguida, prosseguir com o cálculo da diferença entre a redução e a média da redução. Os resultados podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Primeira da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica

Cenário	%RCO <sub>ij</sub>	%Div
1	74,2788	2,8941
2	70,7417	0,6430
3	70,8104	0,5742
4	70,8279	0,5568
5	70,8231	0,5615
6	70,8259	0,5588
MÉDIOS	71,3846	0,96472

Neste ponto divide-se a análise em duas vertentes para escolha dos cenários que prosseguirão na análise:

- Maior redução dos custos os cenários escolhidos foram 1,3,4,5 e 6
- Menor diferença entre as médias cenários escolhidos foram 2,3,4,5 e 6.

Portanto, prosseguem-se todos os cenários para a próxima etapa. Já que o cenário eliminado pelo primeiro critério de escolha está agrupado no segundo critério de escolha.

Na etapa 2 são calculados os índices de desempenho de divergência  $ID_1$  e  $ID_2$  e a relação entre eles. Os resultados estão contidos na tabela 4.5

*Tabela 4.5 - Segunda etapa da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica*

Cenário	$ID_1$	$ID_2$	$ID_{2-1}$
1	25,6652	1,04054	0,04054
2	110,0253	0,99099	0,00901
3	123,3209	0,99196	0,00804
4	127,2139	0,9922	0,0078
5	126,1369	0,99213	0,00787
6	126,7573	0,99217	0,00783

Os cenários a serem eliminados são aqueles que resultam em um maior índice  $ID_{2-1}$ . Portanto, elimina-se o cenário 1.

A terceira etapa é constituída por um cálculo preliminar necessário às etapas posteriores. Nesta, calcula-se o desvio padrão da amostra, que corresponde a 1,41821. Além de calcular o coeficiente de variação que foi de 0.0199.

Na quarta etapa deve-se calcular a divergência em relação à média ( $Div/\overline{RCO}$ ). Os resultados são observados na Tabela 4.6.

*Tabela 4.6 - Quarta etapa da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica*

Cenário	DIV/DP
2	0,453358
3	0,404873
4	0,392580
5	0,395906
6	0,393983

O método instrui escolher somente os cenários com menor relação por isso os cenários selecionados são o 3,4,5 e 6.

A quinta etapa, como a primeira, é um cálculo preliminar necessário na última etapa. Nesta é calculado o F.A.R como visto na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Quinta etapa da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica

Cenário	F.A.R
3	0,22222
4	0,22222
5	0,24444
6	0,24444

Finalmente, pode-se calcular a última etapa do método. Nela é calculado DIV/DP

\* F.A.R. Desse modo, se obtém os resultados presentes na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Sexta etapa da seleção de cenários promissores de reutilização hídrica

Cenário	DIV/DP * F.A.R.
3	0,089972
4	0,087240
5	0,096777
6	0,096307

A diferença entre os cenários em ordem crescente é tão pequena que faz com que os quatro cenários restantes sejam promissores para análises futuras, ou seja, estudos de viabilidade de implementação.

### 4.3 Discussão dos resultados

Na Figura 4.9 encontram-se os valores de vazão de água captada para o cenário base e os demais cenários analisados. Na Figura 4.10, pode-se comparar o custo operacional anual para estes cenários.

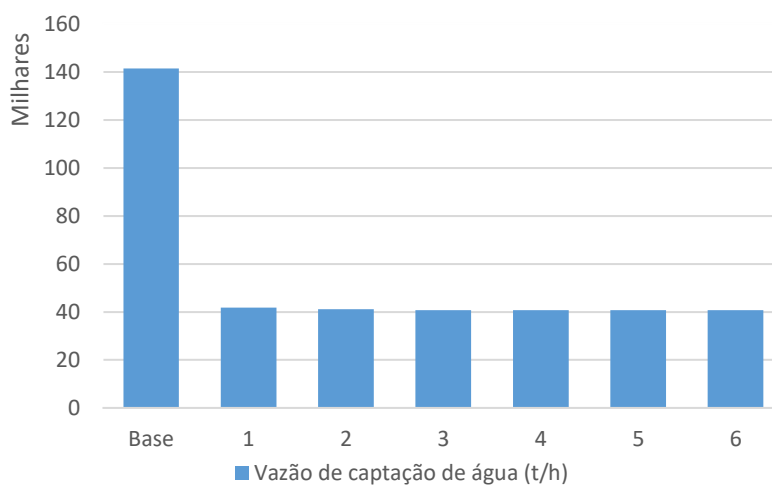
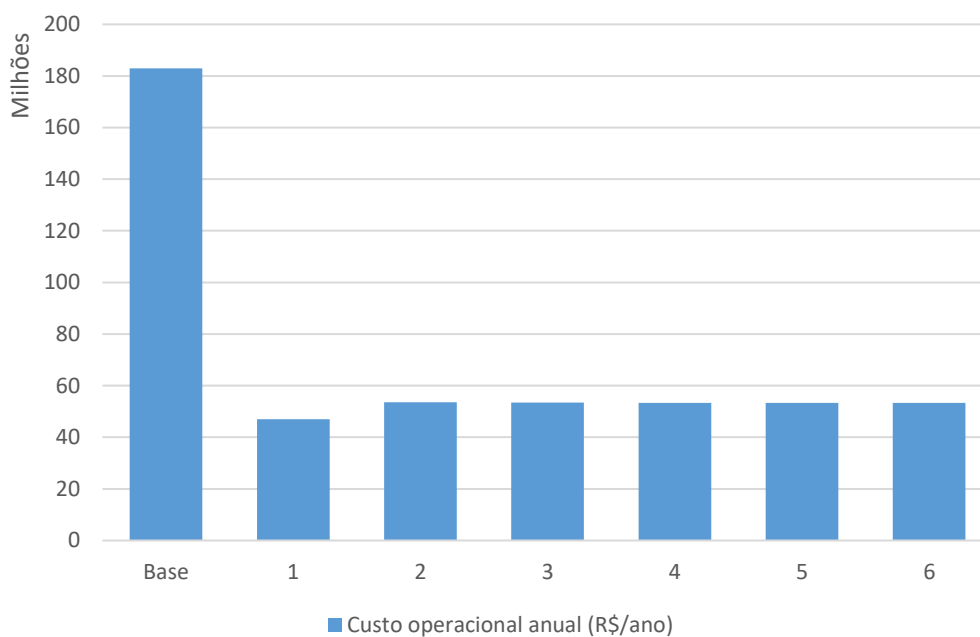


Figura 4.9 - Vazão de captação da água



*Figura 4.10 - Custo operacional anual*

Para uma análise mais detalhada foram considerados apenas as redes de águas resultantes após a seleção de cenários promissores de reutilização hídrica. Para estes, os custos foram analisados de forma separada e foram gerados os percentuais de redução da captação e do lançamento de efluente.

Percebe-se que o cenário com o menor custo, cenário 1, não faz parte desta análise, pois o mesmo foi descartado pelos critérios do funil. Entende-se que nem sempre o cenário menos custoso será o mais vantajoso, pois os custos calculados não levam em consideração a necessidade de realinhamento das correntes. Contudo, o número de correntes realinhadas no cenário 1 é menor do que as correntes dos cenários que prosseguiram na análise. Neste caso, o cenário foi eliminado por possuir um alto índice de divergência. O baixo custo anual faz com que a divergência entre este cenário e a média seja alta, resultando na eliminação do mesmo. Os resultados são vistos na Figura 4.11.



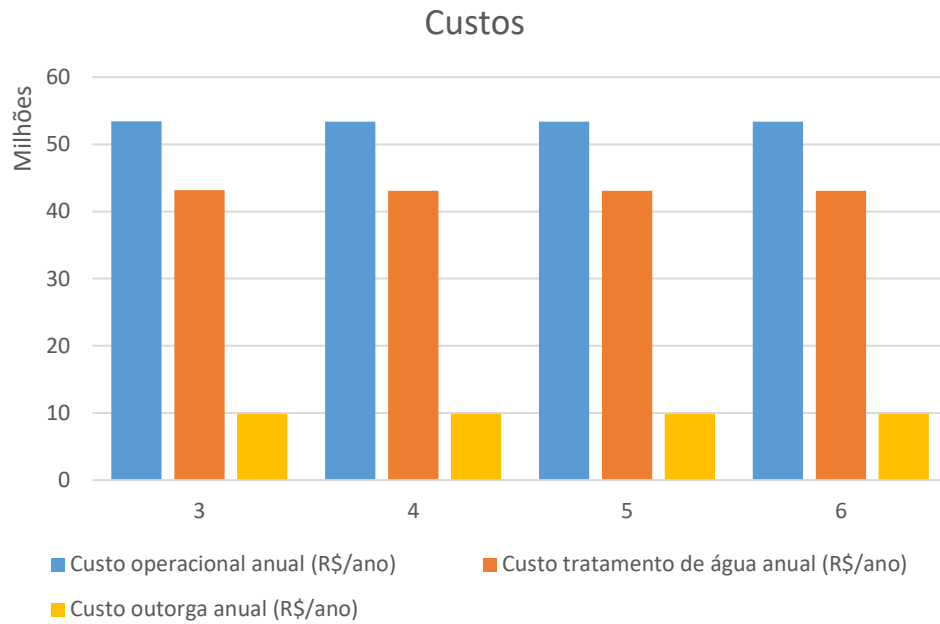


Figura 4.11 - Custos associados aos cenários promissores (R\$/ano)

A divisão dos custos é similar em todos os cenários promissores.

Por último, na Figura 4.12 foram descritos os percentuais de redução nos cenários escolhidos. Como na Figura 4.10, todos os percentuais analisados são similares para os cenários promissores.

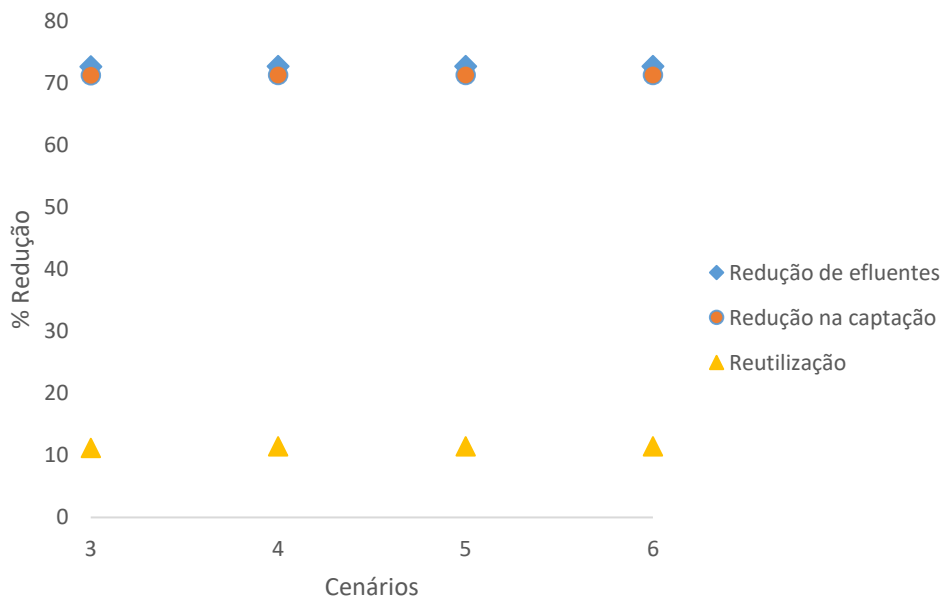


Figura 4.12 - Redução nos percentuais

## 5. Conclusões e sugestões

O DFA é um método que possibilita a geração de diversas redes de águas. Alinhado ao modelo P+ÁGUA se torna uma poderosa ferramenta para a seleção de redes promissoras a implementação. Entretanto, quando o número de cenários é pequeno, como no caso apresentado, o volume excessivo de cálculos torna uma ferramenta que deveria facilitar a escolha bastante trabalhosa para a eliminação de poucos cenários.

Apenas dois cenários, 1 e 2, foram eliminados. O cenário 1 foi eliminado mesmo possuindo o menor custo total anual. Dessa forma, conclui-se que nem sempre aquele cenário que apresenta preliminarmente o menor custo tem o potencial para se tornar viável para fins de sua implementação, porque há necessidade de se verificar os custos relacionados a bombeamento e tubulações, os quais são influenciados pelo realinhamento de correntes das propostas de reúso.

Nos cenários analisados, todos possuíram um percentual de reutilização ao redor de 11% e redução na captação em torno de 71% se comparados ao cenário base (de 141.441,14 ton/h para 41.017,93 ton/h). Pressupõe-se que a similaridade entre os cenários ocorre devido ao fato de as correntes reusadas serem provenientes do mesmo bloco de operações, no caso a preparação das cargas.

Conclui-se que o realinhamento de correntes não possui somente um ganho ambiental, mas, neste caso, por meio dos cálculos de custos, o desenvolvimento de estratégias de reutilização representou, também, vantagens econômicas significativas.

A partir destes resultados, podem ser destacadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Buscar informações referentes a outros contaminantes presentes nas correntes aquosas de processos siderúrgicos, para fins de aplicação do DFA a sistemas multicomponentes;
- Avaliar outros tipos de tratamentos de efluentes nas operações mais promissoras. Dessa forma, se tornaria possível verificar a influencia no custo devido aos diferentes tipos de tratamentos;
- Estudar o “*fator distância*” no F.A.R. para adicionar constantes que representem a distância física entre os realinhamentos das correntes com a finalidade de o tornar mais próximo de retratar a realidade.

## 6. Referências bibliográficas

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: 10 maio de 2017.

ABREU FILHO, J.C.F., SOUZA, C.P., GONÇALVES, D.A., CURY, M.V.Q., **Finanças corporativas**, 9ª edição revista, Rio de Janeiro: Editora FGV, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Acesso à informação. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/acessoainformacao/perguntasfrequentes.aspx>>. Acesso em: 15 maio de 2017.

AISI – AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. Coke Production For Blast Furnace Ironmaking. Disponível em: <<http://www.steel.org/>>. Acesso em: 10 maio de 2017.

ANA – Agencia Nacional de água. O Comitê de Bacia Hidrográfica: o que é e o que faz? / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: SAG, 2011. Caderno de Capacitação em Recursos Hídricos. Disponível em <[http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20120809150432\\_Volume\\_1.pdf](http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20120809150432_Volume_1.pdf)> Acesso em 12 de junho de 2017.

ARAÚJO, L. A., **Manual de Siderurgia**, vol. I, 1 ed., São Paulo: Editora Arte e Ciência, 1997.  
AUDEH, D. J. S. A. Aplicação de modelo para o gerenciamento do uso racional de água em processos químicos. 2015. 274 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

ARCELORMITTAL, TUBARÃO. Disponível em <http://tubarao.arcelormittal.com/meioambiente/> Acesso em 12 de maio de 2017.

BAGAJEWICZ MJ, RIVAS M, SAVELSKI MJ. “A robust method to obtain optimal and sub-optimal design and retrofit solutions of water utilization systems with multiple contaminants in process plants.” **Computers & Chemical Engineering**. 24: (2-7), 1461-1466, Jul 15, 2000.

BARROS, W.P. Da Outorga do Direito de Uso da Água. 2005. Palestra proferida no 1º Seminário do Centro de Estudos do Tribunal de Justiça – Direitos da Água em 29 mar. 2005.

CALIXTO, E. E. S., QUARESMA, A. C. L., QUEIROZ, E. M., Pessoa, F. L. P. 2015. Water sources diagram in multiple contaminant industrial case studies: adoption of a decomposition approach. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 54, 10040-10053.

CASTRO, P.M., MATOS, H.A., FERNANDES, M.C., NUNES, C.P. Improvements for mass-exchange networks design. *Chemical Engineering Science*, v. 54, no. 11, p. 1649-1665, 1999.

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura. Disponível em <http://www.fao.org/brasil/pt/> Acesso em 25 de maio de 2017.

FRANÇA, A.L.F. Minimização do consumo de água e da geração de efluentes líquidos em siderurgia. 2012. 173 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

FRANCISCO, F. S., BAGAJEWICZ, M. J., PESSOA, F. L. P., QUEIROZ, E. M. 2015. Extension of the water sources diagram method to systems with simultaneous fixed flowrate and fixed load processes. **Chemical Engineering Research and Design**, 104, 752-772.

GOMES, J.F.S. Procedimento para a minimização de efluentes aquosos. 2002. 230 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

GOMES, J.F.S., MIRRE, R.C., DELGADO, B.E.P.C., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., 2013. Water sources diagram in multiple contaminant processes: maximum reuse. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 52, 4, 1667-1677.

GOMES, J.F.S., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., 2007. Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant. **Journal of Cleaner Production**, 15, 5, 474-485

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

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: 05 abril. 2017

IRON AND STEEL INDUSTRY. **Iron and Steel Production**. Disponível em: <<http://www.docin.com/p-230127105.html>>. Acesso em: 09 jul. 2017.

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

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.

MARQUES, S.V. Minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos: estudos de caso. 2008. 242 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008

MIRRE, R. C. Metodologia para o gerenciamento sustentável do reúso de águas e efluentes industriais por meio da integração de processos. 2012. 686 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MIRRE, R. C. **Reúso de Água em Processos Químicos: Modelo Integrado para Gerenciamento Sustentável**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Appris, 2015, 249 p.

NAVARRO, R. F, A Evolução dos Materiais . Parte1 : da Pré-história ao Início da Era Moderna. **Revista Eletrônica de Materiais E Processos**, 1, p. 1–11, 2006  
ODLARE, M. **Introductory Chapter for Water Resources**. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Suécia: Elsevier, 2014.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. A ONU e a Água. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-em-acao/a-onu-e-a-agua/>>. Acesso em: 28 de maio de 2017.

REUTERS BRASIL. “**Governo do RJ negocia redução do consumo de água com indústrias**”. Disponível em: <<http://br.reuters.com/article/topNews/idBRKB NOL310T20150130>>. Acesso em: 30 de maio de 2017.

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.

SAMANEZ, C.P., **Engenharia econômica**, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SANTOS, R. P. Extensão e automatização do Diagrama de Fontes de Água usado no gerenciamento e consumo de água em Plantas Industriais. 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SCARLATI, P. R. S. Redução do consumo de água na indústria petroquímica. 2013. 225 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

STEEL UNIVERSITY. **Steel**. Disponível em: <<http://www.steeluniversity.org/>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

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 maio. 2017.

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

WANG, Y. P.; SMITH, R. Wastewater minimisation. **Chemical Engineering Science**. Manchester, v. 49, n. 7, p. 981-1006, abr. 1994a

WANG, Y. P.; SMITH, R. Design of distributed effluent treatment systems. **Chemical Engineering Science**. Manchester, v. 49, n. 18, p. 3127-3145, set. 1994b.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Wastewater minimization with flowrate constrains. **Chemical Engineering Research & Design**. Manchester, v. 73, n. 8, p. 889-904, 1995.

WSA – WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel**. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

## Apêndices

---

Balanços hídricos correspondentes aos fluxogramas.

Tabela A.0.1 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 1

Número corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nome	Saída ETA	Soma (1+2+3+4+6)	Entrada OP1	Entrada OP2	Entrada OP3	Entrada OP4	Perda OP4	Entrada OP6	Saída OP1	Saída OP2	Saída OP3	Saída OP4	Saída OP6	Efluente OP1	Efluente OP2
Vazão (ton/h)	37373,36	1235,52	318,50	68,91	19,33	738,78	161,00	90,00	379,00	82,00	0,00	646,00	0,02	379,00	82,00
Concentração SST (ppm)	21,94	26,55	28,35	28,35	28,35	27,57	221,57	10,00	66,35	80,35	41,35	221,57	46,00	66,35	80,35

Número corrente	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome	Efluente OP3	Entrada OP26	Entrada OP27	Entrada OP28	Saída OP26	Saída OP27	Saída OP28	Entrada OP9	Perda OP9	Saída OP9	Soma Bloco3	Entrada OP11	Entrada OP13	Perda OP13	Saída OP11
Vazão (ton/h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1799,23	353,00	3029,00	695,61	695,61	0,00	74,00	1290,00
Concentração SST (ppm)	41,35	66,35	80,35	41,35	22,00	22,00	14,40	45,79	1415,79	1415,79	45,73	45,73	150,00	250,00	5956,73

Número corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Nome	Saída OP13	Entrada OP15	Perda OP15	Saída OP15	Soma Bloco5	Entrada OP17	Entrada OP19	Perda OP19	Entrada OP 21	Entrada OP23	Perda OP23	Saída OP17	Saída OP19	Saída OP21	Saída OP23
Vazão (ton/h)	1162,80	17209,00	729,00	15243,20	16434,00	16,00	14737,00	302,00	711,00	970,00	31,00	16,00	13164,34	711,00	0,00
Concentração SST (ppm)	250,00	20,00	150,00	150,00	20,00	20,00	20,00	70,00	20,00	20,00	69,00	88,00	70,00	1782,00	69,00

Tabela A.0.2 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 2

Número corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nome	Saída ETA	Soma (1+2+3+4+6)	Entrada OP1	Entrada OP2	Entrada OP3	Entrada OP4	Perda OP4	Entrada OP6	Saída OP1	Saída OP2	Saída OP3	Saída OP4	Saída OP6	Efluente OP1	Efluente OP2
Vazão (ton/h)	36733,43	1029,56	239,61	63,36	13,00	623,59	161,00	90,00	379,00	82,00	0,00	807,00	0,00	379,00	82,00
Concentração SST (ppm)	22,04	32,61	34,66	35,00	25,00	35,00	229,00	10,00	72,66	87,00	38,00	229,00	46,00	72,66	87,00

Número corrente	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome	Efluente O P3	Entrada O P26	Entrada OP27	Entrada OP28	Saída OP26	Saída OP27	Saída OP28	Entrada OP9	Perda OP9	Saída OP9	Soma Bloco3	Entrada OP11	Entrada OP13	Perda OP13	Saída OP11
Vazão (ton/h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1487,54	353,00	3029,00	573,33	573,33	0,00	74,00	1290,00
Concentração SST (ppm)	38,00	72,66	87,00	38,00	22,00	22,00	14,40	50,00	1420,00	1420,00	50,00	50,00	150,00	250,00	5961,00

Número corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Nome	Saída OP13	Entrada OP15	Perda OP15	Saída OP15	Soma Bloco5	Entrada OP17	Entrada OP19	Perda OP19	Entrada OP 21	Entrada OP23	Perda OP23	Saída OP17	Saída OP19	Saída OP21	Saída OP23
Vazão (ton/h)	1162,80	17209,00	729,00	15243,20	16434,00	16,00	14737,00	302,00	711,00	970,00	31,00	16,00	12524,44	711,00	0,00
Concentração SST (ppm)	250,00	20,00	150,00	150,00	20,00	20,00	20,00	70,00	20,00	20,00	69,00	88,00	70,00	1782,00	69,00



Tabela A.0.3 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 3

Número corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nome	Saída ETA	Soma (1+2+3+4+6)	Entrada OP1	Entrada OP2	Entrada OP3	Entrada OP4	Perda OP4	Entrada OP6	Saída OP1	Saída OP2	Saída OP3	Saída OP4	Saída OP6	Efluente OP1	Efluente OP2
Vazão (ton/h)	36354,43	1029,56	239,61	63,36	13,00	623,59	161,00	90,00	379,00	82,00	0,00	807,00	0,00	0,00	82,00
Concentração SST (ppm)	22,08	32,76	34,66	35,23	25,00	35,23	229,23	10,00	72,66	87,23	38,00	229,23	46,00	72,66	87,23

Número corrente	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome	Efluente O P3	Entrada O P26	Entrada OP27	Entrada OP28	Saída OP26	Saída OP27	Saída OP28	Entrada OP9	Perda OP9	Saída OP9	Soma Bloco3	Entrada OP11	Entrada OP13	Perda OP13	Saída OP11
Vazão (ton/h)	0,00	379,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1487,54	353,00	3029,00	573,33	573,33	0,00	74,00	1290,00
Concentração SST (ppm)	38,00	72,66	87,23	38,00	22,00	22,00	14,40	50,00	1420,00	1420,00	50,00	50,00	150,04	250,04	5961,00

Número corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Nome	Saída OP13	Entrada OP15	Perda OP15	Saída OP15	Soma Bloco5	Entrada OP17	Entrada OP19	Perda OP19	Entrada OP 21	Entrada OP23	Perda OP23	Saída OP17	Saída OP19	Saída OP21	Saída OP23
Vazão (ton/h)	1162,80	16830,00	729,00	15243,20	16434,00	16,00	14737,00	302,00	711,00	970,00	31,00	16,00	12524,44	711,00	0,00
Concentração SST (ppm)	250,04	20,04	150,04	150,04	20,00	20,00	20,00	70,00	20,00	20,00	69,00	88,00	70,00	1782,00	69,00

TabelaA.0.4 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 4

Número corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nome	Saída ETA	Soma (1+2+3+4+6)	Entrada OP1	Entrada OP2	Entrada OP3	Entrada OP4	Perda OP4	Entrada OP6	Saída OP1	Saída OP2	Saída OP3	Saída OP4	Saída OP6	Efluente OP1	Efluente OP2
Vazão (ton/h)	36272,43	1029,56	239,61	63,36	13,00	623,59	161,00	90,00	379,00	82,00	-	807,00	-	-	-
Concentração SST (ppm)	17,20	30,87	33,70	32,73	25,00	32,73	226,73	10,00	71,70	84,73	38,00	226,73	46,00	71,70	84,73

Número corrente	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome	Efluente O P3	Entrada O P26	Entrada OP27	Entrada OP28	Saída OP26	Saída OP27	Saída OP28	Entrada OP9	Perda OP9	Saída OP9	Soma Bloco3	Entrada OP11	Entrada OP13	Perda OP13	Saída OP11
Vazão (ton/h)	0,00	379,00	82,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1487,54	353,00	3029,00	573,33	573,33	0,00	74,00	1290,00
Concentração SST (ppm)	38,00	71,70	84,73	38,00	22,00	22,00	14,40	44,40	1414,40	1414,40	44,44	44,44	140,27	240,27	5955,44

Número corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Nome	Saída OP13	Entrada OP15	Perda OP15	Saída OP15	Soma Bloco5	Entrada OP17	Entrada OP19	Perda OP19	Entrada OP 21	Entrada OP23	Perda OP23	Saída OP17	Saída OP19	Saída OP21	Saída OP23
Vazão (ton/h)	1162,80	16748,00	729,00	15243,20	16434,00	16,00	14737,00	302,00	711,00	970,00	31,00	16,00	12524,44	711,00	-0,01
Concentração SST (ppm)	240,27	10,27	140,27	140,27	20,00	20,00	20,00	70,00	20,00	20,00	69,00	88,00	70,00	1782,00	69,00

Tabela A.0.5 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 5

Número corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nome	Saída ETA	Soma (1+2+3+4+6)	Entrada OP1	Entrada OP2	Entrada OP3	Entrada OP4	Perda OP4	Entrada OP6	Saída OP1	Saída OP2	Saída OP3	Saída OP4	Saída OP6	Efluente OP1	Efluente OP2
Vazão (ton/h)	36269,54	1026,61	236,66	63,36	13,00	623,59	161,00	90,00	379,00	82,00	0,00	807,00	0,00	0,00	0,00
Concentração SST (ppm)	22,04	32,68	35,00	35,00	25,00	35,00	229,00	10,00	73,00	87,00	38,00	229,00	46,00	73,00	87,00

Número corrente	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome	Efluente O P3	Entrada O P26	Entrada OP27	Entrada OP28	Saída OP26	Saída OP27	Saída OP28	Entrada OP9	Perda OP9	Saída OP9	Soma Bloco3	Entrada OP11	Entrada OP13	Perda OP13	Saída OP11
Vazão (ton/h)	0,00	379,00	82,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1487,60	353,00	3029,00	573,33	573,33	0,00	74,00	1290,00
Concentração SST (ppm)	38,00	73,00	87,00	38,00	22,00	22,00	14,40	50,00	1420,00	1420,00	50,00	50,00	149,96	249,96	5961,00

Número corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Nome	Saída OP13	Entrada OP15	Perda OP15	Saída OP15	Soma Bloco5	Entrada OP17	Entrada OP19	Perda OP19	Entrada OP 21	Entrada OP23	Perda OP23	Saída OP17	Saída OP19	Saída OP21	Saída OP23
Vazão (ton/h)	1162,80	16748,00	729,00	15243,20	16434,00	16,00	14737,00	302,00	711,00	970,00	31,00	16,00	12521,55	711,00	0,00
Concentração SST (ppm)	249,96	19,96	149,96	149,96	20,00	20,00	20,00	70,00	20,00	20,00	69,00	88,00	70,00	1782,00	69,00

Tabela A.0.6 - Balanço Hídrico corresponde ao fluxograma do cenário 6

Número corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nome	Saída ETA	Soma (1+2+3+4+6)	Entrada OP1	Entrada OP2	Entrada OP3	Entrada OP4	Perda OP4	Entrada OP6	Saída OP1	Saída OP2	Saída OP3	Saída OP4	Saída OP6	Efluente OP1	Efluente OP2
Vazão (ton/h)	36265,79	1035,77	245,82	63,36	13,00	623,59	161,00	90,00	379,00	82,00	13,00	807,00	0,00	0,00	0,00
Concentração SST (ppm)	22,09	32,70	35,00	35,00	25,00	35,00	229,00	10,00	73,00	87,00	38,00	229,00	46,00	73,00	87,00

Número corrente	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Nome	Efluente O P3	Entrada O P26	Entrada OP27	Entrada OP28	Saída OP26	Saída OP27	Saída OP28	Entrada OP9	Perda OP9	Saída OP9	Soma Bloco3	Entrada OP11	Entrada OP13	Perda OP13	Saída OP11
Vazão (ton/h)	0,00	379,00	82,00	13,00	0,00	0,00	0,00	1487,69	353,00	3029,00	573,33	573,33	0,00	74,00	1290,00
Concentração SST (ppm)	38,00	73,00	87,00	38,00	22,00	22,00	14,40	50,00	1420,00	1420,00	50,00	50,00	150,05	250,05	5961,00

Número corrente	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Nome	Saída OP13	Entrada OP15	Perda OP15	Saída OP15	Soma Bloco5	Entrada OP17	Entrada OP19	Perda OP19	Entrada OP 21	Entrada OP23	Perda OP23	Saída OP17	Saída OP19	Saída OP21	Saída OP23
Vazão (ton/h)	1162,80	16735,00	729,00	15243,20	16434,00	16,00	14737,00	302,00	711,00	970,00	31,00	16,00	12517,79	711,00	0,00
Concentração SST (ppm)	250,05	20,05	150,05	150,05	20,00	20,00	20,00	70,00	20,00	20,00	69,00	88,00	70,00	1782,00	69,00

## **Anexos**

---

A seguir, seguem os diagramas de DFA gerados por França (2012) por meio do software MINEA® correspondentes as redes de águas geradas neste trabalho.

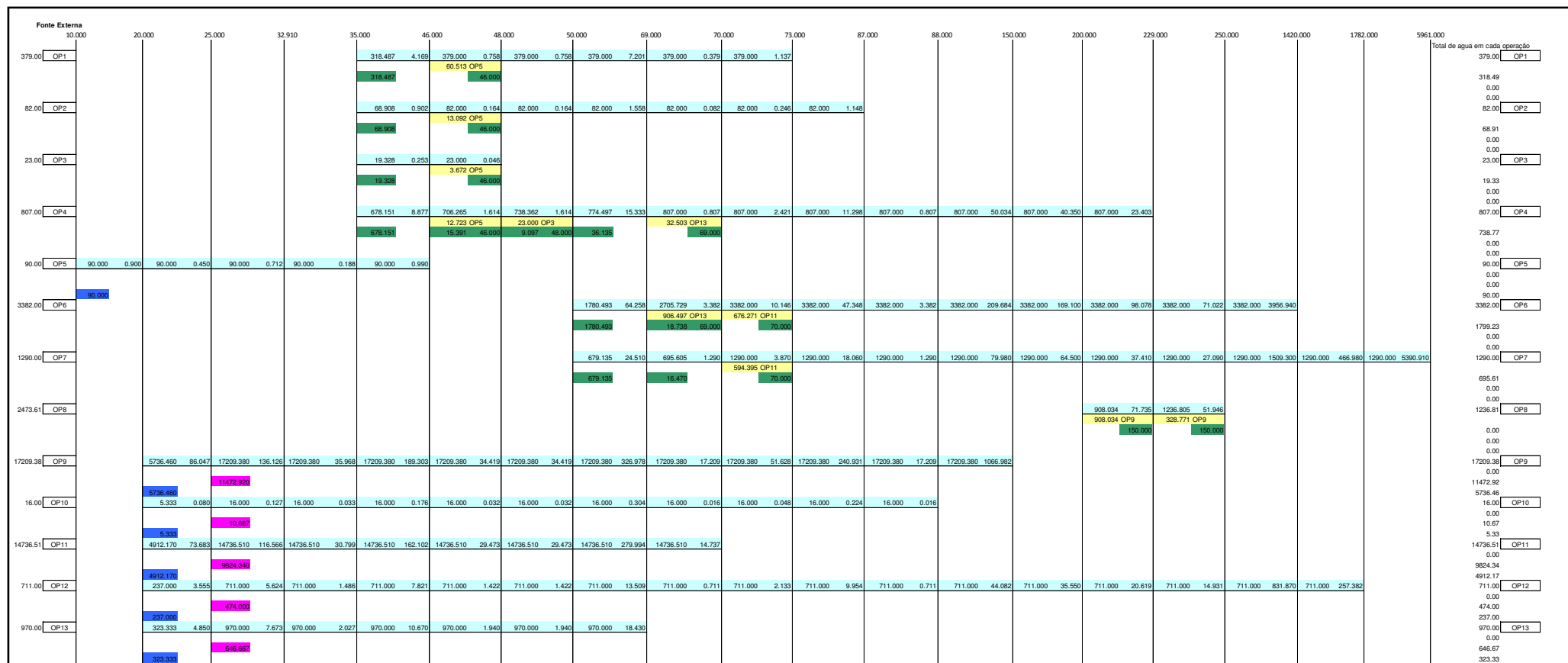


Figura A1.1 - Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 1(FRANÇA, 2012)

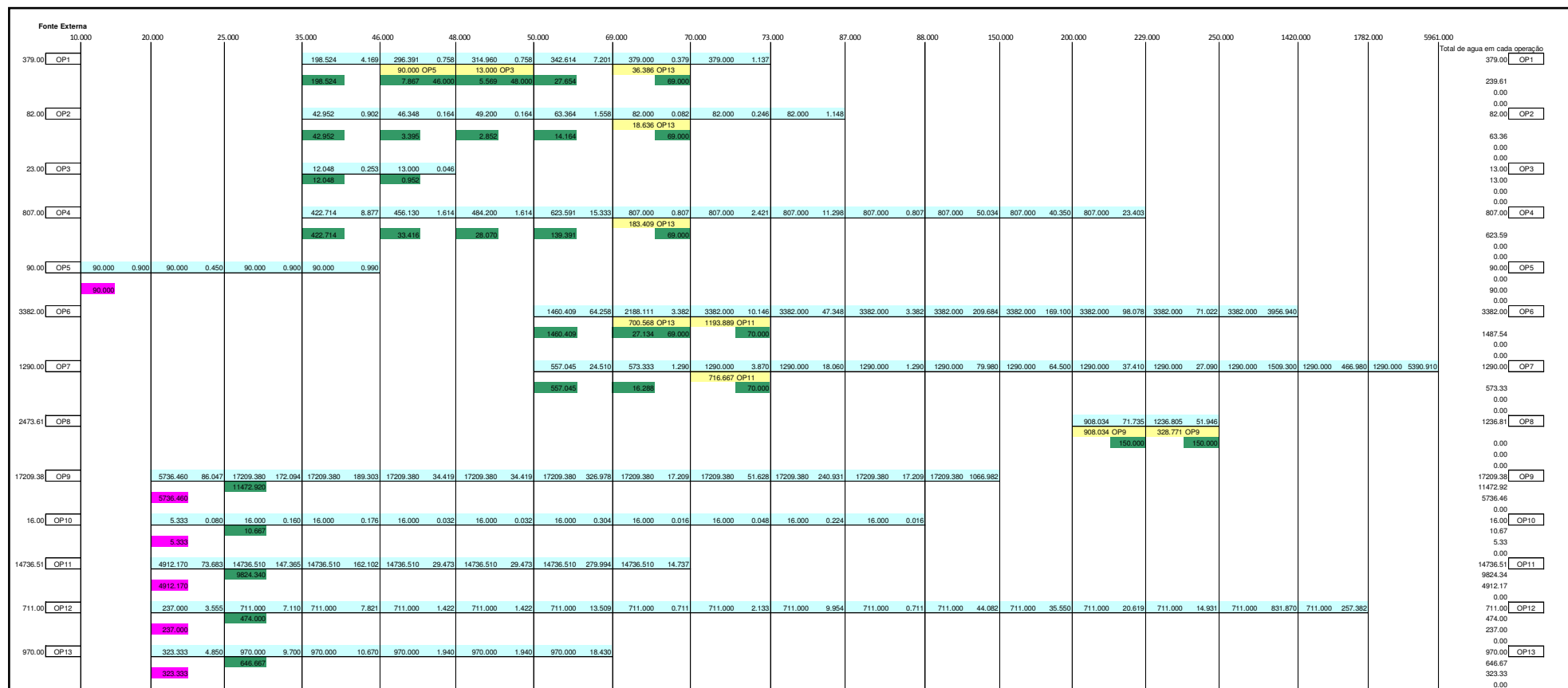


Figura A1.2 - Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 2 (FRANÇA, 2012)

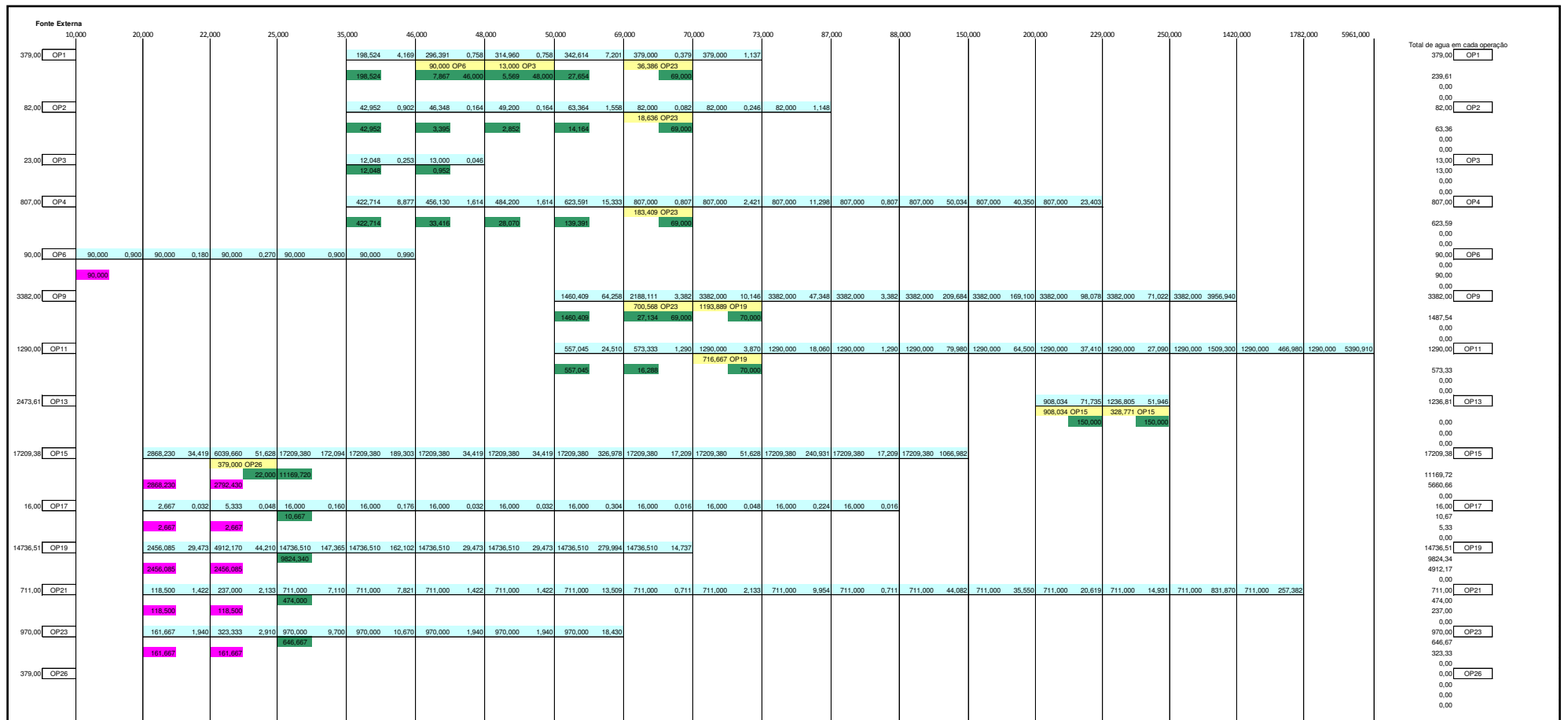


Figura A1.3 - Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 3(FRANÇA, 2012)



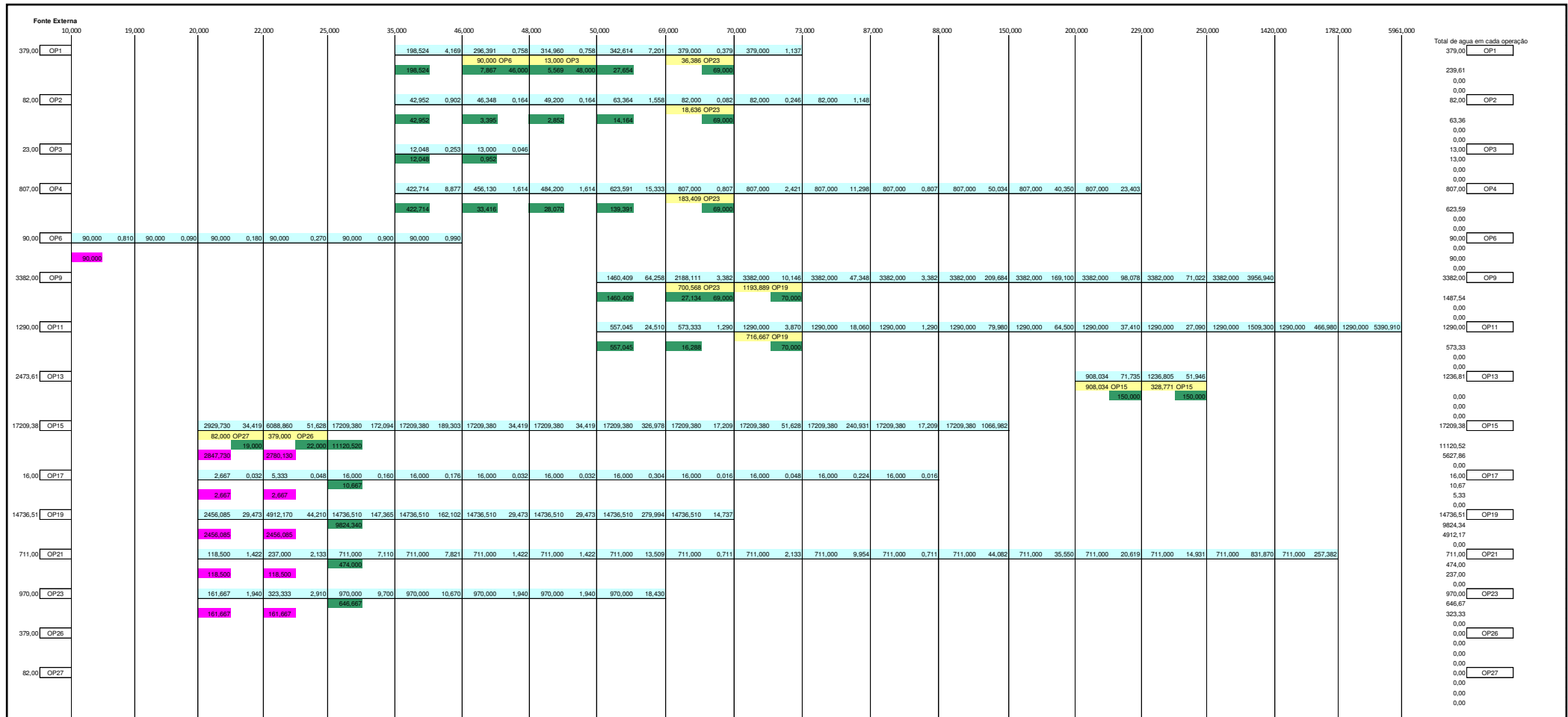


Figura A1.4 - Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 4(FRANÇA, 2012)

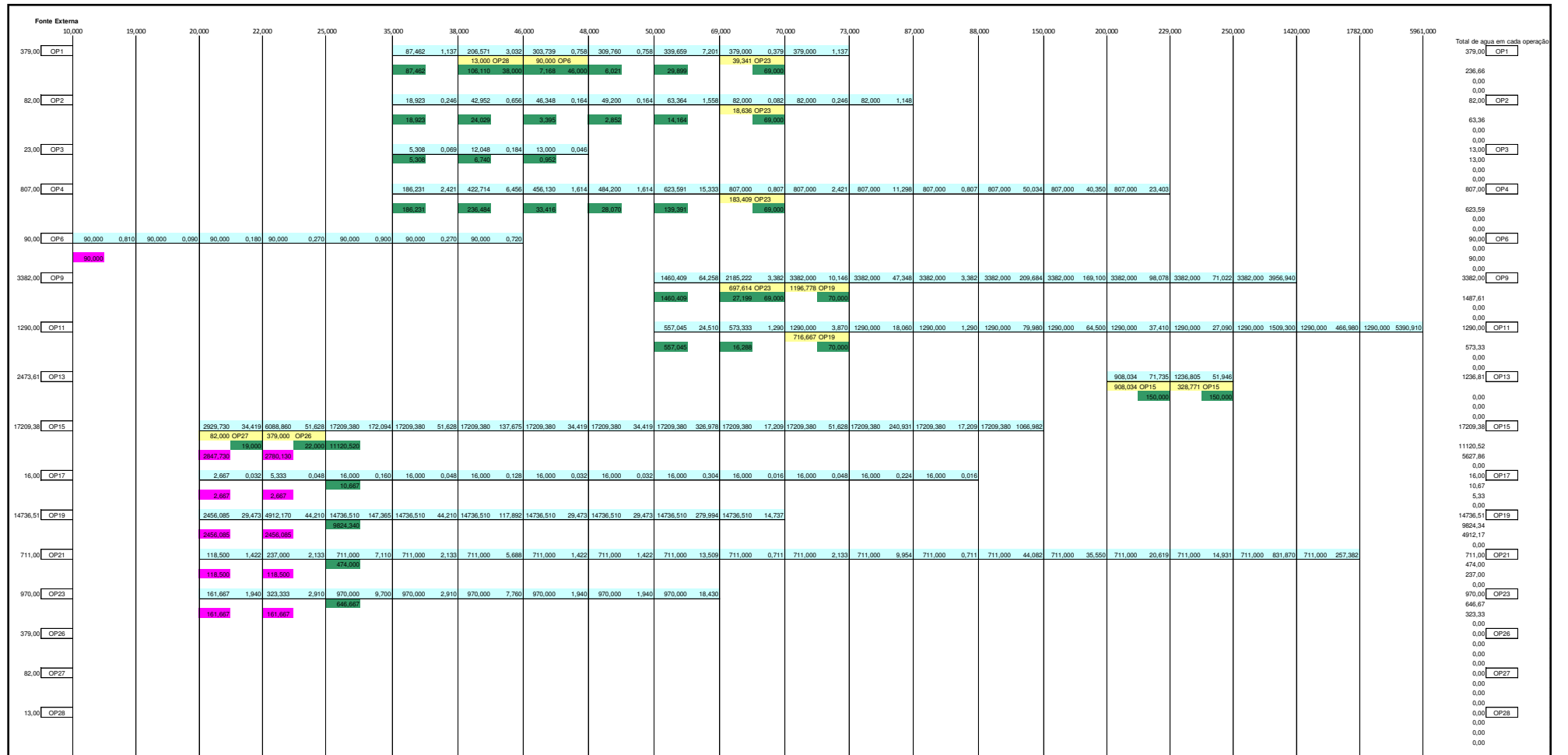


Figura A1.5 - Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 5 (FRANÇA, 2012)

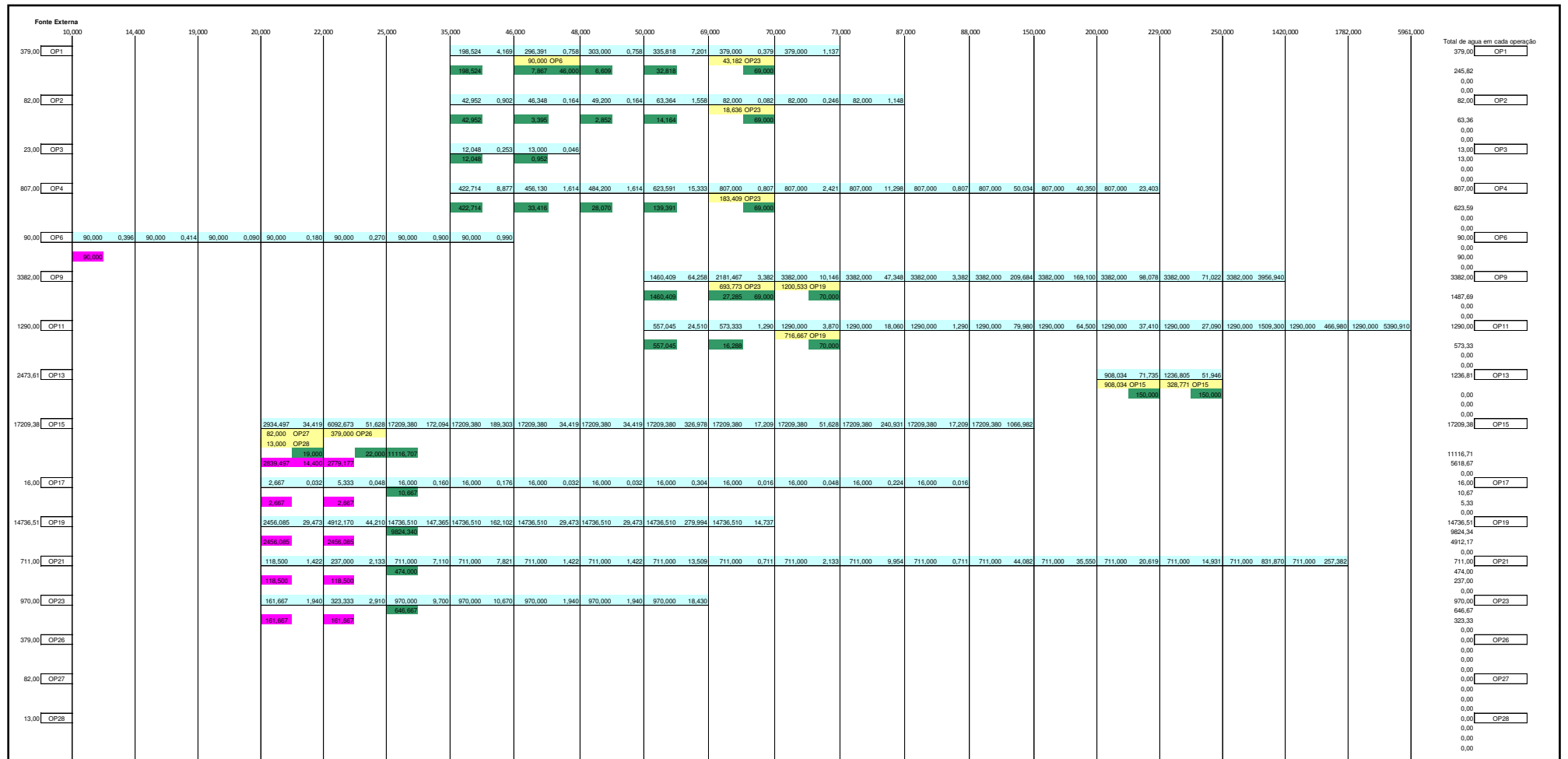


Figura A1.6 - Diagrama de Fontes de Água considerando as condições estabelecidas no Cenário 6 (FRANÇA, 2012)