

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

ÉVERSON GARDEL DE MELO

**OPERAÇÃO SUSTENTÁVEL EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA:
Uma Análise Sob a Ótica da Produção Mais Limpa (P+L)**

São Leopoldo

2021

ÉVERSON GARDEL DE MELO

**OPERAÇÃO SUSTENTÁVEL EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA:
Uma Análise Sob a Ótica da Produção Mais Limpa (P+L)**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes

São Leopoldo

2021

M528o Melo, Éverson Gardel de.
Operação sustentável em sistemas de distribuição de água : uma análise sob a ótica da produção mais limpa (P+L) / por Éverson Gardel de Melo. – 2021.
152 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2021.
“Orientador: Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes”.

1. Sustentabilidade. 2. Produção mais limpa (P+L).
3. Pegada hídrica. 4. Energia incorporada.
5. Abastecimento de água. I. Título.

CDU: 628.1:504

ÉVERSON GARDEL DE MELO

**OPERAÇÃO SUSTENTÁVEL EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA:
Uma Análise Sob a Ótica da Produção Mais Limpa (P+L)**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 26 de fevereiro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Daiane Calheiro Evaldt – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Feliciane Andrade Brehm – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Marco Aurélio Holanda de Castro – Universidade Federal do Ceará

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo e sua infinita sabedoria.

A minha família, fonte de exemplos e norte para projetos e realizações.

A Unisinos, por meio do professor Dr. Eng. Carlos Alberto Mendes Moraes pela presença fundamental neste trabalho apresentando com excelência as bases da produção mais limpa.

“O universo é feito de água”.

Tales de Mileto

RESUMO

Sistemas de abastecimento de água possuem uma série de fatores que influenciam neste processo. Aspectos sociais, econômicos e ambientais revelam o quão sustentável pode ser a distribuição de água. O desafio de garantir o acesso à água para toda população mundial passa por encontrar o equilíbrio entre estes três pilares da sustentabilidade. No Brasil inúmeras internações hospitalares são causadas pela ausência ao acesso de água com qualidade. O presente trabalho busca em um sistema de distribuição, perpassando seus componentes físicos, instruções técnicas e rotinas operacionais, a avaliação deste, de modo a obter o menor custo e a menor retirada de água dos mananciais utilizando estratégias de Produção mais Limpa (P+L). Outros objetivos estão elencados e dizem respeito a avaliação através da pegada hídrica e da energia incorporada no processo principal, distribuição propriamente dita e no processo de produção de insumos como produtos químicos e tubulações. A concepção de uma ferramenta socioambiental que inter-relacione volume produzido, volume faturado e o consumo/geração de energia elétrica também é um dos objetivos deste estudo. Para a execução deste trabalho a metodologia utilizada baseou-se em quatro cenários que foram simulados no *software* de simulação hidráulica EPANET. O cenário 1 tratou da modelagem de um sistema convencional de abastecimento para zonas altas com seus componentes típicos (reservatórios apoiados, elevatórias de água e reservatório elevado). O segundo cenário modifica o formato anterior com a instalação de um turbogerador e a retirada de uma elevatória de água e dois reservatórios. O cenário 3 apresenta, sobre a modelagem anterior, o acréscimo de volume faturado e, conseqüentemente, a redução de perdas aparentes. O cenário 4 aborda todas as outras implementações e acrescenta o controle da pressão de distribuição através da inclusão de três válvulas reguladoras de pressão (VRP). Os resultados apresentados mostram que à medida em que as implementações propostas são inseridas, através dos cenários simulados, as variáveis volume produzido, volume faturado e consumo/geração de energia elétrica se aproximam dentro da ferramenta socioambiental denominado diagrama 3Ss da distribuição de água. Da mesma forma, a pegada hídrica e a energia incorporada acompanham a tendência de melhoria de seus números através dos quatro cenários. Na etapa de conclusão é possível verificar reduções percentuais significativas das perdas físicas por meio de vazamentos de tubulações, cerca de 54,6 %. A redução das perdas

aparentes, a partir do cenário 3, fica na ordem de 45,5%. A energia incorporada (kWh/m³) apresenta redução significativa a partir do cenário 2, de 8,57 para 4,95 no cenário 4. A pegada hídrica apresenta redução de 3,64 no cenário 1 para 1,36 m³/m³f no cenário 4. O estudo conclui que o objetivo principal de propor um sistema de distribuição sustentável sob à ótica da produção mais limpa foi plenamente atingido, bem como todos os objetivos específicos elencados na formatação desta pesquisa. Ao fim ficam elencados, como possíveis trabalhos futuros, a avaliação do lodo das estações de tratamento, estudo sobre a substituição de tubulações e o detalhamento de seus impactos e as emissões de carbono provenientes de sistemas de abastecimento de água e sistemas de esgotamento sanitário.

Palavras-chave: Sustentabilidade. P+L. Pegada hídrica. Energia incorporada. Abastecimento de água.

ABSTRACT

Water supply systems have a number of factors that influence this process. Social, economic and environmental aspects reveal how sustainable water distribution can be. The challenge of guaranteeing access to water for the entire world population is to find a balance between these three pillars of sustainability. In Brazil, numerous hospitalizations are caused by the lack of access to quality water. The present work seeks in a distribution system, passing through its physical components, technical instructions and operational routines, the evaluation of this, in order to obtain the lowest cost and the least water withdrawal from the sources using cleaner production strategies (P + L). Other objectives are listed and relate to the evaluation through the water footprint and the energy incorporated in the main process, distribution itself and in the production process of inputs such as chemicals and pipes. The conception of a socio-environmental tool that interrelates the volume produced, the volume billed and the consumption/generation of electricity is also one of the objectives of this study. For the execution of this work, the methodology used was based on four scenarios that were simulated in the EPANET hydraulic simulation software. Scenario 1 dealt with the modeling of a conventional supply system for high areas with its typical components (supported reservoirs, water elevations and elevated reservoir). The second scenario changes the previous format with the installation of a turbogenerator and the removal of a water lift and two reservoirs. Scenario 3 shows the increase in billed volume over the previous model and, consequently, the reduction of apparent losses. Scenario 4 addresses all other implementations and adds control of distribution pressure through the inclusion of three pressure regulating valves. The results presented show that as the proposed implementations are inserted through the simulated scenarios, the variables volume produced, volume billed and consumption/generation of electric energy get closer within the socio-environmental tool called the 3Ss diagram of water distribution. In the same way, the water footprint and the incorporated energy follow the trend of improving their numbers through the four scenarios. At the conclusion stage, it is possible to see significant percentage reductions in physical losses through pipe leaks, about 54.6%. The reduction in apparent losses from scenario 3 is in the order of 45.5%. The incorporated energy (kWh/m³) shows a significant reduction from scenario 2, from 8.57 in scenario 2 to 4.95 in scenario 4. The study concludes that the main objective of proposing a sustainable distribution system from the perspective of

cleaner production was fully achieved as well as all the specific objectives listed in the format of this research. At the end, it is listed as possible future works the evaluation of the sludge of the treatment plants, a study on the replacement of pipes and the details of their impacts and the carbon emissions from water supply systems and sanitary sewage systems.

Key-words: Sustainability. Cleaner Production. Water footprint. Cumulative energy demand. Water supply.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo vicioso das perdas no saneamento	23
Figura 2 - Modelo para estratégias de transformação para <i>smarts cities</i>	28
Figura 3 - <i>Triple bottom line</i> : Tripé da sustentabilidade.....	29
Figura 4 - Estratégias para P+L.....	36
Figura 5 - Fluxograma do processo produtivo da ETA	38
Figura 6 - Diagrama de entradas e saídas	42
Figura 7 - Diagrama de entradas e saídas do abastecimento de água	43
Figura 8 - Diagrama para avaliação da Pegada hídrica para o limite urbano.....	45
Figura 9 - Comparativo entre a pegada de matéria-prima x demanda de energia acumulada para diversas matérias-primas utilizadas em processos industriais.....	47
Figura 10 - Sistema de distribuição de água.....	49
Figura 11 - Mapa de relevo de superfície	53
Figura 12 - Perdas reais	56
Figura 13 - Cruz das perdas físicas	57
Figura 14 - Monitoramento de pressão e vazão via SCADA.....	58
Figura 15 - Curva de energia para tubos.....	61
Figura 16 - Cruz de perdas aparentes.....	62
Figura 17 - Curva demanda de consumo x crescimento populacional de Seattle	63
Figura 18 - Substituição de hidrômetros na cidade de Macao	64
Figura 19 - Ponto de operação	66
Figura 20 - Pontos operacionais com e sem o uso de conversores de frequência ...	67
Figura 21 - Arquitetura da RNA.....	69
Figura 22 - Redução de vazamentos com a utilização de VRP.....	71
Figura 23 - Perfil de pressões: Controlador hidráulico padrão PID (A) e controlador PID (B)	72
Figura 24 - Desempenho de turbogeradores	73
Figura 25 - Perfil diário de vazão.....	74
Figura 26 - Energia gerada entre 6 e 20 horas.....	75
Figura 27 - Índice de perdas no faturamento para diversas companhias estaduais .	76
Figura 28 - Três passos para o controle de perdas na distribuição de água.....	78
Figura 29 - Balanço hídrico <i>bottom up</i>	80
Figura 30 - Simulação hidráulica EPANET.....	82

Figura 31 - Informações sobre materiais CES <i>EduPack</i> 2005.....	84
Figura 32 - Correlação entre a compacidade, energia incorporada e emissões de CO2 em projetos de alvenaria com blocos cerâmicos.....	85
Figura 33 - Relação de custos dos rotores	86
Figura 34 - Fluxograma da metodologia	88
Figura 35 - Construção do modelo de simulação hidráulica.....	89
Figura 36 - Setor de distribuição SD 15	91
Figura 37 - Relatório de consumo	93
Figura 38 - Tela de reservatórios SCADA SEMAE	94
Figura 39 - Execução das simulações em quatro cenários	96
Figura 40 - Cenário convencional	97
Figura 41 - Construção do modelo de simulação hidráulica.....	98
Figura 42 - Perfil de consumo diário SD15.....	99
Figura 43 - Cenário 2 com turbogerador.....	100
Figura 44 - Inserção de VRP no cenário 4.....	102
Figura 45 - Diagrama de entradas e saídas para o cenário 1	104
Figura 46 - Diagrama 3s para distribuição de água	108
Figura 47 - Campo de obtenção de dados no <i>ecoinvent</i>	110
Figura 48 - Da esquerda para a direita: zonas de pressão para os cenários 1 e 2 no SD15	115
Figura 49 - Número de nós por zonas de pressão	116
Figura 50 - Diagrama de entradas e saídas qualitativo para a distribuição de água (cenário 1).....	117
Figura 51 - Diagrama de entradas e saídas para o cenário 2	121
Figura 52 - Mudança tecnológica e de processo entre os cenários 1 e 2	126
Figura 53 - Estratégias P+L na redução de perdas aparentes no cenário 3	127
Figura 54 - Estratégias de P+L para o cenário 4	129
Figura 55 - Dados sobre a utilização de água e energia na produção de PVC e PEAD	130
Figura 56 - Energia incorporada ao longo dos 4 cenários simulados	136
Figura 57 - Simulações do cenário 2 (A) e cenário 3 (B)	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - ODS relacionados ao pilar social	30
Quadro 2 - ODS relacionados ao pilar ambiental.....	32
Quadro 3 - ODS relacionados ao pilar econômico.....	34
Quadro 4 - Elementos para diagnóstico operacional.....	52
Quadro 5 - Balanço hídrico (<i>top down</i>).....	79
Quadro 6 - Critérios de abrangência, severidade e frequência.....	105
Quadro 7 - Levantamento dos aspectos e impactos ambientais (visão geral).....	106
Quadro 8 - Aspectos e impactos ambientais para o cenário 1.....	119
Quadro 9 - Aspectos e impactos ambientais para o cenário 2.....	123
Quadro 10 - Levantamento dos aspectos e impactos ambientais do cenário 3.....	149
Quadro 11 - Levantamento dos aspectos e impactos ambientais do cenário 4.....	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização das unidades	37
Tabela 2 - Resultados do programa de P+L na ETA Barreiras	39
Tabela 3 - ICV do sistema de abastecimento de Feira de Santana	48
Tabela 4 - Perdas Totais/ANF ao redor do mundo.....	51
Tabela 5 - Dados do cadastro técnico.....	52
Tabela 6 - Natureza dos consumos	55
Tabela 7 - Propriedades dos materiais utilizados em tubulações de água	60
Tabela 8 - Parametrização das VRP no cenário 4	103
Tabela 9 - Dados operacionais de <i>VAB</i> e <i>VAT</i>	111
Tabela 10 - Componentes para estimativa da energia incorporada na produção de produtos químicos.....	113
Tabela 11 - Componentes para estimativa da energia incorporada para as tubulações do SD15	114
Tabela 12 - Variação de BE e VP para os cenários 1 e 2.....	126
Tabela 13 - Recuperação das perdas aparentes a partir do cenário 3.....	127
Tabela 14 - Volume produzido e faturado nos cenários 3 e 4	128
Tabela 15 - Pegada hídrica principal para os cenários 1,2,3 e 4.....	131
Tabela 16 - Dados de produtos químicos utilizados para cálculo da pegada hídrica secundária.....	132
Tabela 17 - Dados de tubulações para estimativa da pegada hídrica	132
Tabela 18 - Pegada hídrica secundária para os cenários 1,2, 3 e 4	133
Tabela 19 - Pegada hídrica global	133
Tabela 20 - Taxa de consumo energético por blocos para o cenário 1 e 2	134
Tabela 21 - Componentes para estimativa da <i>EIs</i> para produtos químicos	135
Tabela 22 - Energia incorporada secundária nas redes de distribuição de água	135
Tabela 23 - Energia incorporada secundária nos 4 cenários simulados	135

LISTA DE SIGLAS

A	Abrangência
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANF	Água Não Faturada
BE	Balanco Energético
BFT	Bombas Funcionando como Turbina
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CED	Cumulative Energy Demand
CEN	Consumo Energético Normalizado
CES	Cambridge Engineering Selector
Cm	Preço aproximado
DMC	Distrito de Medição e Controle
DMC	Distrito de Medição e Controle
DTIE	Division of Technology, Industry and Environment
E	Módulo de Elasticidade
EAB	Elevatória de Água Bruta
EAT	Elevatória de Água Tratada
EI	Energia Incorporada
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Estação de Tratamento de Água
F	Frequência
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
leC	Índice de Compacidade
IPF	Índice de perdas no faturamento
IPT	Índice de Perdas Totais
IWA	International Water Association
LA	Ligações Ativas
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
ND	Número de Dias Contabilizados
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

ONU	Organização das Nações Unidas
P+L	Produção Mais Limpa
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PVC	Policloreto de Vinila
R	Risco
RENRE	Recursos Energéticos Não Renováveis
RNA	Redes Neurais Artificiais
RNF	Reservatórios de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variável
RNF	Reservatório de Nível Fixo
Se	Severidade
Si	Significância
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SCADA	Sistema de Supervisão e Controle
SCI	Sistema Comercial de Informações
SD15	Setor de Distribuição 15
SEMAE	Serviço Municipal de Água e Esgotos
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TBL	Triple Bottom Line
UAS	Unidade de Ácido Sulfúrico
UNEP	United Nations Environment Program
UTE	Unidade de Tratamento de Efluente
VC	Volume Consumido
VF	Volume Faturado
VI	Volume Utilizado
VP	Volume Produzido
VRP	Válvulas Reguladoras de Pressão
VS	Volume de Serviço
X110	Índice de Interrupção no Fornecimento de Água

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 TEMA.....	22
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	22
1.3 PROBLEMA	22
1.4 OBJETIVOS	23
1.4.1 Objetivo geral	23
1.4.2 Objetivos específicos	23
1.5 JUSTIFICATIVA.....	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1 PILARES DA SUSTENTABILIDADE	27
2.1.1 Pilar social	29
2.1.2 Pilar ambiental	31
2.1.3 Pilar econômico	32
2.2 PRODUÇÃO MAIS LIMPA (P+L).....	34
2.2.1 Uso da ferramenta P+ L em processos de usuários de água	36
2.3 PEGADA HÍDRICA E DEMANDA DE ENERGIA ACUMULADA.....	43
2.4 ESTRUTURA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	48
2.5 DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	50
2.5.1 Cadastro técnico	52
2.5.2 Cadastro comercial	53
2.5.3 Perdas reais	55
2.5.4 Materiais utilizados em tubulações	58
2.5.5 Perdas aparentes	61
2.5.6 Eficiência energética em sistemas de distribuição de água	64
2.5.6.1 Consumo energético de moto bombas	65
2.5.6.2 O uso de conversores de frequência.....	66
2.5.6.3 Válvula reguladora de pressão (VRP).....	70
2.5.6.4 Turbina de hidro geração elétrica	72
2.5.7 Indicadores do sistema de distribuição de água	75
2.5.7.1 Indicadores de perdas	75
2.5.7.2 Consumo Energético Normalizado (CEN).....	76
2.5.7.3 Índice de interrupção no fornecimento de água	77

2.5.8 Balanço hídrico	77
2.6 SOBRE O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA EPANET	81
2.6.1 Propriedade dos materiais e o software CES EduPack 2005	83
3 METODOLOGIA	87
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SÃO LEOPOLDO	88
3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA	89
3.2.1 Seleção do setor de distribuição	89
3.2.2 Levantamento de dados cadastrais	92
3.2.3 Execução da simulação hidráulica	95
3.2.3.1 Cenário 1- Sistema convencional	96
3.2.3.2 Cenário 2 - Sistema atual.....	99
3.2.3.3 Cenário 3 - Sistema atual com redução de perdas aparentes.....	100
3.2.3.4 Cenário 4 - Sistema com redução de perdas aparentes e físicas	101
3.3 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA SOCIOAMBIENTAL P+L PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	103
3.4 QUANTIFICAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA E DA ENERGIA INCORPORADA NO ABASTECIMENTO DE ÁGUA	109
3.4.1 Determinação da pegada hídrica principal	110
3.4.2 Determinação da pegada hídrica secundária.....	111
3.4.3 Determinação da pegada hídrica global	112
3.4.4 Determinação da energia incorporada principal.....	112
3.4.5 Determinação da energia incorporada secundária	113
3.4.6 Determinação da energia incorporada global	114
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	115
4.1 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA.....	115
4.2 APRESENTAÇÃO DO ICV E DIAGRAMA 3S PARA A DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	117
4.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE TUBULAÇÕES	129
4.4 PEGADA HÍDRICA PRINCIPAL	131
4.5 PEGADA HÍDRICA SECUNDÁRIA	131
4.6 PEGADA HÍDRICA GLOBAL	133
4.7 ENERGIA INCORPORADA PRINCIPAL.....	134
4.8 ENERGIA INCORPORADA SECUNDÁRIA	134

4.9 ENERGIA INCORPORADA GLOBAL.....	136
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	139
REFERÊNCIAS.....	140
APÊNDICE A - SIMULAÇÕES DO CENÁRIO 2 (A) E CENÁRIO 3 (B)	148
APÊNDICE B - LEVANTAMENTO DOS ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS DO CENÁRIO 3 E 4	149

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água possuem um conjunto de fatores que influenciam neste processo. Um deles está ligado ao aspecto social, ou seja, a água como um recurso fundamental à existência humana e que nas áreas urbanas, encontra o desafio de garantir o desenvolvimento e a qualidade de vida das cidades. Estima-se que em todo o mundo cerca de 900 milhões de pessoas não têm acesso a água tratada e que o número mundial de mortes por diarreia gira em torno de 1,8 milhões/ano, sendo 88% atribuídas ao uso de água sem tratamento adequado (FORSTINUS *et al.*, 2016). No Brasil, entre os anos 2000 e 2011, a média de internações decorrentes de doenças causadas pela ausência de acesso a água de qualidade foi de 531.121/ano (UHR; SCHMECHEL; UHR, 2016).

O aspecto social dialoga diretamente com o fator econômico, pois o fornecimento de água tratada nos grandes centros urbanos depende, inevitavelmente, de projetos de sistemas de distribuição os quais envolvem recursos financeiros para a sua concepção e para a execução de um conjunto de obras de infraestrutura com este fim. Permeando estes dois aspectos, existe o fator ambiental que possui uma dependência direta dos aspectos anteriores, visto que o volume de água retirado de nossos mananciais varia de acordo com a demanda e de acordo com a forma de aplicação dos recursos financeiros e técnicos. Desta forma, considerando que o ecossistema e o capital natural em nosso planeta não são inesgotáveis, preservar, manter a saúde, o bem-estar social e econômico das pessoas dependem da integridade e manutenção de ecossistemas e dos serviços ecossistêmicos que eles fornecem (VESILIND; MORGAN; HEINEN, 2018).

A operação de um sistema de distribuição de água engloba um conjunto de componentes, instruções técnicas e rotinas operacionais, que possibilitam à água tratada chegar até o consumidor final de forma plena, isto é, sem que haja intermitências no abastecimento e de modo eficiente. A maior parte das tubulações encontra-se disposta no reticulado urbano, em todas as ruas, associadas ao trecho final da ligação ao cliente (ramal predial, com hidrômetro, para medição do consumo e faturamento), compondo o conjunto que se denomina “distribuição” (TARDELLI FILHO, 2016). Inúmeras dificuldades apresentam-se neste processo como o alto índice de perdas físicas, baixa eficiência energética, reservatórios com capacidade de reserva insuficiente, expansão urbana sem planejamento no que tange ao

abastecimento de água, grande número de intervenções em vias públicas para consertos de vazamentos, muitas vezes resultado de redes que operam acima da sua vida útil, moto bombas com elevado grau de desgaste, cadastros técnicos e comerciais desatualizados, alteração da qualidade da água ao longo da rede de distribuição, entre outros. A infraestrutura subterrânea de distribuição (válvulas, tubos etc.), construída nos Estados Unidos há mais de 50 anos, apresenta cerca de 240 mil vazamentos significativos anuais, totalizando uma perda de 6.435.200 milhões de metros cúbicos e um prejuízo econômico na ordem de \$ 2,6 bilhões (U. S. EPA, 2013). No Brasil a média de perdas na produção, volume perdido entre a estação de tratamento e o consumidor final, está em torno de 40,8% (SNIS, 2018). A partir deste cenário, alternativas a este modelo são propostas e implementadas em contraponto ao quadro atual extremamente dispendioso e que não dialoga com cidades e comunidades sustentáveis.

O estado da arte para distribuição de água é a constituição de setores passíveis de medição e verificação de desempenho. Imprescindível, também, que seja possível identificar, com celeridade, não conformidades como vazamentos, sub medição de hidrômetros e alto consumo energético. Este formato de distribuição é conhecido como Distrito de Medição e Controle (DMC). Distrito de Medição e Controle é a subdivisão da rede de distribuição, com medição da vazão de entrada para gestão e controle das ações de combate às perdas (ABES, 2015). A proposta deste projeto de pesquisa vai ao encontro destes três aspectos, ou seja, propõe um sistema de distribuição que possa garantir o abastecimento de água a toda a população (social), com o menor custo possível (econômico) e com a menor retirada de água dos mananciais (ambiental). Desta forma, traz para o saneamento o conceito dos três pilares da sustentabilidade, *Triple Bottom Line*, em sinergia com os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), dentre os quais se destacam o ODS 6 e 7, Água Limpa e Saneamento; Energia Limpa e Acessível, respectivamente. Estes dois objetivos dialogam diretamente com dois elementos que definem a operação sustentável de um sistema de distribuição: o uso racional de água e energia.

1.1 TEMA

Este trabalho tem como tema central a operação sustentável de sistemas de distribuição de água, observando e quantificando os aspectos ambientais, sociais e econômicos desta etapa do abastecimento de água.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa limita-se ao estudo do sistema de distribuição de água através da análise do consumo energético e das perdas de água durante este processo relacionando o seu impacto ambiental, social e econômico.

1.3 PROBLEMA

Sistemas de distribuição de água apresentam necessidade permanente de melhoria de eficiência, haja vista, as perdas físicas decorrentes do número de vazamentos em suas tubulações, o consequente consumo de energia elétrica elevado e as perdas aparentes que decorrem da sub medição do volume entregue ao consumidor final. O volume de perdas físicas é significativo no abastecimento de água, destes, cerca de 70 a 80 % ocorrem na rede de distribuição e as demais na captação de água e na estação de tratamento (MARCKA, 2004). Dentro deste cenário o consumo energético aumenta, devido ao volume de água excedente causado por estes vazamentos. Além disso o medidor de consumo, ou seja, a “caixa registradora” do serviço de fornecimento de água, muitas vezes encontra-se subdimensionada ou obsoleta devido ao tempo de funcionamento, ocasionando o que se denomina de ciclo vicioso das perdas em saneamento conforme a Figura 1.

Figura 1 - Ciclo vicioso das perdas no saneamento



Fonte: International Finance Corporation (2013).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar um sistema de distribuição de água com o menor custo e menor retirada de água dos mananciais a partir de estratégias de produção mais limpa.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos para este estudo constam nas seguintes alíneas:

- construir o modelo de simulação hidráulica do sistema de distribuição de água;
- desenvolver a ferramenta socioambiental para diagnóstico operacional de sistemas de distribuição de água municipal em 4 cenários de distribuição de água;
- avaliar as propriedades dos materiais de tubulações para diferentes funções de distribuição de água;
- avaliar a pegada hídrica dos 4 cenários estudados;

e) comparar a energia incorporada nos 4 cenários.

1.5 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho encontra justificativa na necessidade de formatar um sistema de distribuição de água que contemple os três aspectos da sustentabilidade, promovendo menor retirada de água dos mananciais com menor custo possível. Para isto, torna-se necessária a construção de ferramenta socioambiental, bem como o uso de simulações hidráulicas e indicadores de sustentabilidade que vá ao encontro desses objetivos.

Embora a necessidade de consumo de água tratada de uma cidade seja de conhecimento da operadora deste serviço, a retirada de água do manancial pode variar de acordo com a eficiência do processo de tratamento e distribuição de água. Isto acontece porque durante este processo contínuo de produção, que é o abastecimento de água, perdas podem ocorrer na adução de água bruta, no tratamento de água propriamente dito e na etapa de distribuição de água a partir dos reservatórios. Cada metro cúbico perdido gera perdas subsequentes em insumos como energia elétrica, produtos químicos, tubos e equipamentos utilizados neste processo. Por se tratar de um processo que utiliza como matéria-prima água bruta proveniente dos mananciais da cidade, fica explícito o aspecto ambiental, pois está sendo extraído um recurso natural (hídrico) diretamente de sua fonte. Para esta extração deve-se implantar estações de bombeamento (elevatórias), estações de tratamento, e sistemas de distribuição. Após a implantação de todo o processo, a operação do sistema requer insumos como energia elétrica, produtos químicos, entre outros. O aspecto econômico fica inserido neste processo através dos recursos necessários para distribuir água tratada e varia de acordo com a sua eficiência e a demanda solicitada. O aspecto social encontra-se no suprimento da demanda de consumo garantido pelo acesso sem intermitência e com preço justo de modo a suprir as necessidades das comunidades por este sistema abastecido. A garantia de preço justo passa, dentre outros fatores, pela correta medição do volume fornecido para as residências, ou seja, o medidor de volume (hidrômetro) precisa estar operando dentro das normas metrológicas para medição de água, constituindo uma relação equânime entre o volume fornecido e o volume faturado. Aspectos sociais, ambientais e econômicos no abastecimento de água ficam traduzidos através do controle e da

prevenção de doenças, da promoção de hábitos higiênicos, do desenvolvimento de esportes, da melhoria da limpeza pública, do conforto e da segurança coletiva, como as instalações de combate a incêndios, no aumento da vida média da população atendida, na diminuição da mortalidade infantil e na redução do número de horas improdutivas ocasionadas por afastamento por doenças. Também se reflete diretamente no desenvolvimento industrial, por constituir insumo em muitas indústrias, como as de bebidas e alimentos (FUNASA, 2019). A manutenção do abastecimento de forma plena aumenta a satisfação do usuário gerando empatia entre a prestadora de serviço e seus usuários, isto remete ao quarto aspecto da sustentabilidade: o aspecto cultural. Quando a qualidade na prestação do serviço é reconhecida pela comunidade, estabelece-se uma relação de empatia com a população atendida. Isto acaba gerando um ciclo virtuoso, em que a eficiência no processo reduz despesas e aumenta os investimentos. Ao investir mais, o sistema diminui suas intermitências e com isso a população torna-se mais receptiva ao reajuste da tarifa, aumentando novamente a capacidade de autofinanciamento e reiniciando este ciclo.

A sustentabilidade operacional em sistemas de distribuição de água está inserida na necessidade das cidades de tornarem seus processos sustentáveis e inteligentes, o que as remete ao conceito de *smart cities*. A cidade sustentável e inteligente compreende o equilíbrio entre a proteção e a integração ambiental, desenvolvimento econômico, equidade e justiça social com objetivos a longo prazo de desenvolvimento urbano sustentável com estratégia bem definida. Deste modo cria ambientes de convivência saudáveis, habitáveis e prósperos com utilização mínima de recursos e impacto mínimo ao meio ambiente (BIBRI; KROGSTIE, 2017).

Ao fim e ao cabo a pesquisa busca contribuir com estudos relacionados ao alcance das metas definidas nos ODS da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), como a preservação dos recursos naturais através da retirada de água de forma sustentável dos mananciais, conforme preconizado no ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) no item 12.1 - *alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais*. Da mesma forma, deve-se atender a Manutenção Sustentável das Comunidades (ODS 11), o Acesso à Água Potável e ao Saneamento (ODS 6) com processos eficientes e confiáveis. Este trabalho também busca o Acesso à Energia Limpa e Acessível (ODS 7) promovendo a geração de energia de fontes renováveis e a melhoria contínua de equipamentos baseado no aumento da eficiência energética destes. Os três aspectos da sustentabilidade permeiam o conceito base

deste trabalho que é a obtenção de um sistema de distribuição sustentável, ou seja, que empregue os pilares ambiental, social e econômicos e deste modo ratifique uma alternativa viável para a manutenção da vida no planeta terra baseada nestes conceitos. Os ODS instrumentalizam esses conceitos subsidiando alternativas e ações que justificam o estudo proposto.

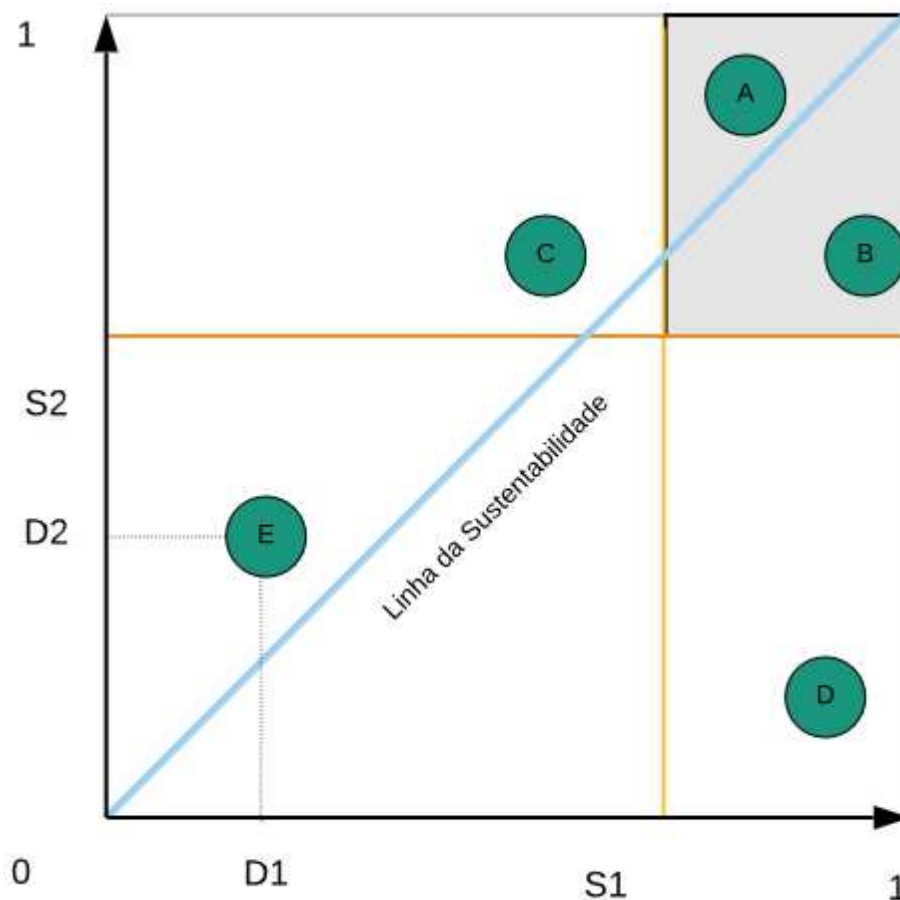
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos necessários para fundamentar este trabalho estão descritos nos próximos subitens.

2.1 PILARES DA SUSTENTABILIDADE

Os três pilares da sustentabilidade, econômico, social e ambiental, estão representados na Figura 2 de um tripé preconizando a interação e a atuação de forma holística entre estes entes. É importante verificar que esses conceitos podem ser aplicados tanto de maneira macro, para um país ou próprio planeta, como micro, sua casa ou uma pequena vila agrária (LASSU, 2019). Os componentes fundamentais para o desenvolvimento sustentável consistem nos pilares do crescimento econômico, da proteção ao meio ambiente e da igualdade social.

Gotlib *et al.* (2020) utilizaram um modelo gráfico para avaliar estratégias para transformar cidades, tornando-as sustentáveis e inteligentes (*smart cities*). O modelo atribui uma quantidade limitada de características para eixos temáticos de governança municipal, representados no diagrama pelos círculos A, B, C, D e E, como mobilidade, ambiente, pessoas, economia, gestão, entre outros. Estes eixos foram chamados de dimensões. Um conjunto de características particulares foram elencadas para cada dimensão com pontuação considerando a relevância de cada característica e o somatório delas. Exemplos destas características são o custo de vida, infraestrutura de comunicações e informação, competitividade, qualidade na educação entre outros. Foram consideradas duas dimensões para o modelo gráfico mencionado, D₁ e D₂. A Figura 2 apresenta o modelo gráfico.

Figura 2 - Modelo para estratégias de transformação para *smarts cities*

Fonte: Adaptado de Gotlib *et al.* (2020).

Na Figura 2 verifica-se as intersecções A, B, C, D e E os pares formados pelas dimensões D_1 e D_2 para cada intersecção. A dimensão D_1 está representada no eixo das abscissas e a dimensão D_2 no eixo das ordenadas. Pode-se observar que a condição de equilíbrio entre os aspectos da sustentabilidade e da tecnologia encontra-se quando a intersecção (D_1, D_2) está situada próximo à linha de sustentabilidade e dentro do retângulo superior direito. A dimensão 1 (D_1), deve ser igual ou superior à linha S_1 e a dimensão 2 (D_2) igual ou superior à linha S_2 . Quanto maior a pontuação nos dois eixos, mais próximo o par ordenado (D_1, D_2) ficará da condição de equilíbrio.

Além desses fundamentos, a mudança de conceito das empresas, que tinham como único foco o lucro, vêm passando por uma concepção de desenvolvimento sustentável, dando origem ao *TBL* ou *Triple Bottom Line* da sustentabilidade (BARBOSA, 2007) como ilustra a Figura 3.

Figura 3 - *Triple bottom line*: Tripé da sustentabilidade

Fonte: BIOSETA (2014).

2.1.1 Pilar social

Entende-se como pilar social, o capital humano envolvido no processo, quer pela remuneração dos trabalhadores, pela segurança dos procedimentos que estão envolvidos, pela saúde do trabalhador, entre outros. Este pilar também busca verificar como este processo afeta as comunidades ao seu redor (LASSU, 2019).

O aspecto social, ou seja, a responsabilidade social é um comprometimento com a comunidade, mas que assume diversas formas, como a proteção ambiental, projetos filantrópicos e educacionais, planejamento da comunidade, igualdade nas oportunidades de emprego, serviços sociais em geral em conformidade com o interesse público (DONAIRE, 1999).

O principal Objetivo para o ODS ao qual este pilar está relacionado é o ODS 4 (Educação de Qualidade), que faz menção ao acesso equitativo e qualitativo do aprendizado desde a infância sem disparidade de gênero, bem como a garantia de espaços de aprendizagem apropriados. Também pode-se encontrar suporte no ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), pois este objetivo propõe uma relação de simbiose entre a força de trabalho e os meios de produção de modo que garanta o pleno emprego com trabalho decente e desenvolvimento econômico, inclusivo e sustentável. O ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) propõe que o ambiente das cidades e dos assentamentos humanos sejam inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, e que possam garantir acesso universal a moradia e

transporte dentro das condicionantes de segurança, resiliência e sustentabilidade. A pesquisa também tem relação com o pilar social o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) que dialoga com a gestão sustentável e eficiente dos recursos naturais e preconiza o acesso à informação sobre desenvolvimento com sustentabilidade e apoio para as capacidades científicas e tecnológicas em países subdesenvolvidos (ONU, 2015). O Quadro 1 apresenta a relação existente entre o pilar social, ODS e suas principais metas relacionadas.

Quadro 1 - ODS relacionados ao pilar social

ODS	Descrição	Resumo das principais metas relacionadas
4	Educação de qualidade	<ul style="list-style-type: none"> - Acesso ao ensino primário e secundário; - Acesso à educação técnica, profissional e superior de qualidade; - Aumentar o contingente de professores qualificados; - Garantir que todos os alunos adquiram conhecimentos e habilidades necessárias para promover o desenvolvimento sustentável.
8	Trabalho decente e crescimento econômico	<ul style="list-style-type: none"> - Atingir níveis mais elevados de produtividade das economias por meio da diversificação, modernização tecnológica e inovação; - Melhorar progressivamente, até 2030, a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção dissociando o crescimento econômico da degradação ambiental; - Até 2030, alcançar o emprego pleno, produtivo e trabalho decente para todas as mulheres e homens; - Proteger os direitos trabalhistas e promover ambientes de trabalho seguros e protegidos para todos os trabalhadores.
11	Cidades e comunidades sustentáveis	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2020, aumentar substancialmente o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas; - Até 2030, garantir o acesso de todos à habitação segura, adequada e a preço acessível, e aos serviços básicos e urbanizar as favelas; - Apoiar relações econômicas, sociais e ambientais positivas entre áreas urbanas, periurbanas e rurais.
12	Consumo e produção responsáveis	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2030, reduzir pela metade o desperdício de alimentos per capita mundial, nos níveis de varejo e do consumidor, e reduzir as perdas de alimentos ao longo das cadeias de produção e abastecimento; - Até 2030, garantir que as pessoas, em todos os lugares, tenham informação relevante e conscientização para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida em harmonia com a natureza.

Fonte: ONU (2015).

2.1.2 Pilar ambiental

Este pilar está relacionado ao capital natural de um processo ou sociedade. Considerando que praticamente toda atividade econômica tem impacto ambiental negativo, a empresa ou a sociedade deve pensar nas formas de amenizar esses impactos e compensar o que não é possível amenizar. A matéria-prima utilizada pelas empresas, por exemplo, precisa ter seu uso reduzido ao máximo para a mesma produção. Ainda neste exemplo, torna-se necessário medir a pegada de carbono de seu processo produtivo, ou seja, a quantidade de CO₂ emitido deste (LASSU, 2019).

A sustentabilidade ambiental surge como uma prática que visa a preservação da natureza na proposição econômica e nas técnicas do desenvolvimento e estabelece categorias de fabricação que garantam a sobrevivência e um futuro possível para as próximas gerações (LEFF, 2011). Baseado nestes conceitos, o pilar ambiental está ligado diretamente ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento), pois este ODS tem como uma das metas assegurar a retirada sustentável dos mananciais com eficiência e diminuição significativa de pessoas que sofrem com a escassez hídrica. Outro ODS que se relaciona com este pilar é o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível). O ODS 7 busca assegurar o acesso universalizado, sustentável, com preços acessíveis da energia, projetando, concomitantemente, aumentar a participação de energia renovável na matriz energética global. O ODS 12 (Produção e Consumo Responsáveis) também, relaciona-se com o pilar ambiental na medida em que propõe, em uma de suas metas (12.4), o manejo de produtos químicos e todos os resíduos minimizando impactos negativos para o meio ambiente (ONU, 2015). O Quadro 2 apresenta a relação existente entre o pilar ambiental, ODS e as principais metas relacionadas.

Quadro 2 - ODS relacionados ao pilar ambiental

ODS	Descrição	Resumo das principais metas relacionadas
6	Água potável e saneamento	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo a água potável e segura para todos; - Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos; - Até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água, e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água; - Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos.
7	Energia limpa e acessível	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global; - Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética; - Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.
12	Consumo e produção responsáveis	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.

Fonte: ONU (2015).

2.1.3 Pilar econômico

A definição de economia, segundo a sua etimologia, é o modo como ocorre a Organização de uma casa, financeira e materialmente. Ao longo dos anos, a palavra economia foi direcionada apenas à vertente dos negócios ou no sentido da poupança. Este pilar busca o retorno ao significado original da palavra economia, analisando temas ligados à produção, distribuição e consumo de bens e serviços, devendo este aspecto, considerar os demais aspectos, isto é, não basta tão somente o lucro sem o comprometimento com a preservação do meio ambiente (LASSU, 2019).

O ODS que mais abarca a definição do pilar econômico é o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) porque estabelece metas e ações para cada etapa de um processo produtivo desde a redução do desperdício de matéria-prima, a processos sustentáveis de compra, permeando conceitos de redução, prevenção, reciclagem e reuso de resíduos da produção. Entretanto, o ODS 6 (Água Potável e Saneamento) em sua meta 6.1 e 6.4, que intenciona o acesso universal a água potável e saneamento até 2030, está inserido no contexto deste pilar. O ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) através da meta 7.1 visa assegurar, até 2030, o acesso universal,

confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia, bem como as metas 7.2, 7.3 e 7.4 a promoção da eficiência energética, o aumento na utilização de energias renováveis e a pesquisa em tecnologias de energia limpa. Os ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) também possuem correlação com este aspecto da sustentabilidade, na medida que buscam a industrialização inclusiva, sustentável com fomento a inovação e o aumento da urbanização com sustentabilidade e inclusão, respectivamente (ONU, 2015). O Quadro 3 apresenta a relação existente entre o Pilar Econômico, objetivos para o desenvolvimento sustentável e as principais metas relacionadas.

Quadro 3 - ODS relacionados ao pilar econômico

ODS	Descrição	Resumo das principais metas relacionadas
6	Água potável e saneamento	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2030 alcançar o acesso universal e equitativo a água potável e segura para todos; - Melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos.
7	Energia limpa e acessível	<ul style="list-style-type: none"> - Assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia; - Aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global; - Dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética; - Expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento.
9	Indústria, inovação e infraestrutura	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente; - Promover a industrialização inclusiva e sustentável; - Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis; - Fortalecer a pesquisa científica, melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais em todos os países; - Apoiar o desenvolvimento tecnológico, a pesquisa e a inovação nacionais nos países em desenvolvimento.
11	Cidades e comunidades sustentáveis	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2030, garantir o acesso de todos à habitação segura, adequada e a preço acessível, e aos serviços básicos e urbanizar as favelas; - Apoiar relações econômicas, sociais e ambientais positivas entre áreas urbanas, periurbanas e rurais; - Aumentar substancialmente o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas; - Apoiar os países menos desenvolvidos, inclusive por meio de assistência técnica e financeira, para construções sustentáveis e resilientes, utilizando materiais locais.
12	Consumo e produção responsáveis	<ul style="list-style-type: none"> - Implementar o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis; - Reduzir pela metade o desperdício de alimentos per capita mundial; - Promover práticas de compras públicas sustentáveis; - Apoiar países em desenvolvimento fortalecendo suas capacidades técnico-científicas.

Fonte: ONU (2015).

2.2 PRODUÇÃO MAIS LIMPA (P+L)

A expressão “Produção Mais Limpa” foi lançada pela UNEP (*United Nations Environment Program*) e pela DTIE (*Division of Technology, Industry and*

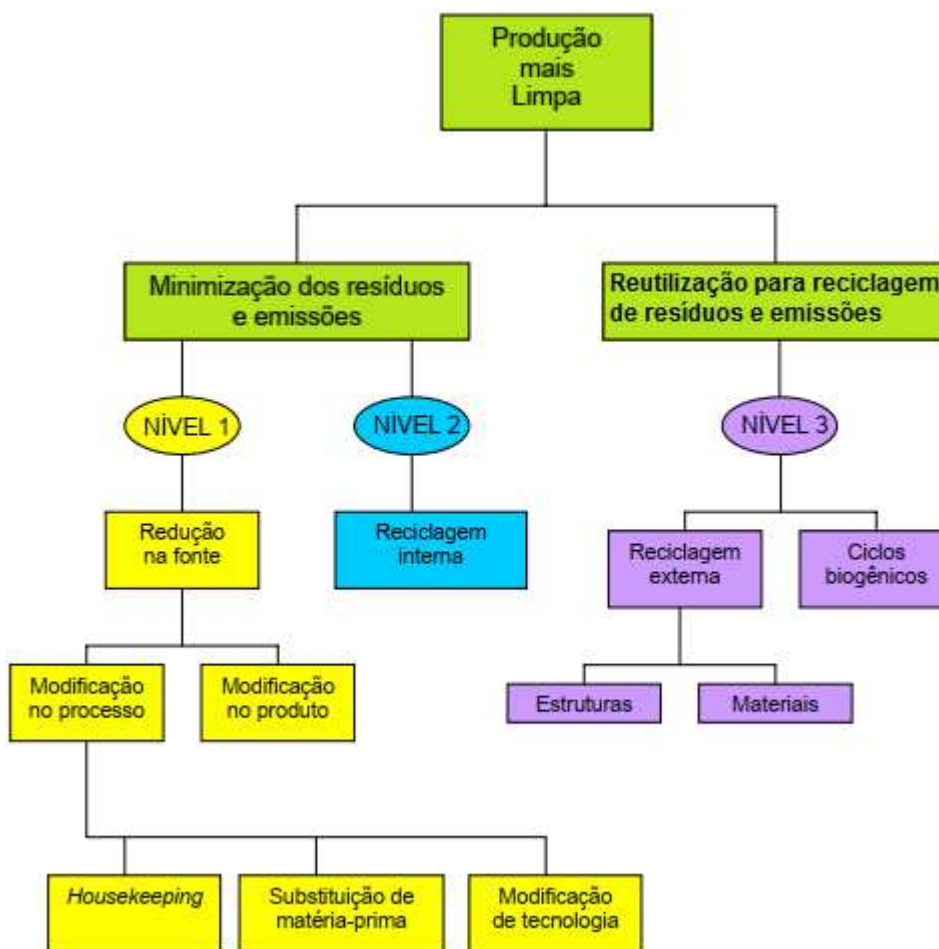
Environment) em 1989 como estratégia integrada de prevenção ambiental a processos, produtos e serviços com a finalidade de aumentar a eficiência da produção e a redução de riscos para o homem e o meio ambiente (WERNER; BACARJI; HALL, 2009).

A Produção Mais Limpa é uma forma moderna de tratar aspectos ambientais nos processos de produção industrial. Nesta metodologia questiona-se a origem dos resíduos e não somente a destinação dos resíduos gerados (HENRIQUES; QUELHAS, 2007).

Produção Mais Limpa (P+L) é definida como a aplicação contínua de uma estratégia econômica, ambiental e tecnológica plena, aos processos e produtos. Nos processos produtivos, a aplicação desta ferramenta resulta em medidas de conservação de insumos; eliminação de substâncias tóxicas e matérias-primas perigosas; redução da quantidade e toxicidade de todas as emissões e resíduos na fonte geradora (UNEP, 1999). A P+L se opõe a tecnologias ambientais convencionais que trata os impactos gerados, a qual é chamada de “tecnologia de fim de tubo”. Várias estratégias são utilizadas visando a P+L e a conseqüente minimização de resíduos.

Na Figura 4 observa-se que a estratégia Nível 1 do fluxograma é no sentido de evitar, ou minimizar a geração de resíduos. No Nível 2 estão os resíduos que não podem ser evitados e devem retornar ao processo de produção da empresa, isto é, são reciclados internamente. Quando a estratégia do Nível 2 for impossível dentro do ambiente interno da empresa, emprega-se a reciclagem externa (Nível 3).

Figura 4 - Estratégias para P+L



Fonte: Adaptado de CNTL (2003).

2.2.1 Uso da ferramenta P+ L em processos de usuários de água

Neste item será descrito o uso da ferramenta P+L em processos industriais que utilizam a água em seu processo de produção desenhando um panorama do ambiente objeto desta dissertação.

Conforme Coelho (2004), a experiência de implementação da ferramenta ambiental P+L na Empresa Baiana de Água e Esgoto (EMBASA) teve um caráter “orgânico”, ou seja, não mecânico e dinâmico, relacionando às questões práticas e reais de maneira integrada. Essa linha adotada visou tornar o programa estrategicamente consistente, ou seja, efetivamente incorporado ao dia a dia das operações e às diretrizes gerenciais da empresa. A ferramenta P+L desenvolvida pela UNIDO/UNEP foi o instrumento de gestão adotado para atingir os objetivos propostos pelo programa. As informações foram condensadas em 16 relatórios de P+L

resultando em 76 oportunidades de melhoria, baseadas em critérios de análise de eco eficiência como: técnicas de redução da poluição mais utilizados, nível de aplicação da metodologia alcançada pelas unidades, potencial de replicabilidade das medidas, benefícios ambientais, e benefícios econômicos versus investimento financeiro. A caracterização das 16 unidades em que a ferramenta foi aplicada está apresentada na Tabela 1.

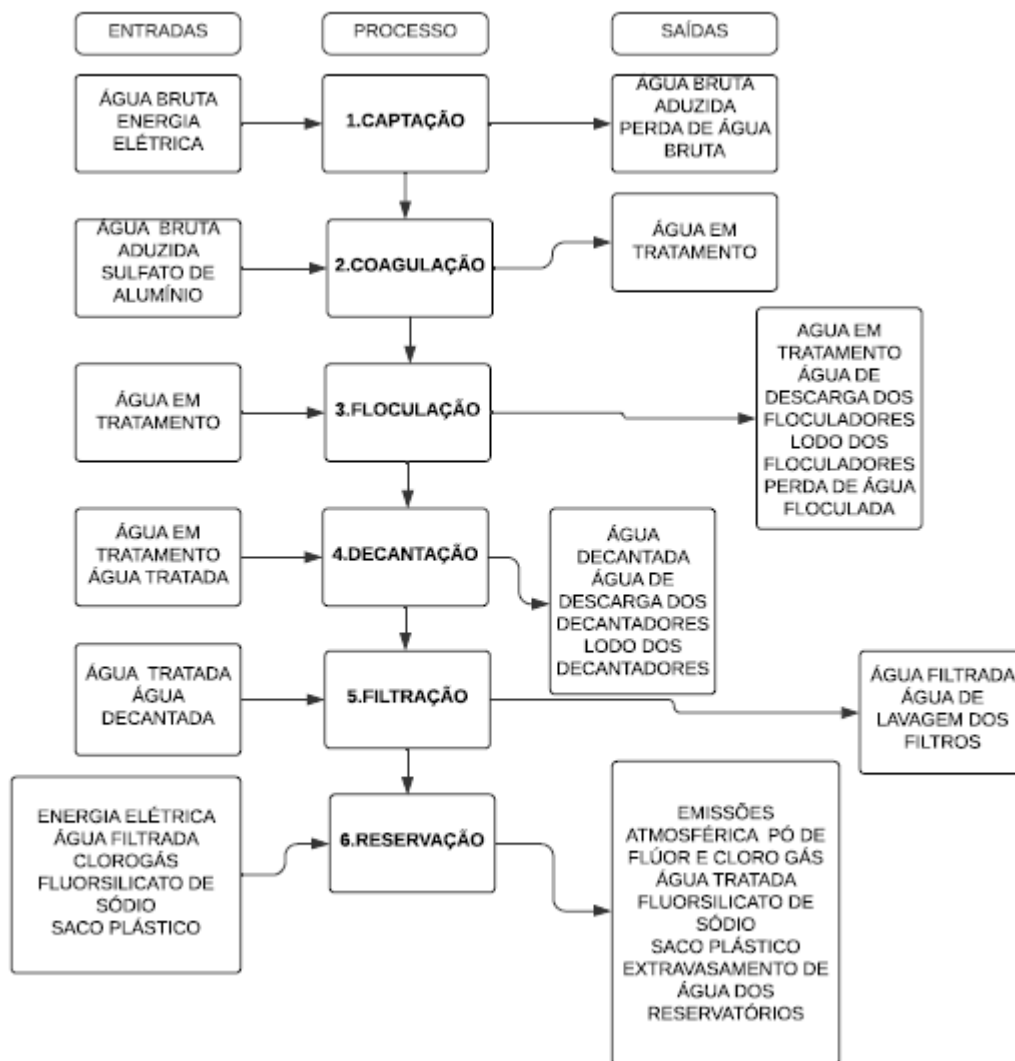
Tabela 1 - Caracterização das unidades

Unidades	Nº de empregados	Capacidade anual (X 1000 m³)	Faturamento anual (R\$ X 1000)	Faturamento volume produzido (R\$/m³)
ETA Itamaraju	6	5964,00	1898,97	0,32
ETA Irecê	10	8400,00	7000	0,83
ETA Barreiras	9	10300,00	5000	0,49
ETA Queimadas	6	1363,91	705,87	0,52
ETA Sto. Antônio de Jesus	13	3800,00	2850	0,75
ETA Guanambi	10	4294,85	1617	0,38
ETA V. da Conquista	21	19500	14300	0,73
ETA Itaberaba	11	5361,12	2955	0,55
ETA Ilhéus	4	1720	940	0,55
ETA Pojuca	5	2522,88	720	0,29
ETA Ipiauí	11	6222,8	1552,54	0,25
ETA Paulo Afonso	11	5249,32	3615,49	0,69
ETA Cobre	7	4942,55	1220,81	0,25
ETA Sr.do Bonfim	5	2940,76	1945,08	0,66
ETA Principal	77	284984	51236,22	0,18
ETE Jequié	12	2177,28	2082,14	0,96
Total	218	369743,47	99639,12	0,27

Fonte: Adaptado de EMBASA (2001).

Devido a participação de apenas uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) no programa foi enfatizado o processo produtivo das Estações de Tratamento de Água (ETA). De acordo com a metodologia, cada unidade operacional realizou um Inventário do Ciclo de Vida (ICV) para identificar as oportunidades de melhoria, elaborando um fluxograma do processo produtivo, com suas etapas, entradas (matérias-primas e insumos) e saídas (produtos, resíduos e subprodutos como lodo e emissões atmosféricas), conforme pode-se observar na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do processo produtivo da ETA



Fonte: EMBASA (2001).

As 76 oportunidades de melhoria resultaram em 16 tabelas que representam os resultados do Programa nas Unidades Operacionais da EMBASA.

A Tabela 2 ilustra os resultados do P+L na Unidade de Tratamento de Água ETA Barreiras.

Tabela 2 - Resultados do programa de P+L na ETA Barreiras

(continua)

Oportunidades de P+L	Tipo de intervenção	Técnicas de P+L/Nível 1	Investimento(R\$)	Benefícios econômicos /ano	Tempo de retorno(ano)	Replicabilidade
1 - Reaproveitamento dos efluentes através da redução do consumo de água na lavagem dos filtros e descarga dos decantadores	Através da reciclagem interna dos efluentes tratados com a construção de tanque de decantação e leito de secagem	Reutilização interna e Fim de Tubo/2	R\$ 86.500,00	R\$ 4.366,00	19,80	Aplicável na maioria das ETA, desde que haja descarga de decantadores, lavagem e descargas de filtro, levando-se em conta questões climáticas e disponibilidade de área
2 - Racionalização do uso de água para lavagem dos filtros, descarga dos decantadores e preparo de soluções	Elaboração de procedimentos operacionais para otimização dos processos (POP) para padronizar as tarefas.	Boas Práticas operacionais e Mudança de Procedimento	Sem investimento	R\$ 3162,00		Aplicável em todas as ETA que não tenham ainda o POP p/ lavagem de filtros e descargas de decantadores e preparo de soluções.
3 - Minimização ou eliminação de resíduos na preparação de coagulante através da substituição do sulfato sólido pelo sulfato líquido a 50%	Aquisição de tanques de fibra de vidro para armazenamento do sulfato líquido e instalação de conjunto motor-bomba para recalque da solução.	Mudança de Insumo	R\$ 8.000,00	R\$ 2.938,00	2,70	Aplicável a todas as ETA de médio e grande porte que utilizam sulfato sólido, observando a relação custo/benefício.

4 - Aumento da eficiência do tratamento na ETA com a construção de caixa de areia na captação	Instalação de elevatória flutuante na captação para recalque até caixa de areia	Mudança de matéria-prima	R\$ 150.000,00	Avaliação altamente complexa, pois exige a realização de simulações no tratamento.	Aplicável em captações que haja possibilidade de arraste de areia. Deve-se observar a qualidade do manancial local da tomada d'água e topografia.
TOTAL			R\$ 244.500,00	10466	11,30

Fonte: Adaptado de EMBASA (2001).

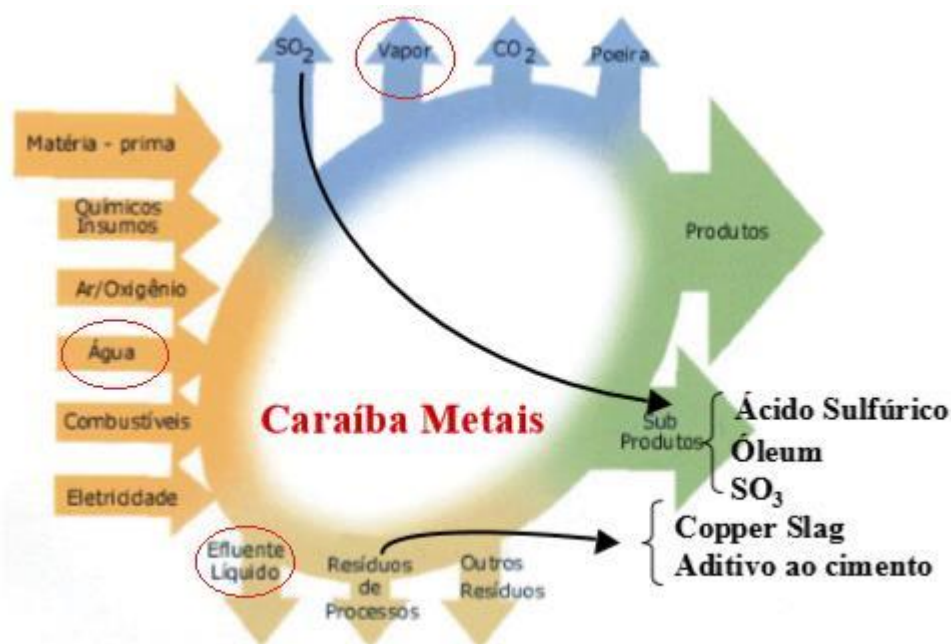
Os benefícios do programa de P+L também foram relatados considerando os aspectos: ambiental, econômico, social e tecnológico, verificando que todos os indicadores ambientais relacionados com as medidas de P+L aplicadas na EMBASA (EMBASA, 2001), apresentaram dados de redução, resultando na melhoria do desempenho ambiental no processo das unidades. No aspecto econômico, cerca de 76% das medidas propostas foram identificadas como boas práticas operacionais, sendo o retorno para o investimento de no máximo 1 ano e 3 meses, prevalecendo a visão empresarial de priorizar investimentos de curto prazo de retorno.

Quanto ao aspecto social, de acordo com depoimentos dos empregados que participaram do programa, a aplicação da ferramenta na empresa, proporcionou melhoria do clima organizacional, maior interação entre os técnicos das unidades, valorização do conhecimento tácito e tomada de consciência do impacto provocado pela atividade produtiva da empresa, junto às comunidades situadas no entorno das unidades operacionais.

No que se refere ao aspecto tecnológico o compartilhamento de experiências, na solução de problemas comuns às unidades, foi apontado como o maior benefício, levando à otimização de tempo e recursos financeiros e a uma melhoria em termos de atualização tecnológica, propiciando um nivelamento entre as unidades (SENAI/CETIND, 2001).

Copello (2003) relata um estudo de caso sobre estratégias ambientais na empresa Caraíba Metais. Ele desenvolveu um estudo teórico-empírico, em que a etapa empírica foi realizada através de um questionário, respondido por pessoas envolvidas na gestão estratégica da empresa. Também é apresentada uma síntese teórica destas estratégias organizacionais e ambientais que balizam a análise da estratégia ambiental da empresa, pontos fortes, pontos fracos, as ameaças, as oportunidades e os fatores críticos ambientais. Dentre as oportunidades mencionadas está a utilização de maneira eficiente dos recursos naturais (água/energia), reaproveitamento do vapor da granulação de escória e outras fontes de calor e vapor para gerar energia própria. Outra oportunidade de melhoria relatada foi a reutilização de 100% da água da Unidade de Tratamento de Efluente (UTE) e a recuperação de efluentes de água ácida da Unidade de Ácido Sulfúrico (UAS). A utilização de água dentro do processo de fabricação de cobre na Caraíba Metais está em destaque na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de entradas e saídas

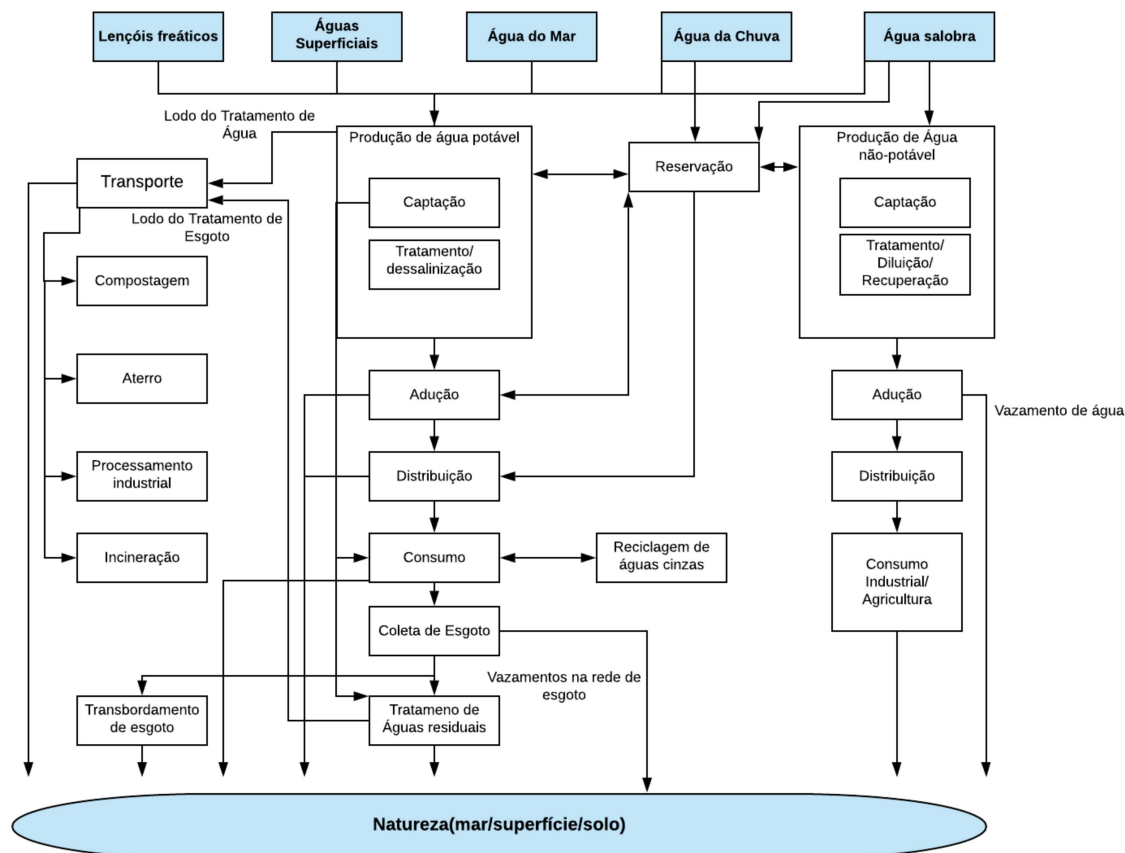


Fonte: Adaptado de Caraíba Metais (2002).

Na análise realizada, o peso das questões ambientais em suas estratégias situa-se entre 58% e 72%, estabelecendo coerência entre o perfil da organização e a questão ambiental. Este resultado demonstra que a organização apresenta estratégias ambientais corporativas e incorporadas em todas as suas dimensões setoriais, porém variando de peso em cada uma. Apesar disto, a organização identifica a existência de gaps para que possa neutralizar as ameaças e aproveitar as oportunidades trazendo vantagens competitivas para esta empresa, conforme já mencionado, o reuso de água e energia está inserido neste escopo de planejamento.

Godskesen, Meron e Rygaard (2018) apresentam uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do processo de abastecimento de água tratada ao redor do mundo considerando as diversas fontes, tecnologias empregadas e usos finais, não analisa um sistema de abastecimento específico, mas todas as entradas e saídas possíveis considerando o planeta como um único sistema de abastecimento. Traça, através de um diagrama de entradas e saídas, o caminho percorrido pela água, desde o manancial, passando pelo tratamento, distribuição, explicitando as perdas envolvidas, consumos, seguindo o caminho pós utilização, até o tratamento de esgotos e outras destinações finais. A Figura 7 apresenta o diagrama de entradas e saídas do abastecimento de água.

Figura 7 - Diagrama de entradas e saídas do abastecimento de água



Fonte: Adaptado de Godskesen, Meron e Rygaard (2018).

A ACV no abastecimento de água nesta pesquisa confirma a necessidade de mudanças tecnológicas e de processo, bem como conceitos de reciclagem interna, como o reaproveitamento de águas cinzas¹. O crescimento do emprego do processo de dessalinização fica demonstrado no diagrama de entradas e saídas da Figura 7. O estudo projeta usos múltiplos de processos tecnológicos, fontes, reciclagem e redução de resíduos como alternativa para regiões com escassez hídrica como a China e a Austrália.

2.3 PEGADA HÍDRICA E DEMANDA DE ENERGIA ACUMULADA

A Pegada Hídrica (PH) é um indicador que expressa o consumo de água doce (em metros cúbicos por ano) envolvido na produção dos bens e serviços que a sociedade consome. “A perda hídrica de um indivíduo, comunidade ou empresa é

¹ Águas cinzas são aquelas provenientes dos lavatórios, chuveiros, tanques e máquinas de lavar roupa e louça (FIORI, 2006).

definida como o volume total de água doce que é utilizado para produzir os bens e serviços consumidos pelo indivíduo, comunidade ou produzidos pelas empresas” (WATERFOOTPRINT, 2013).

Ao identificar o volume, o local e o momento em que ocorre o consumo de água, a pegada hidrológica abre a possibilidade para uma gestão mais adequada dos recursos hídricos, evitando a exploração nos locais, onde ela é mais escassa e direcionando o consumo para as regiões do planeta, onde ela é mais abundante (GIACOMIN; OHNUMA JÚNIOR, 2012).

Sobre a relação entre consumo e uso da água:

O interesse na perda hídrica está enraizado no reconhecimento de que os impactos humanos nos sistemas de água doce podem estar ligados ao consumo humano e que questões como a escassez de água e a poluição, podem ser mais compreendidas e tratadas, considerando a produção e cadeias de suprimento como um todo (WATERFOOTPRINT, 2013).

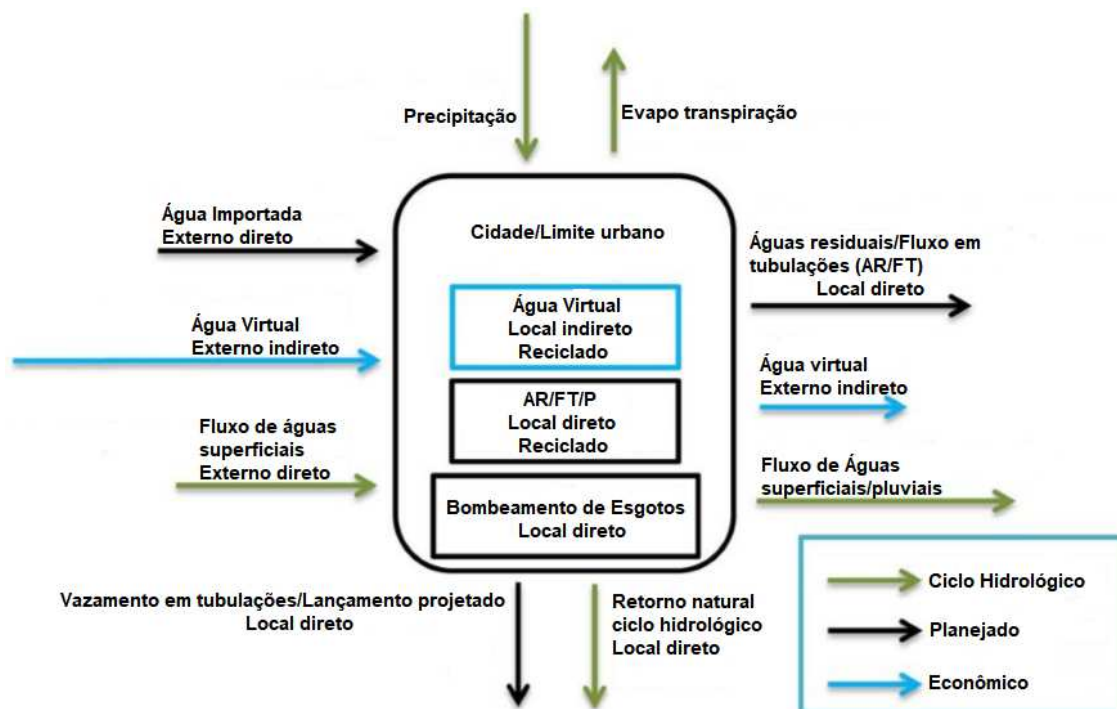
O limite do planeta quanto à utilização de água doce pode ser mensurado através da pegada global da humanidade e desta forma obtém-se uma estimativa da capacidade global de utilização da água doce. Esta estimativa está em torno de 2800 km³/ano (GERTEN *et al.*, 2013).

Silva (2013) afirma que a pegada hídrica de um indivíduo ou comunidade pode ser estimada através da multiplicação de todos os bens e serviços consumidos por seus respectivos conteúdos de água virtual². O conceito de pegada hídrica direta e indireta também é abordado como sendo o consumo e a poluição da água no ambiente de utilização e no ambiente de produção, respectivamente.

Paterson *et al.* (2015) estimaram a pegada hídrica das cidades através da avaliação dos fluxos de entrada e saída de água doce em uma cidade considerando os conceitos de água virtual, pegada hídrica direta e indireta. A Figura 8 exemplifica os fluxos de água doce no limite urbano.

² Volume de água doce utilizada para a produção de um determinado produto (HOEKSTRA; CHAPAGAIN, 2007).

Figura 8 - Diagrama para avaliação da Pegada hídrica para o limite urbano



Fonte: Adaptado de Paterson *et al.* (2015).

Visualiza-se na Figura 8 o fluxo de água que entra no perímetro urbano na extremidade esquerda. O fluxo de entrada definido como água importada, resultado de alguma atividade planejada de escoamento encontra-se no canto superior à esquerda. A água virtual de entrada encontra-se ao centro à esquerda do perímetro urbano. O fluxo de águas superficiais é a última entrada de água, sendo localizada no canto inferior esquerdo. Ao centro, no retângulo em azul, dentro do limite urbano, localiza-se a Água virtual produzida devido a alguma atividade de reciclagem. Águas residuais, fluxo em tubulações e as precipitações pluviométricas que ocorrem no perímetro urbano são apresentadas no segundo quadro situado dentro da linha do limite urbano. Ainda neste quadro central visualiza-se o bombeamento de esgotos no retângulo inferior. A avaliação da pegada hídrica é finalizada com os fluxos de saída de águas residuais/fluxo em tubulações, sobre a linha preta, águas virtuais na linha em azul e o fluxo de águas pluviais e precipitações pluviométricas (PATERSON *et al.*, 2015).

O método *cumulative energy demand* (demanda de energia acumulada - CED) é um indicador amplamente utilizado como parâmetro de eficiência energética e triagem para os impactos ambientais de processos. O CED é utilizado para comparar a demanda de energia primária em estudos de ACV. Deve-se calcular toda a energia

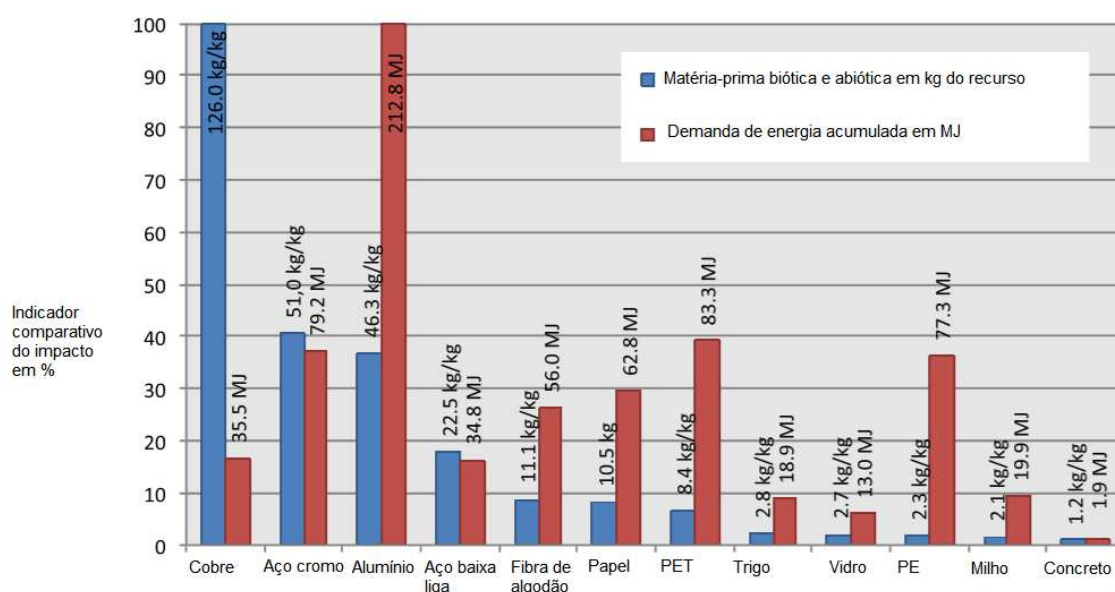
utilizada como primária, entendida como a forma de energia encontrada na natureza, que não foi submetida a um processo de transformação, como o petróleo, que é extraído e transformado em energia secundária como a eletricidade ou óleo combustível (SPOSTO; PAULSEN, 2014). O método CED calcula a energia usada em todo o ciclo de vida de um bem ou serviço. Isso inclui os usos diretos, assim como a energia indireta. O CED baseia-se no método publicado por Frischknecht *et al.* (2007) e se constitui de cinco categorias: não renováveis, fósseis; não renovável, nuclear; renovável, biomassa; renovável, eólica, solar, geotérmica; e renovável, água (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Wiesen e Wirges (2017) considera a CED como uma categoria de impacto ambiental ao traçar um comparativo entre a pegada da matéria-prima biótica³ e ou abiótica⁴ com a energia acumulada de materiais, desde que essa avaliação ocorra em modelos de ACV. Ainda neste estudo salienta-se que a pegada dos materiais não considera a água como material, desta forma o impacto de produtos químicos e demais insumos no processo de produção de água tratada encontra na demanda acumulada de energia um importante indicador para quantificação de impactos. A Figura 9 demonstra a comparação da pegada dos materiais e a demanda acumulada de energia para diversas matérias-primas utilizadas em diferentes processos de produção.

³ Resultado da interação entre seres vivos.

⁴ Relacionado aos aspectos, físicos, químicos ou físico-químicos do ambiente.

Figura 9 - Comparativo entre a pegada de matéria-prima x demanda de energia acumulada para diversas matérias-primas utilizadas em processos industriais.



Fonte: Adaptado de Wiesen e Wirges (2017).

Conforme a Figura 9 verifica-se na barra em azul a quantidade em kg de matéria-prima necessária para a obtenção de 1 kg dos materiais que se encontram discriminados no eixo horizontal do gráfico. A barra em vermelho informa a energia incorporada para a extração destes materiais da natureza em MJ (mega joule).

Guanais, Cohim e Medeiros (2017) apresentam uma avaliação energética de um sistema de abastecimento de água tratada (Feira de Santana, Bahia) por meio de seus encargos energéticos usando a ferramenta de ACV, estimando a energia primária consumida através da CED. Os dados coletados para a cadeia principal (captação, tratamento e distribuição) foram extraídos do sistema em estudo. Os dados da cadeia secundária (suprimentos) foram oriundos da base de dados *ecoinvent* (WERNET; BAUER; STEUBING, 2016). Os autores também utilizam para este estudo o fator de energia primária de 1,6 kwh/kwh, conforme inventário realizado para a matriz energética do Brasil em 2003 (COLTRO; GARCIA; QUEIROZ, 2003).

O inventário do ciclo de vida (ICV) contabiliza a energia incorporada para o volume consumido/ano de 21.440.780 m³. O consumo energético referente ao transporte foi calculado estimando que ocorresse por caminhão em kwh.t⁻¹.km⁻¹, isto é, o consumo energético (kwh) por tonelada transportada para cada km de trajeto entre o produtor do insumo e o local de utilização (TAVARES, 2006). Os gastos energéticos referentes a substituição de tubos foram embasados nos estudos de

Filion, Maclean e Karney (2004). A Tabela 3 apresenta o ICV para o sistema de abastecimento de água tratada do município de Feira de Santana.

Tabela 3 - ICV do sistema de abastecimento de Feira de Santana

Etapa	Quantidade	Unidade	Demanda de energia acumulada (kwh)	kwh/m ³
Captação				
Eletricidade	14820489	kwh	23712782	1,11
Subtotal			23712782	1,11
Tratamento				
Eletricidade	5999592	kwh	9599346	0,45
Sulfato de cobre	14406	kg	1865575	0,01
Sulfato de alumínio	1618823	kg	4658613	0,22
Cloro gasoso	246009	kg	1210925	0,06
Ácido fluossilícico	185546	kg	1807223	0,08
Cal hidratada	398926	kg	605696	0,03
Transporte	270608	t.km	121773	0,01
Subtotal			18190153	0,85
Distribuição				
Eletricidade	19711441	kwh	31538306	1,47
Tubos	100485	kg	1756729	0,08
Transporte	46223	t.km	20800	0,0001
Subtotal			33315836	1,55
Total			752118771	3,51

Fonte: Guanais, Cohim e Medeiros (2017).

2.4 ESTRUTURA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

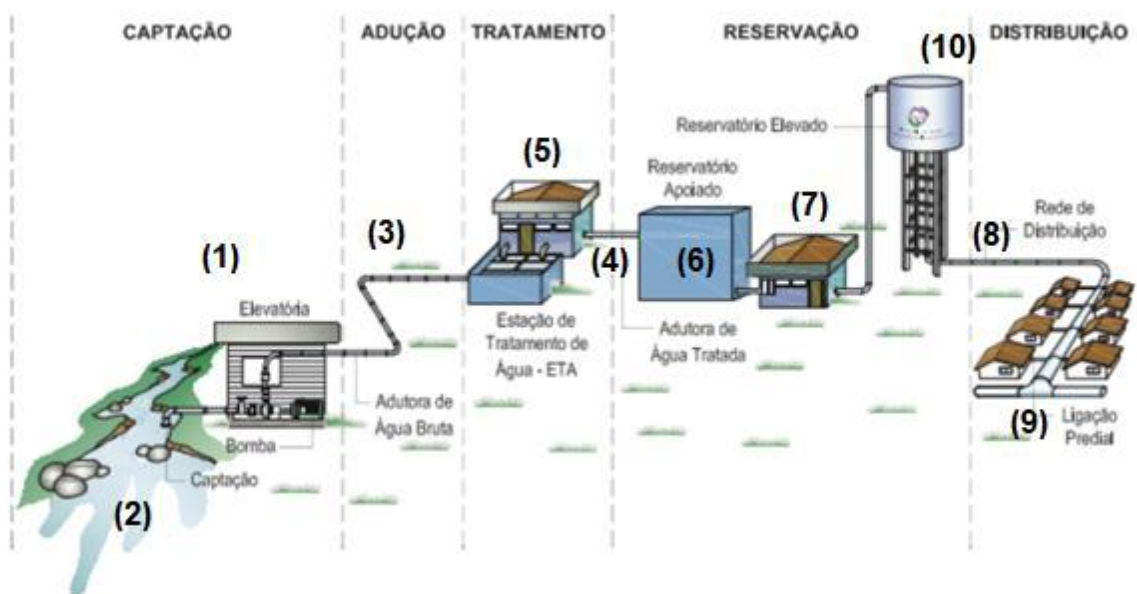
A concepção dos sistemas de abastecimento de água é variável e depende de peculiaridades existentes em cada localidade, como o número de habitantes, seu relevo, distância do manancial, entre outras características. Geralmente os sistemas convencionais de abastecimento são constituídos dos seguintes itens:

- a) manancial;
- b) captação;
- c) estação elevatória;
- d) adutora;
- e) estação de tratamento de água;
- f) reservatório;

g) rede de distribuição.

A Figura 10 apresenta um sistema de distribuição de água característico.

Figura 10 - Sistema de distribuição de água



Fonte: FUNASA (2019).

Conforme Tsutiya (2004), pode-se observar na Figura 10, que a captação (1) é o início do processo de distribuição de água, onde retira-se água do corpo hídrico (manancial); (2) para posterior tratamento e distribuição. Junto ao manancial tem-se a captação, um conjunto de equipamentos responsáveis pela retirada de água do manancial. A ligação entre a captação e o tratamento de água é feita através de uma tubulação denominada de adutora de água bruta (3). Adutora que liga a estação de tratamento ao sistema de distribuição é denominada de adutora de água tratada (4). Na Estação de Tratamento a água (5) recebe a adequação à potabilidade e conseqüentemente, torna-se própria para o consumo. Após o tratamento da água, esta é aduzida até os reservatórios apoiado (6) ou elevado (10). Havendo a necessidade de acréscimo de energia para atender às necessidades de distribuição, um conjunto de motobombas é adicionado ao sistema sendo denominado de elevatória de água tratada (7). Os reservatórios têm como principal função, acumular água suficiente para absorver as variações de consumo, mantendo a pressão mínima e constante. Do reservatório até o ponto de consumo tem-se a rede de distribuição de água (8), um conjunto de tubulações responsáveis pelo transporte de água até a ligação predial (9). A ligação predial é a tubulação que conecta à rede de distribuição

até os consumidores. Utilizam-se diversos materiais para as tubulações de distribuição de água, entre eles, podem ser citados os fabricados em Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e ferro fundido (NETTO, 2015).

2.5 DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Um plano de gestão da operação eficiente e que tenha resultados práticos necessita, na sua fase de estudo (e posterior implantação), além do cadastro técnico atualizado, da elaboração de um diagnóstico das unidades e de todo processo operacional implantado e que esteja em funcionamento. O diagnóstico permite a observação do que se encontra em operação e subsidia a implantação de mudanças futuras. Para a sua elaboração, são realizadas consultas a documentos como boletins operacionais, memoriais descritivos, fotografias, anotações, boletins de medição, relatórios e cadastros técnicos, plantas, croquis e esquemas hidráulicos, gráficos de registros de pressão, planilhas da operação, manuais técnicos, catálogos, cadastros de dados comerciais, entre outros. Conhecer o problema é o primeiro passo para solucioná-lo. Esse conhecimento envolve a coleta de dados no tempo e no espaço, a geração e processamento das informações e a correta interpretação delas, de forma a vincular a necessidade (ou não) da adoção das ações mais corretas para avançar nos resultados (ABES, 2015).

Segundo um estudo do Banco Mundial, 32 bilhões de metros cúbicos de água tratada são perdidos anualmente em vazamentos da rede de distribuição ao redor do mundo e cerca de 16 bilhões são consumidos, porém não são faturados (KINGDOM, LIEMBERG; MARIN, 2006).

Karadirek (2016) apresenta um panorama do nível de perdas totais/água não faturada (ANF)⁵ em alguns países do mundo. O autor referencia a ANF sobre o percentual do volume de entrada do sistema. A Tabela 4 apresenta o nível de perdas/água não faturada em alguns países e ou regiões do mundo.

⁵ Diferença entre o volume produzido e o volume faturado.

Tabela 4 – Perdas Totais/ANF ao redor do mundo

País	Perdas/ANF
Turquia	ANF: 43,6%
América Latina	ANF: 40-55%
Brasil	Perdas: 39,1%
Itália	Perdas: 36%
Portugal	Perdas: 36%
Eslovênia	Perdas: 25-35%
Espanha	ANF: 25%
América do Norte	ANF: 23,1%
Reino Unido	Perdas: 20-23%
Dinamarca	Perdas: 7%
Holanda	Perdas: 3-7%

Fonte: Adaptado de Karadirek (2016).

Visualiza-se na Tabela 4 os países com elevado nível de eficiência em seus processos como a Holanda e Dinamarca, em contraponto a países e ou regiões como Turquia e a América Latina, respectivamente. A interpretação destes dados dentro de cada sistema de distribuição, perdas ou ANF, é parte constituinte de um bom diagnóstico operacional que por sua vez, subsidiará a formulação de uma estratégia exitosa para a melhoria no abastecimento de água. O início da formulação desta estratégia preconiza um conjunto de perguntas sobre o sistema que necessitam de respostas (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

O Quadro 4 mostra informações de contexto que permitem às prestadoras de serviços de saneamento uma visualização inicial do sistema, a partir de dados e parâmetros comumente utilizados.

Quadro 4 - Elementos para diagnóstico operacional

Perguntas	Métodos disponíveis
Conhecemos o sistema de abastecimento?	Cadastro técnico e comercial atualizado, setorização, modelagem hidráulica.
Quanto se perde de água?	Macromedição, micromedição e balanço hídrico.
Como determinar os tipos de perdas?	Vazão mínima noturna, registros de campo (vazão, pressão, consumo energético), ensaios de medidores em bancada.
Onde a água é perdida?	Projeto Piloto, registro e mapeamento de manutenções, cadastro comercial, DMCs.
Por que se perde?	Efeitos da pressão, materiais, mão-de-obra, controle ativo de vazamentos, histórico de falhas.

Fonte: Adaptado de European Commission (2014).

2.5.1 Cadastro técnico

O cadastro técnico é definido como uma base de dados que contém informações sobre o sistema de adução e distribuição de água. Este cadastro permite localizar as tubulações de água e demais componentes (adutoras, redes, válvulas, descargas etc.) dentro de uma base cartográfica, indicando diâmetros, extensões, materiais e conexões permitindo o conhecimento do sistema e o estabelecimento de instruções de operação. Constitui um elemento imprescindível na modernização da empresa e na melhoria do controle e da prestação dos serviços de abastecimento de água, devendo ser continuamente atualizado e aprimorado tecnologicamente (CONEJO; LOPES; MARCKA, 1999).

A Tabela 5 exemplifica os dados extraídos do cadastro técnico.

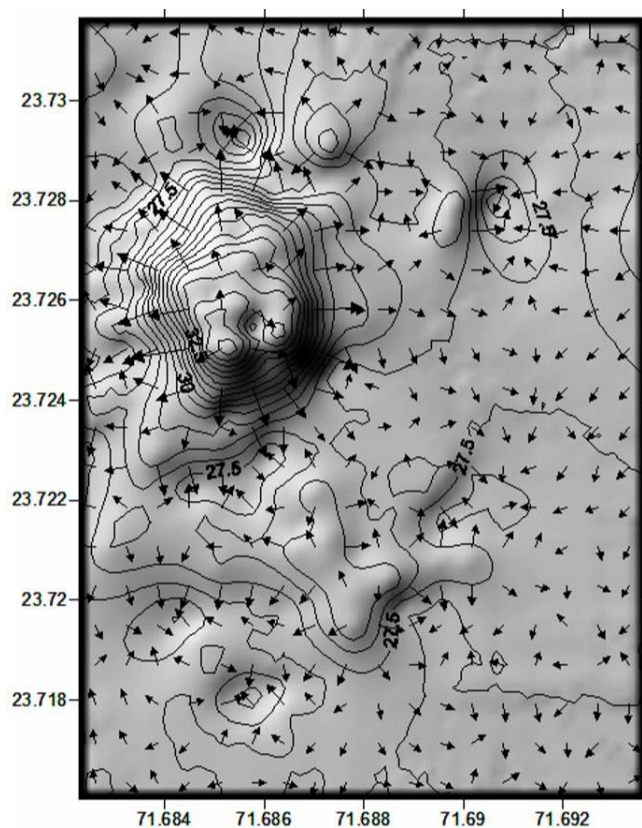
Tabela 5 - Dados do cadastro técnico

Diâmetro (mm)	Material	Extensão (km)	Porcentagem (%)
50	PVC	62,95	75,27
75	PVC	6,17	7,62
100	PVC	2,35	2,9
150	Ferro Fundido	2,82	3,48
200	Ferro Fundido	4,56	5,63
250	Ferro Fundido	0,87	1,07
300	Ferro Fundido	0,65	0,8
400	Ferro Fundido	0,6	0,74

Fonte: MundoGeo (2010).

Um importante instrumento para a atualização tecnológica de cadastros técnicos e demais informações utilizadas no diagnóstico operacional é o Sistema de Informações Geográficas (SIG). O SIG é formado por *hardware*, *software*, informação espacial e recursos humanos utilizados para georreferenciar informações necessárias para um determinado estudo. Mansi *et al.* (2016) utilizaram a tecnologia SIG para planejar ações de melhoria no sistema de distribuição de água de Sami Taluka, Índia, coletando informações como redes existentes, população atendida, relevo da superfície entre outras informações georreferenciadas. A Figura 11 exemplifica um mapa do relevo de superfície do Vilarejo de Baspa em Sami Taluka, Índia.

Figura 11 - Mapa de relevo de superfície



Fonte: Mansi *et al.* (2016).

2.5.2 Cadastro comercial

O cadastro comercial ou de faturamento compreende a base de dados relacionada aos consumidores, como natureza do consumo, endereços, consumos e características dos hidrômetros, entre outras informações. Ele é de fundamental importância para a qualidade no atendimento ao cliente e para o faturamento da

prestadora de serviços de abastecimento de água tratada, bem como fornece informações que orientam a programação da manutenção de hidrômetros. Da mesma forma que o cadastro técnico, a base de informações comerciais requer constante atualização dos dados e de tecnologia para a minimização das perdas financeiras (CONEJO; LOPES; MARCKA, 1999).

A natureza dos consumos é classificada pelas companhias de saneamento em categorias de consumo. As categorias de consumo comumente utilizadas pelas operadoras de saneamento são as categorias residencial, comercial e industrial. O Decreto nº 8165, de 14 de julho de 2015, estabelece o regulamento dos serviços prestados pelo Serviço Municipal de Água e Esgotos – SEMAE (SÃO LEOPOLDO, 2015) de São Leopoldo em seu regulamento de serviços classifica as categorias da seguinte forma:

- a) **residencial social:** quando a água for utilizada para fins domésticos e higiênicos em prédios residenciais, cujo uso do imóvel se destinar exclusivamente para moradia;
- b) **residencial:** quando a água é utilizada para fins domésticos e higiênicos, em prédios residenciais, associações civis, instituições de caridade ou de assistência social, entidades esportivas, templos, igrejas, jardins públicos e ainda, de uma maneira geral, quando essa utilização não tiver fins lucrativos;
- c) **comercial A:** loja, quando a água é utilizada para fins domésticos, higiênicos e sem finalidade lucrativa ou sala comercial, em que a atividade profissional esteja caracterizada pelo exercício predominantemente técnico, científico ou intelectual de conhecimentos;
- d) **comercial B:** quando a água é utilizada para fins domésticos, higiênicos e com finalidade lucrativa. Incluindo-se os estabelecimentos comerciais em geral;
- e) **obras e construções:** quando a água estiver sendo utilizada em obras, incluindo reformas ou construções;
- f) **pública:** quando a água é utilizada em órgãos e repartições públicas federais, estaduais ou municipais;
- g) **industrial:** quando a água é utilizada como matéria essencial à própria natureza da indústria ou para fins domésticos e higiênicos do próprio estabelecimento industrial, e ainda em estabelecimentos de ensino

particular, hospitais, shopping centers, sedes de congregações religiosas, hotéis e similares. Incluem-se nessa categoria os estabelecimentos temporários ou não permanentes, tais como feiras, circos, parques de diversão, mostras e similares;

A natureza dos consumos também é classificada em doméstica, comercial /industrial agrupados e pública/estado como uma só:

Os consumos ditos públicos foram agrupados pela natureza de ocupação, pois, por exemplo, não há motivo para que se imagine escritórios, públicos ou não, estatais ou privados, com demandas de água diferentes se igualmente dedicados à administração e frequentados por pessoas de mesmos costumes sociais, econômicos e culturais. Nem que as escolas públicas ou não as pessoas demandem mais água ou frequentem mais banheiros numa ou na outra. (NETTO, 2015, p. 409).

A Tabela 6 apresenta a natureza dos consumos com valores mínimos, médios e máximos em litros por habitante dia (l/hab. dia).

Tabela 6 - Natureza dos consumos

Natureza dos consumos	%	Mínimo l/hab. dia	Médio l/hab. dia	Máximo l/hab. dia
Doméstica	47	57	132	189
Comercial e industrial	40	38	114	379
Pública (privada e Estado)	13	19	38	57

Fonte: Adaptado de Netto (2015).

O cadastro comercial e demais atividades associadas representam a principal estratégia para recuperação das perdas por faturamento, de forma rápida e viável economicamente. A disponibilização destas informações para os demais setores da prestadora, é de fundamental importância. Setores de planejamento e operação, com base nestes dados, podem calcular vazões de consumo por setor de abastecimento entre outras variáveis necessárias para a operação e a expansão de um sistema de distribuição de água (CONEJO; LOPES; MARCKA, 1999).

2.5.3 Perdas reais

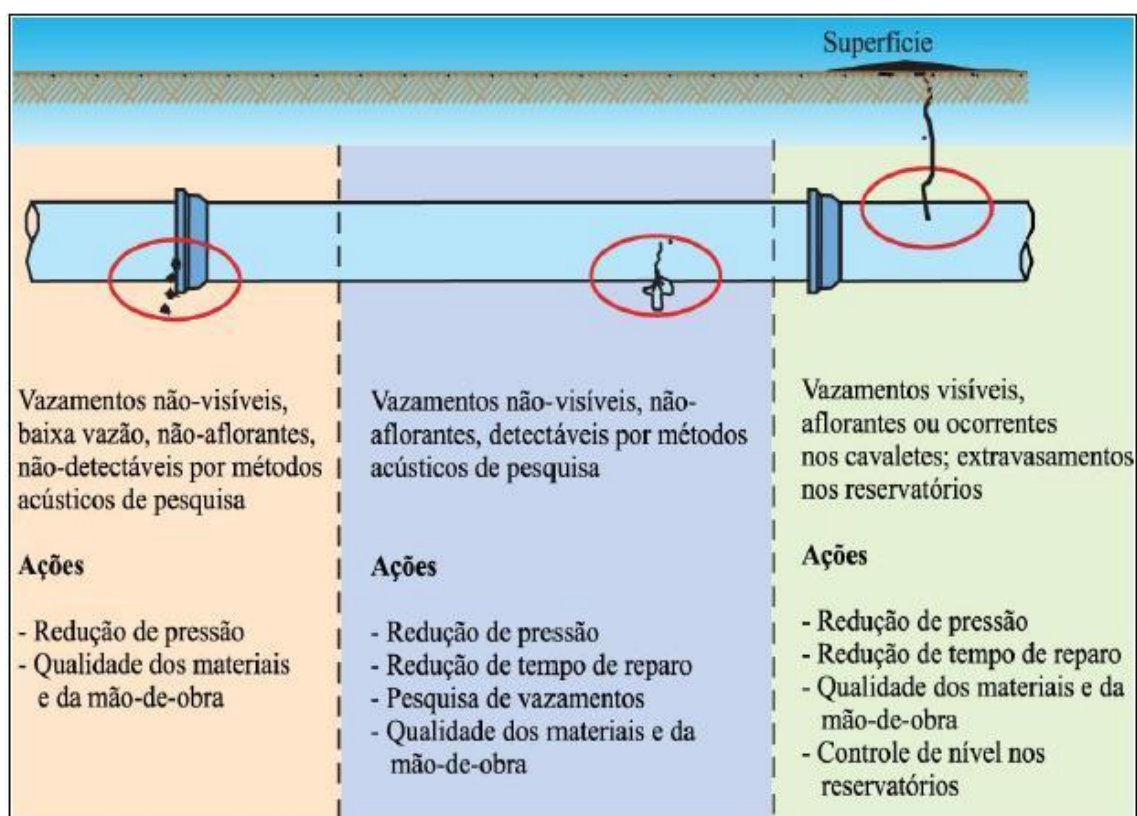
Perda real é a diferença entre o Volume Produzido (VP) e o Volume Consumido (VC). É composta por vazamentos na rede, no ramal de ligação, em reservatórios e de extravasamento de reservatórios (ALEGRE *et al.*, 2006).

Pode-se dizer que os volumes perdidos nos vazamentos (perdas reais) carregam consigo os custos de produção e transporte da água tratada, tais como os custos de energia elétrica, produtos químicos, mão-de-obra etc. Para os consumidores, as perdas são um componente importante nas tarifas por elas pagas, pois as prestadoras geralmente incorporam essas perdas na composição de preços (SANTOS, 2013). Os vazamentos são classificados como visíveis e não-visíveis, por sua vez, os não-visíveis são divididos em detectáveis e não-detectáveis.

Os vazamentos visíveis são aqueles perceptíveis pela população e pelos técnicos das companhias de saneamento, pois afloram na superfície.

Os vazamentos não-visíveis, como necessitam de métodos acústicos para serem detectados, ocorrem por um período maior. Os vazamentos não-visíveis e de difícil detecção, são denominados de não detectáveis ou inerentes. Eles não podem ser detectados por equipamentos de pesquisa acústica convencionais, devido às baixas vazões, sendo inviável economicamente o uso de métodos acústicos avançados (SANTOS, 2013). A Figura 12 exemplifica os tipos de vazamentos e as ações necessárias para a redução destes.

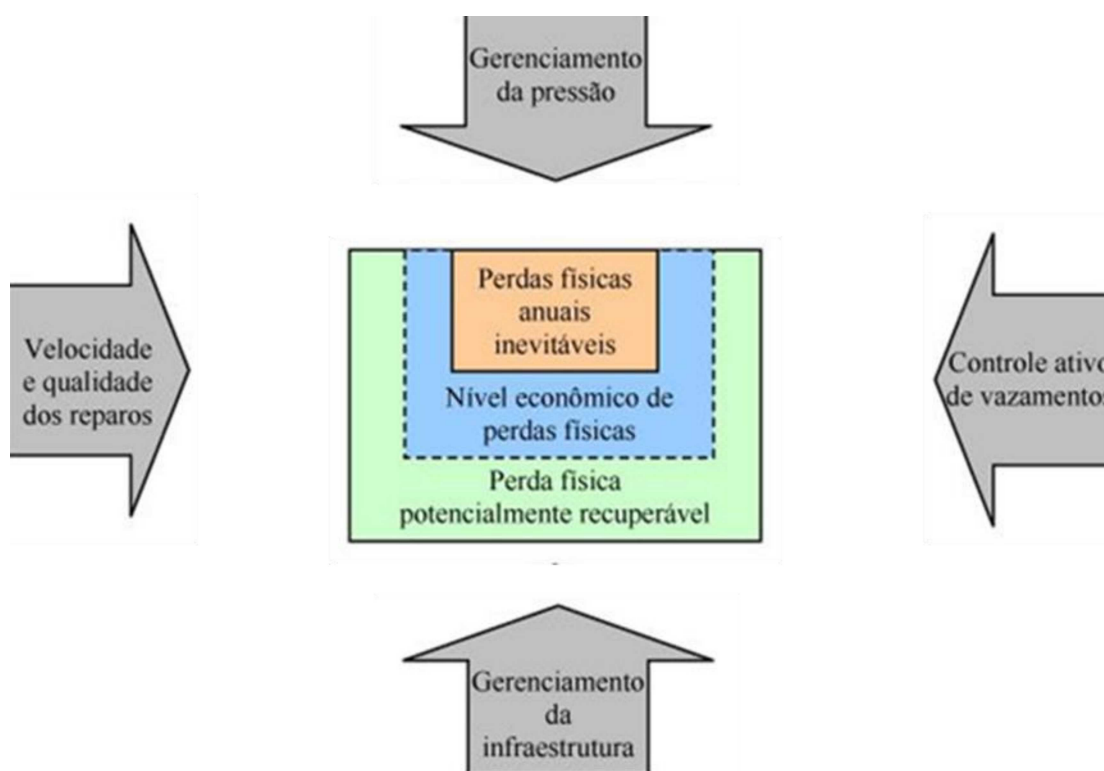
Figura 12 - Perdas reais



Fonte: Tsutiya (2004).

Conforme observa-se na Figura 12 percebe-se que as ações principais para a redução de perdas físicas em um sistema de distribuição de água estão relacionadas à redução de pressão, a redução de tempo de reparo, a pesquisa de vazamentos e a qualidade dos materiais e da mão de obra. Essas ações estão condensadas na figura gráfica denominada Cruz das Perdas Físicas (LAMBERT; TAYLOR, 2010). A Figura 13 apresenta a Cruz de Lambert.

Figura 13 - Cruz das perdas físicas

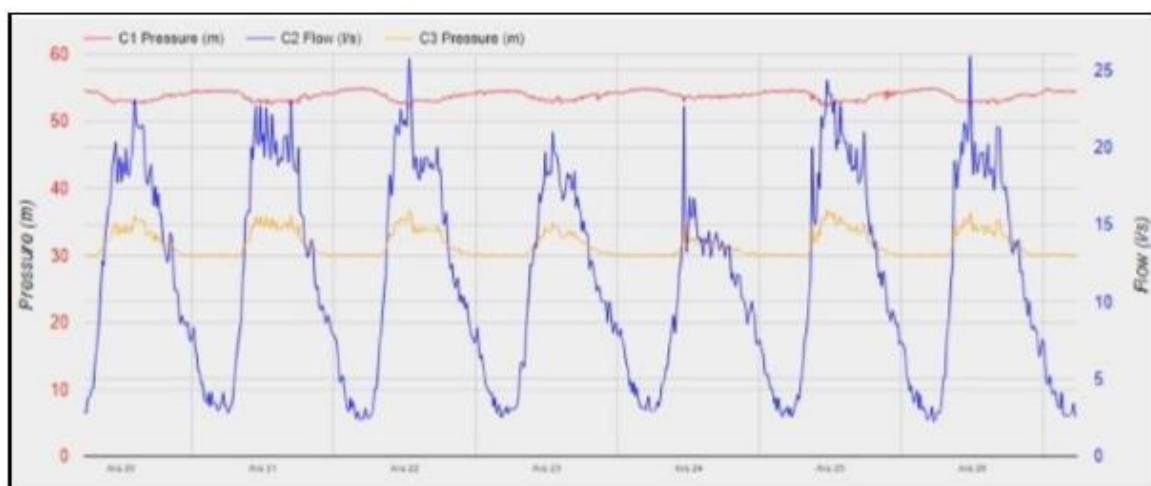


Fonte: Adaptado de Lambert e Taylor (2010).

Na Figura 13 identifica-se nas setas em torno do retângulo central macro ações que propiciam a redução de perdas físicas como o gerenciamento da pressão, a velocidade e qualidade dos reparos, intimamente ligado a qualidade dos materiais e da mão-de-obra, bem como o gerenciamento da infraestrutura e o controle ativo de vazamentos. O retângulo central apresenta a hierarquia das perdas, onde visualiza-se o campo na cor verde “perda física potencialmente recuperável” que está relacionada aos vazamentos visíveis aflorantes ou ocorrentes como vazamento em quadro de entrada e extravasamento de reservatórios. A área em azul apresenta o “nível econômico de perdas” representado pelos vazamentos não visíveis, porém detectáveis através de equipamentos de geo-escuta. As “perdas físicas anuais

inevitáveis”, quadro laranja, diz respeito aos vazamentos não visíveis que não afloram e não detectáveis por métodos de detecção. Em geral esses vazamentos do quadro laranja possuem baixa vazão, porém como não são detectáveis, o volume de perdas físicas geradas por este tipo de vazamento tende a ser significativo ao longo do tempo. Bobat (2019) apresenta o projeto de redução de perdas implementado em Izmit, cidade turca da província de Kocaeli. O projeto utiliza métodos e técnicas inovadoras como georadar para identificação de tubulações sobre o solo e sonar para detecção de vazamentos subterrâneos. Além do uso de válvulas reguladoras de pressão e outros componentes que mitigam as perdas físicas. O gerenciamento da pressão, bem como das vazões de distribuição das redes de abastecimento de água é realizado com o auxílio de *software* de supervisão e controle SCADA. A Figura 14 apresenta o monitoramento de pressão e vazão através do SCADA.

Figura 14 - Monitoramento de pressão e vazão via SCADA



Fonte: Bobat (2019).

Na Figura 14 identifica-se as pressões de entrada e saída de um Distrito de Medição e Controle (DMC) nas linhas vermelha e amarela respectivamente. A linha em azul apresenta o perfil de vazões ao longo do tempo. O eixo vertical à esquerda indica a pressão em metros (m) e o eixo à direita a vazão em litros por segundo (l/s).

2.5.4 Materiais utilizados em tubulações

Os tipos de tubos atualmente disponíveis e empregados nos sistemas de distribuição de água são normalmente de plástico como PVC e PEAD, metálicos (ferro fundido e aço) e de cimento-amianto, havendo predominância dos tubos de PVC e de

ferro fundido (SARZEDAS, 2009). As tubulações de cimento-amianto estão em desuso em virtude de problemas de funcionalidade (a fabricação e o uso da fibra do amianto podem provocar doenças graves). As tubulações de PVC são as mais empregadas nos projetos de adutoras e redes de abastecimento para diâmetros nominais não superiores a 300. Para diâmetros maiores, os tubos de ferro fundido são os mais utilizados. A grande vantagem do PVC é a sua baixa densidade resultando em baixos custos de transporte e de instalação. Outra vantagem do PVC é a sua alta resistência à corrosão, ao ataque químico de águas impuras e a baixa rugosidade das paredes dos tubos (GOMES, 2010). Os tubos de ferro fundido (fofo) são constituídos de liga de ferro e carbono, e são divididos em ferro fundido cinzento e ferro fundido nodular, de acordo com a proporção de carbono e forma da grafita na composição do material (ASHBY, 2012). Atualmente, a utilização para este tipo de tubo está restrita ao ferro fundido nodular. Os tubos de fofo são revestidos internamente com uma argamassa de cimento e externamente com zinco e pintura betuminosa, são utilizados em pressões de serviço acima de 1 MPa, para os quais, os tubos de PVC não se adequam. A escolha de tubulações em ferro fundido, deverá ser precedida de consulta aos catálogos de fabricantes para se obter características funcionais dos tubos, segundo seu diâmetro nominal, comprimento dos tubos, diâmetros externos, diâmetros internos, as espessuras dos tubos e suas massas. Os tubos de PEAD são empregados, de certa forma, recentemente na área de saneamento, visto que é a última tecnologia implementada em larga escala. Apresentam características próximas ao PVC, como o baixo peso, resistência a corrosão, pouca rugosidade, porém, com algumas vantagens adicionais como a maior resistência à fadiga e baixa condutividade térmica. Os tubos de PEAD são unidos por termo fusão, sem consumo de cola ou deposição de materiais, garantindo uma tubulação contínua e sem riscos de vazamento, além de dificultar o furto de água, em função da dificuldade de conexão a essas redes, conforme o que foi exposto (GOMES, 2004). A Tabela 1 cita as propriedades destes materiais como o coeficiente de dilatação linear, o coeficiente de condução térmica, o limite de resistência à tração, o preço aproximado e a energia incorporada, propriedades estas, utilizada em nossos estudos.

A Tabela 7 apresenta diversas propriedades destes materiais necessárias para este estudo.

Tabela 7 - Propriedades dos materiais utilizados em tubulações de água

Material	$\alpha^*(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	K** (w/m.k)	Módulo E (Gpa)	Su*** (MPa)	Cm**** (\$/kg)	Energia incorporada (Mj/kg)
PEAD	126-198	0,40-0,44	0,621-0,896	20,7-44,8	1,3-1,4	77-85
Ferro fundido	10-12,5	29-44	165-180	350-1000	0,57-0,69	16-18
PVC	100-150	0,15-0,29	2,14-4,14	40,7-65,1	0,93-1	68-95

*Coeficiente de dilatação Linear (α),

**Coeficiente de condução térmica (k)

***Limite de resistência à tração (Su)

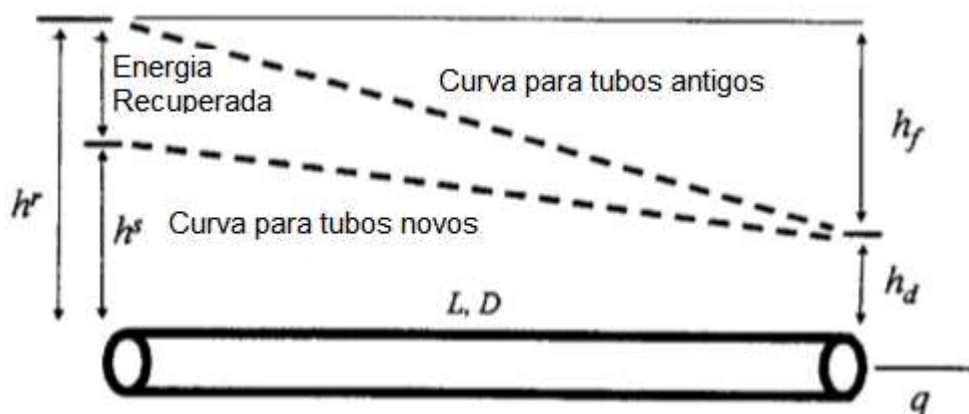
****Preço aproximado (Cm)

Fonte: Adaptado de Ashby (2012).

Na Tabela 7 visualiza-se propriedades como o coeficiente de condução térmica (k) que no ferro fundido é muito superior aos polímeros (PVC e PEAD), propriedade esta que influencia diretamente, junto com o coeficiente de dilatação nos valores de tensões térmicas e por consequência, nas rupturas por choque térmico. O módulo de Elasticidade (E) dos polímeros analisados possui valores bem inferiores ao do ferro fundido, esta propriedade é usada para o cálculo das tensões devido aos transientes hidráulicos, outro fator que ocasiona rompimentos de redes. A Energia Incorporada (EI) e o preço aproximado (Cm) são propriedades que possuem inter-relações, pois quanto maior a energia incorporada, maior será o seu preço aproximado, nestas propriedades os polímeros apresentam valores maiores que o ferro fundido (ASHBY, 2012).

Ao longo da vida útil destas tubulações, as propriedades dos materiais que as compõem perdem suas propriedades, tornando estas tubulações obsoletas quer pelo aumento da frequência de falhas ou pela perda da eficiência. Tubulações obsoletas aumentam as perdas por atrito, fazendo com que tenha que adicionar mais energia via bombeamentos para suprir a demanda (FILION; MACLEAN; KARNEY, 2004). A Figura 15 apresenta um gráfico comparativo entre uma tubulação nova e outra obsoleta considerando a energia utilizada em cada um dos casos.

Figura 15 - Curva de energia para tubos



Fonte: Adaptado de Filion, Maclean e Karney (2004).

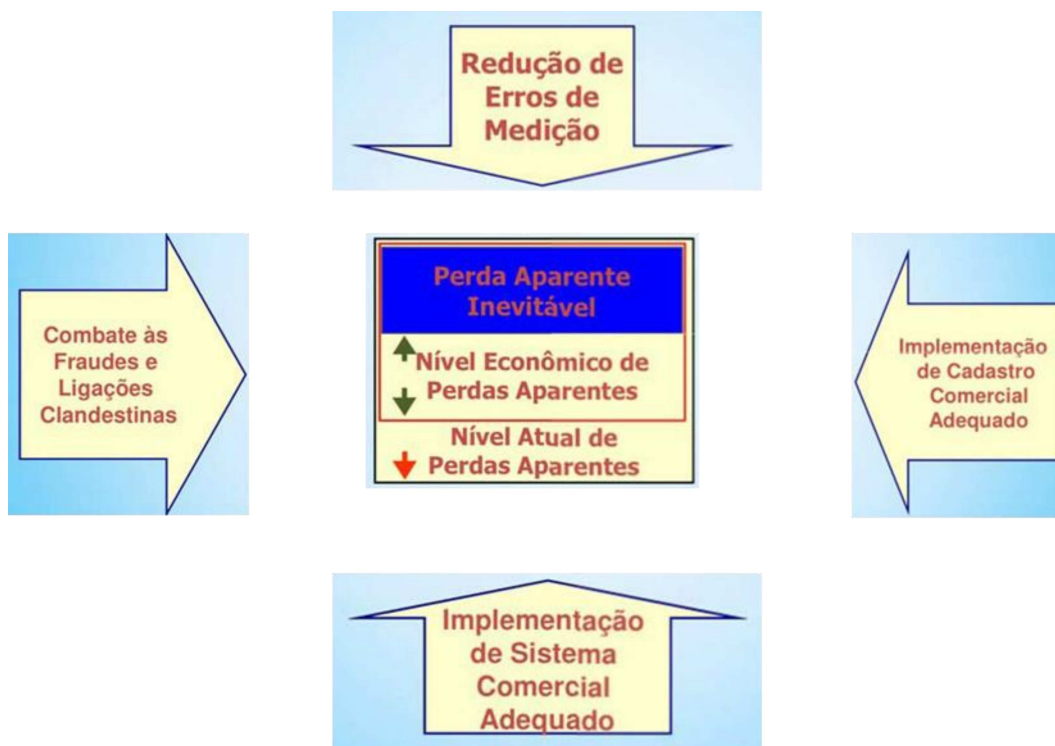
Na Figura 15 observa-se a energia recuperada a partir da substituição de tubo com o mesmo comprimento (L) e o mesmo diâmetro (D). A energia para tubos novos (h^s) é menor devido a menor perda por atrito de suas paredes para um mesmo ponto operacional de pressão e vazão (h_d, q). A energia utilizada em um tubo antigo (h') para um mesmo ponto operacional (h_d, q) apresenta a diferença de energia (h_f) ao final do tubo.

2.5.5 Perdas aparentes

As perdas aparentes correspondem ao volume de água consumido e não contabilizado devido aos erros de medição nos hidrômetros, fraudes, ligações clandestinas e falhas no cadastro comercial, ou seja, o volume entregue ao consumidor, é maior que o Volume Faturado (VF). Um fator que induz a sub medição dos hidrômetros, aumentando a perda aparente, é a existência de caixas d'água domiciliares com válvula de boia. Enquanto as perdas reais oneram os custos de produção e distribuição de água, perdas aparentes estão associadas às vendas de água no varejo (TARDELLI FILHO, 2016).

As principais ações para redução das perdas aparentes estão elencadas na cruz de perdas aparentes (Figura 16).

Figura 16 - Cruz de perdas aparentes



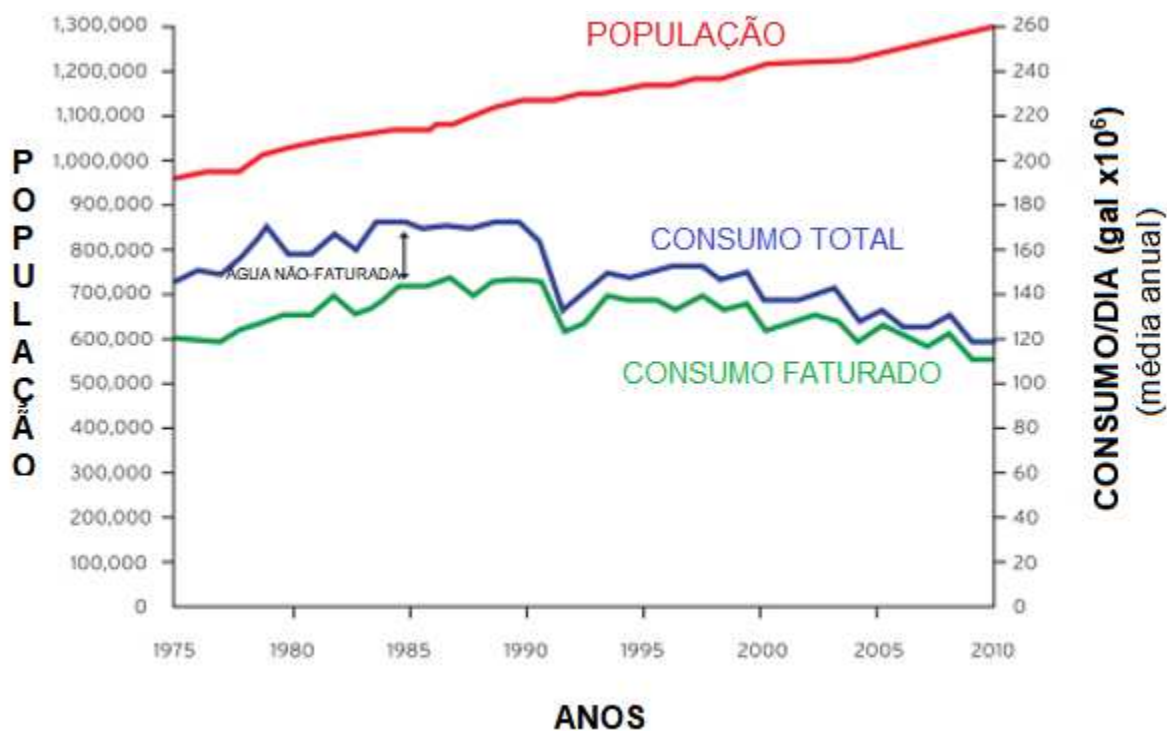
Fonte: Adaptado de Vermersch *et al.* (2016).

Na Figura 16 se visualiza através das setas em torno do retângulo central as macros ações para a redução das perdas aparentes. Essas ações e sua correta implementação propiciam a redução das perdas aparentes, resultando nos diversos níveis de perdas sinalizado no retângulo central. No primeiro nível encontram-se as perdas aparentes correntes, isto é, as perdas sem medidas efetivas para mitigá-las. O nível econômico de perdas aparentes é o resultado da aplicação das ações mencionadas nas setas no entorno do retângulo central da figura observando a viabilidade econômico-financeira, ou seja, que o conjunto de investimentos para redução das perdas aparente apresente uma relação custo-benefício que compense o valor recuperado. No retângulo em azul encontra-se o nível inevitável de perdas aparentes, nível pelo qual o conjunto de ações necessárias não são viáveis economicamente, o valor recuperado é menor que o valor investido.

A perspectiva da redução de perdas aparentes é aproximar a curva do VP com o VF. Como exemplo pode-se indicar a cidade de Seattle que apresentou um excelente resultado entre 1990 e 2010 reduzindo a distância entre o VC e o VF. Enquanto a população apresentou um acréscimo de 15%, a demanda por consumo de água decresceu em 30% (U. S. EPA, 2016). A Figura 17 apresenta o gráfico de

demanda de consumo de água versus crescimento populacional da cidade de Seattle nos Estados Unidos.

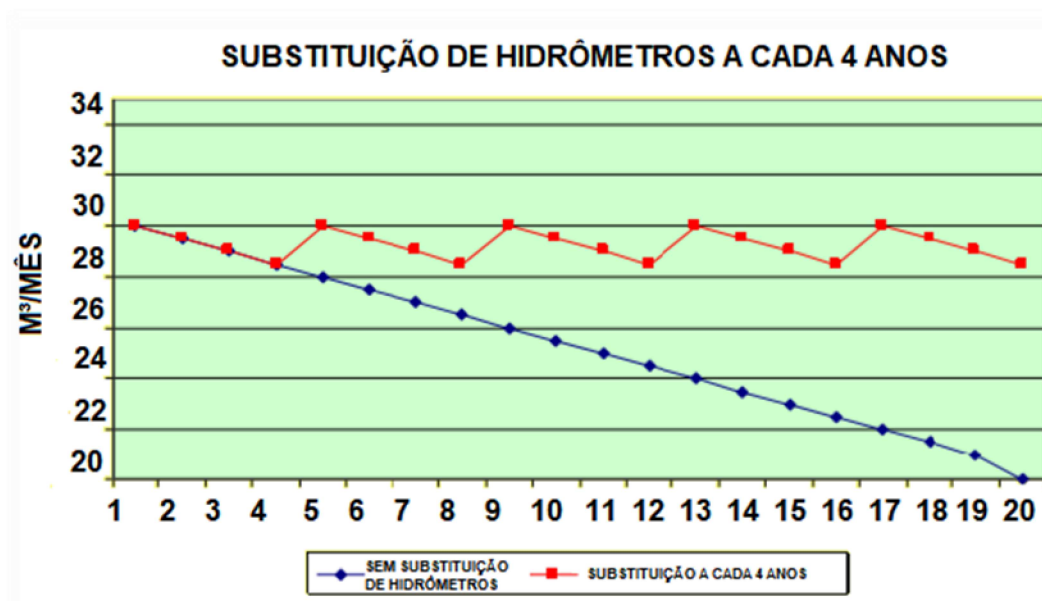
Figura 17 - Curva demanda de consumo x crescimento populacional de Seattle



Fonte: Adaptado de Seattle Public Utilities (2012).

Vermesch e Carteado (2008) apresentam o estudo da cidade de Macao na China onde a estratégia para reduzir as perdas aparentes foi baseada na redução dos erros de medição através de uma política de renovação do parque de hidrômetros. A Figura 18 apresenta o gráfico comparativo entre o volume medido em um parque de hidrômetro sem nenhuma substituição e outro com a substituição ocorrendo a cada 4 anos.

Figura 18 - Substituição de hidrômetros na cidade de Macao



Fonte: Adaptado de Vermesch e Carteado (2008).

Na Figura 18 verifica-se na linha em azul o parque de hidrômetros sem nenhuma substituição, a tendência descendente da medição de consumo ao longo dos meses gerada pela obsolescência e, conseqüentemente, sub medição dos hidrômetros. Na linha em vermelho, substituição a cada 4 anos, a medição de consumo tem sub medição mínima decorrente das substituições que são efetuadas no intervalo descrito. A perda aparente na linha em vermelho é mínima e encontra-se no nível econômico de perdas, ou seja, o custo de implantação é menor que o benefício gerado.

2.5.6 Eficiência energética em sistemas de distribuição de água

A eficiência energética no abastecimento de água das cidades está intimamente ligada ao aspecto econômico da sustentabilidade, haja visto que as despesas com energia elétrica são o segundo maior custo para as operadoras de saneamento. Apenas 53% do total de energia elétrica consumida para o abastecimento de água tratada é efetivamente despendida até o consumidor final. Os outros 47% são desperdiçados em perdas físicas (27%) e as demais, em perdas de carga singulares e distribuída em tubulações, bem como em dissipação de acionamentos, motores e bombas (GOMES, 2013). Neste item serão analisados diversos componentes do sistema, que contribuem para o aumento ou redução deste

consumo baseada nas principais causas da ineficiência. Os componentes destacados para esta análise são: moto bombas, conversores de frequência, válvulas reguladoras de pressão (VRP) e turbogeradores.

2.5.6.1 Consumo energético de moto bombas

O consumo de energia elétrica em sistema de abastecimento de água é da ordem de 0,6 kWh por m³ de água produzida, sendo que 90% dessa despesa ocorre nos conjuntos de bombeamentos presentes nas elevatórias de água tratada. Portanto, a necessidade de redução de custos de energia elétrica tem sido uma preocupação constante entre as operadoras de saneamento (TSUTIYA, 2004). O valor possível deste indicador em motobombas está em torno de 0,22 Kwh/m³, abaixo deste número as perdas resultantes da forma construtiva de motores e bombas torna-se impossível um resultado mais significativo (FERREIRA, 2020).

Os sistemas de bombeamento de água estão sujeitos a variações na demanda de vazão diária que podem gerar períodos longos de funcionamento (consumo elevado) e ou períodos com grande número de partidas destes conjuntos (baixo consumo) conforme a necessidade de reposição dos reservatórios de água tratada. A forma como se controla a vazão desses conjuntos ao longo do dia, exerce grande influência sobre o consumo energético da moto bomba. O controle de vazão, utilizado atualmente nos sistemas de bombeamento de abastecimento de água, mantendo a velocidade constante do conjunto motor/bomba, acarreta desperdício de energia elétrica. Os métodos mais utilizados para controlar a vazão mediante a operação do conjunto motor/bomba com velocidades fixas são os seguintes: *on-off*, em que a bomba é desligada quando a vazão ultrapassa a demanda de consumo; *by pass*, quando ocorre um retorno de parte da vazão para a sucção do conjunto e válvula de controle, em que se insere uma diminuição da vazão, através de uma restrição na abertura da válvula, à montante do bombeamento (AMÉRICO, 1996 apud GOMES, 2010).

Outro fator que define a eficiência é o rendimento dos conjuntos de moto bomba dado pela Equação 1:

$$p = \frac{\gamma \times q \times H}{\eta_m \times \eta_b} \quad (1)$$

Onde:

p = potência mecânica em kW;

γ = peso específico em kgf/m³;

q = vazão em m³/s;

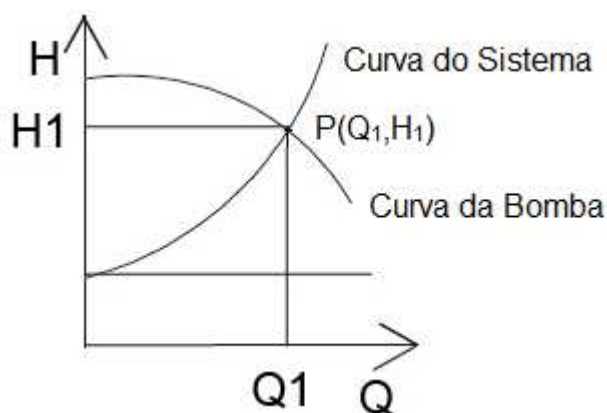
H = altura manométrica em metros;

η_m = rendimento do motor;

η_b = rendimento da bomba.

Na Equação 1 verifica-se que o desempenho destes conjuntos também está atrelado ao ponto operacional (Figura 19), representado pela intersecção das curvas do sistema versus curva da bomba $P(Q_1, H_1)$ (GOMES, 2010).

Figura 19 - Ponto de operação



Fonte: Adaptado de Menezes *et al.* (2008).

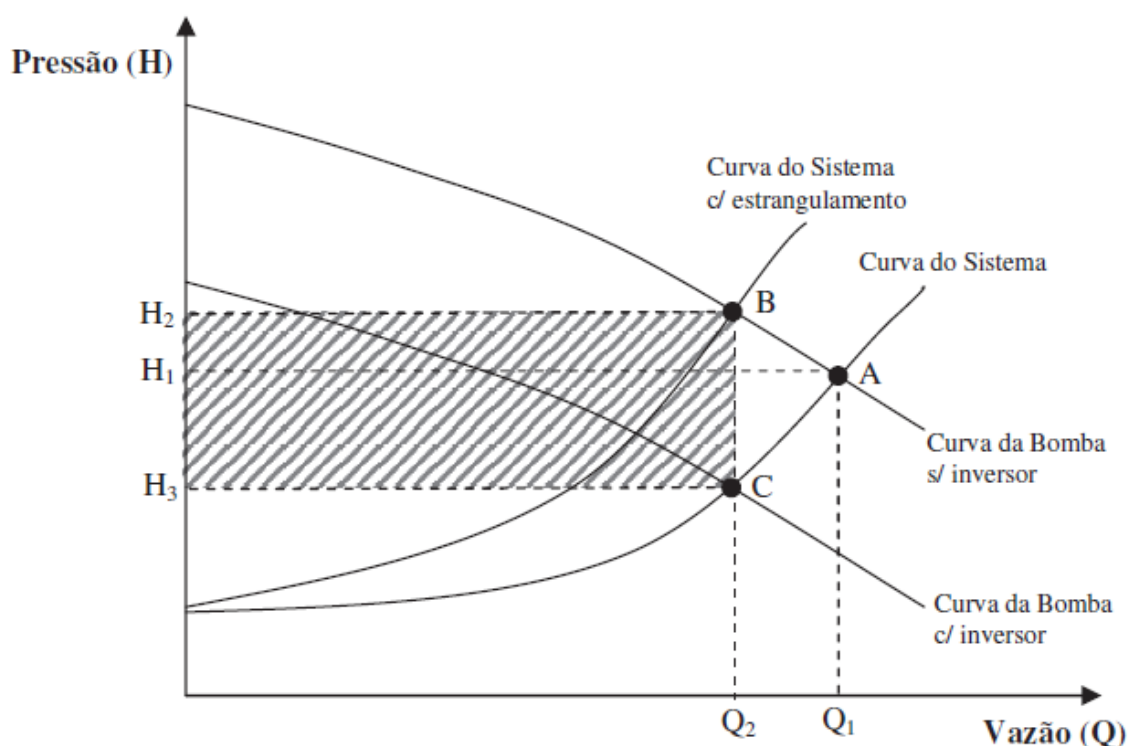
2.5.6.2 O uso de conversores de frequência

O conversor de frequência é um equipamento elétrico com a capacidade de produzir variação nos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, causando uma variação de sua rotação. Eles são utilizados nos sistemas de saneamento como mecanismo de modulação de carga, sem afetar a operação do sistema, estabelecendo um controle da vazão, orientado pela demanda de água ao longo das horas do dia. Este equipamento elétrico permite variar a potência demandada pela

instalação e desta forma, possibilitar o controle de pressão do sistema, além de permitir a variação de vazão sem perda de carga, pois a variação de rotação ocorre no eixo do motor, gerando por consequência, redução do consumo de energia elétrica. O controle de pressão, por sua vez, reduz proporcionalmente as perdas reais, ou seja, diminui os vazamentos. Os conversores de frequência ainda produzem uma vantagem adicional porque atuam como dispositivos de partida suave, mitigando a ocorrência de transientes hidráulicos nas redes de distribuição (MENEZES *et al.*, 2008).

A Figura 20 apresenta pontos operacionais na Curva P x V para diversos cenários utilizados para o controle de vazão.

Figura 20 - Pontos operacionais com e sem o uso de conversores de frequência



Fonte: Menezes *et al.* (2008).

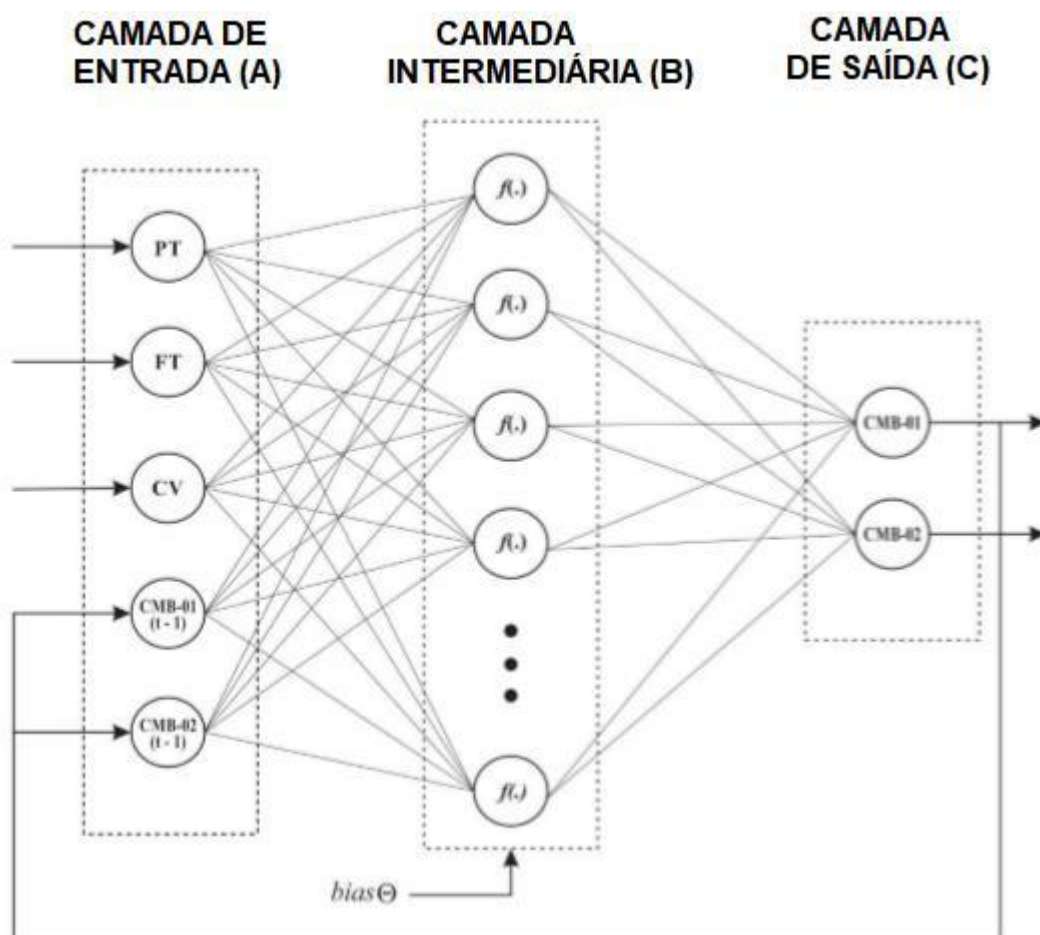
Na Figura 20 é possível verificar no polígono H_2BCH_3 a redução de energia entre dois métodos de controle da velocidade de motores. O método por estrangulamento utilizando válvula de controle, que produz um aumento de carga hidráulica (H_2) para uma vazão Q_2 representado, pela intersecção da curva do sistema com estrangulamento e a curva da bomba sem o inversor, no ponto B. O ponto C (H_3 , Q_2) representa uma curva de mesma vazão Q_2 , porém com redução da carga hidráulica em H_3 utilizando inversores de frequência. Ainda nesta figura se verifica o ponto operacional sem redução de velocidade A (H_3 , Q_1).

A redução do custo de energia compõe dois importantes resultados obtidos através do uso de inversores de frequência em sistemas de bombeamento: a redução das emissões dos gases do efeito estufa em valores acima de 35% e a redução do custo do ciclo de vida (CCV) de seus componentes em níveis superiores a 25% (FERREIRA; FONG; ALMEIDA, 2011).

Barros Filho (2016) propõe um sistema inteligente para controle de pressão em redes de abastecimento de água com bombas em paralelo com a utilização de inversores de frequência. Este sistema utiliza Redes Neurais Artificiais (RNA) para redes de abastecimento de água tratada que operam bombas em paralelo. O estudo encontra uma lógica de automação que define o status do bombeamento (ligado, desligado ou em rotação parcial) com base na redução de pressão e no consumo energético. O sistema de controle desenvolvido é genérico, o que permite ser aplicado em outros processos semelhantes. O programa computacional utilizado para o gerenciamento do sistema foi o LabVIEW *Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*. A rede neural escolhida foi a PMC (*Perceptron Multi Camadas*).

A Figura 21 apresenta a arquitetura da RNA.

Figura 21 - Arquitetura da RNA



Fonte: Adaptado de Barros Filho (2016).

A Figura 21 apresenta a arquitetura RNA, em que se visualiza as variáveis de entrada pressão (PT), vazão (FT), ângulo de abertura da válvula de controle (CV) e sinais da realimentação (frequência) das motobombas (CMB-01) e (CMB-02) dentro do bloco da camada de entrada (A). Ao centro tem-se a camada intermediária (B), em que se situa o bias⁶ e as funções de ativação. Na extremidade direita tem-se a camada de saída (C) com as variáveis de saídas (frequências) dos dois conjuntos (CMB-01) e (CMB-02). O autor conclui em sua tese que o sistema inteligente é compatível com os objetivos propostos sendo sua aplicação possível em sistemas de distribuição análogos.

⁶ Elemento que serve para aumentar o grau de liberdade dos ajustes dos pesos (GSIGMA-UFSC, 2020).

2.5.6.3 Válvula reguladora de pressão (VRP)

A VRP é um dispositivo que mantém o nível piezométrico a jusante da válvula, introduzindo uma perda de carga proporcional à pressão de montante. Isto resulta na manutenção da pressão a jusante constante independente da vazão solicitada (TARDELLI FILHO, 2004).

Conforme Gonçalves e Lima (2007):

O controle de pressão por meio de VRP apresenta-se como uma das ferramentas mais importantes no controle e redução de perdas, sendo recomendado o seu uso nos sistemas de abastecimento de água, na medida do necessário. Este controle deve assegurar as pressões mínimas e máximas permitidas para os consumidores finais, isto é, as pressões estática e dinâmica que obedecem a limites prefixados. Segundo a Norma Técnica NBR nº 12.218/1994, da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, a pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 500 kPa (50 mca), e a pressão dinâmica mínima, de 100 kPa (10 mca). Valores fora dessa faixa podem ser aceitos desde que justificados técnica e economicamente.

A utilização de VRP reduz a ocorrência e a reincidência de vazamentos através da redução da energia hidráulica representadas pelas pressões de trabalho. Sem a redução de pressão, mesmo que haja ações de pesquisa e detecção de vazamentos, os rompimentos tendem a se repetir e retornar aos níveis anteriores às ações. Dentro da Estratégia P+L, o uso de VRP promove a redução na fonte, ou seja, enquadra-se na minimização dos resíduos e emissões preconizados no nível 1 da Produção Mais Limpa, modificando processo.

A Figura 22 exemplifica a redução dos vazamentos através do uso de VRP realizado no setor de distribuição Guará II no Distrito Federal.

Figura 22 - Redução de vazamentos com a utilização de VRP



Fonte: Gonçalves e Lima (2007).

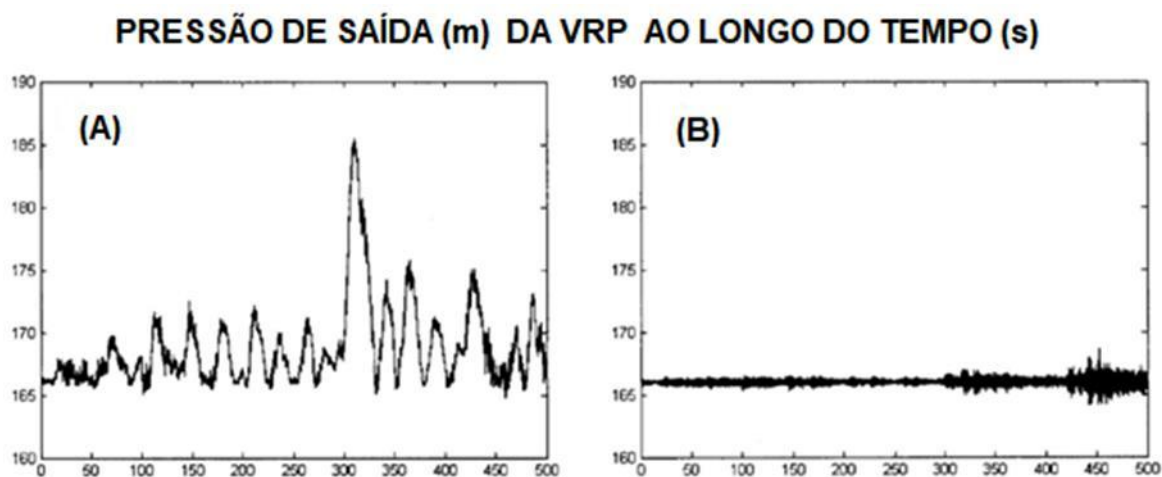
A Figura 22 mostra a taxa de perdas físicas entre os anos de 1992 e 2001, verifica-se que ocorre queda do volume perdido nos dois primeiros anos, no sistema de distribuição Guará II (Distrito Federal) devido à ação de pesquisa e reparo de vazamentos. Após este período, as perdas físicas voltam a subir até os níveis anteriores, cerca de 6000 m³/ano. A partir de 1997, novamente, ocorre uma redução das perdas em consequência da implantação de VRP. Esta queda se mantém até 2001 juntamente com a queda da pressão de trabalho noturna/diurna. O gráfico da Figura 22 demonstra que a pesquisa e verificação de vazamentos precisa vir acompanhada do controle de pressão do sistema.

Prescott e Ulanick (2008) analisaram o comportamento de VRP quando ocorrem instabilidades na rede de distribuição (transientes hidráulicos) devido ao aumento repentino da demanda de consumo e em pequenas variações no perfil de consumo ao longo do tempo. O trabalho utiliza o *software Matlab/Simulink* aplicando a lógica Proporcional, Integral e Derivativo (PID) de controle através de três cenários simulados. O primeiro cenário considera um sinal de alimentação (pressão de saída) de um bloco vindo de uma VRP e um nó dentro da rede de distribuição representando o consumo de toda a malha de abastecimento. O segundo cenário reconstitui uma rede de distribuição existente reproduzindo a lógica de controle pela pressão de saída

da válvula. O terceiro cenário apresenta uma lógica de controle como ocorre no primeiro cenário, porém com uma segunda alimentação decorrente da duplicação do bloco de controle formado pela VRP anteriormente mencionada. Os resultados apontam para uma melhora significativa no comportamento das VRP através de um Controlador PID em comparação ao controle hidráulico padrão da válvula.

A Figura 23 apresenta o perfil de pressões utilizando o controle hidráulico padrão e o controlador PID.

Figura 23 - Perfil de pressões: Controlador hidráulico padrão PID (A) e controlador PID (B)



Fonte: Adaptado de Prescott e Ulanick (2008).

Na Figura 23 encontra-se no quadro A as pressões de saída em uma VRP com controlador hidráulico padrão. Observa-se neste quadro a grande variação na pressão de saída ocasionada pelo aumento repentino de demanda ou pequenas oscilações no consumo e o controlador hidráulico não possui tempo de resposta suficiente para manter o sinal de saída constante. O quadro B apresenta uma pressão de saída que tende a ser constante devido a atuação do controlador PID que apresenta um tempo de resposta para ajuste de parâmetros mais rápido que o controlador hidráulico padrão frente às variações do consumo.

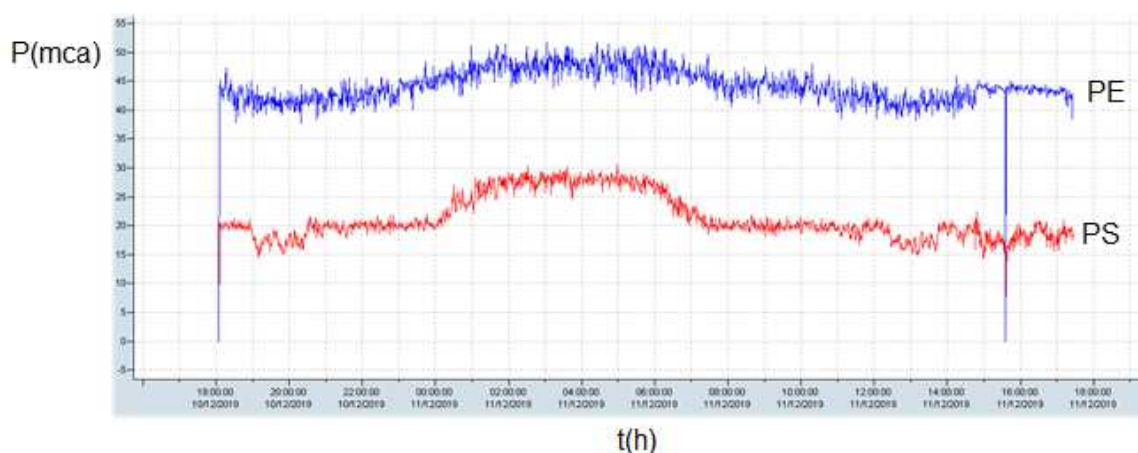
2.5.6.4 Turbina de hidro geração elétrica

A turbina de hidro geração (turbogerador) é um equipamento que produz energia elétrica de forma limpa e renovável, através do aproveitamento de potenciais

hidro energéticos disponíveis em fontes hídricas como: barragens, reservatórios, adutoras e quedas d'água. Os turbogeradores são utilizados em sistemas de distribuição de água como alternativa para o controle de pressão em tubulações, como as VRP, porém com a vantagem do aproveitamento energético oriundo da pressão de alimentação à montante do ponto de instalação.

A Figura 24 mostra o desempenho de turbogeradores na distribuição de água, considerando a pressão gerada e a pressão de alimentação ao longo do tempo t (HIGRA, 2019).

Figura 24 - Desempenho de turbogeradores



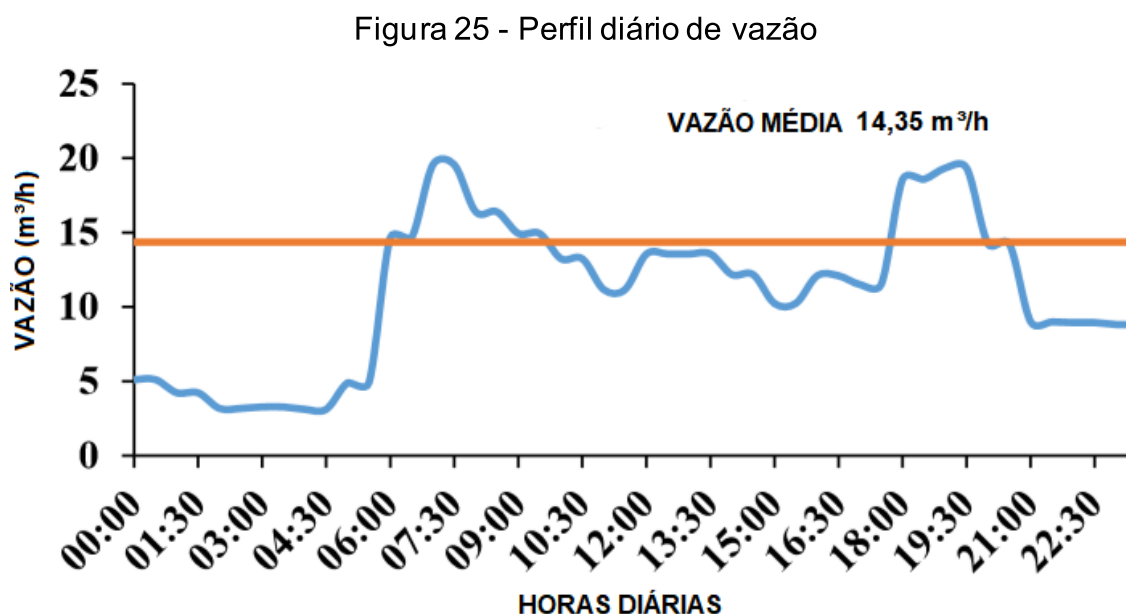
Fonte: HIGRA (2019).

A Figura 24 explicita o desempenho de turbogeradores em um sistema de distribuição de água, através do gráfico de pressão entrada/saída (mca), em função do tempo em horas. A linha em azul representa a pressão de entrada (PE) do turbogerador, a linha em vermelho a pressão de saída (PS). A diferença entre estas duas pressões são transformadas em energia elétrica. A turbina de hidro geração atua da mesma forma que as VRP, minimizando resíduos e emissões classificados no Nível 1 da estratégia P+L, modificando o processo de distribuição de água, agregando mudança tecnológica (CNTL, 2003).

Alberizzi *et al.* (2018) pesquisaram o uso de bombas funcionando como turbina (BFT) com velocidade controlada como alternativa ao uso de VRP em uma rede de distribuição de água utilizando o programa *Matlab/Simulink Model*. O desenvolvimento da simulação utiliza os dados de um trecho da rede da cidade Laives, Tirol do Sul, Itália, que possui constante variação da demanda de vazão. A simulação considera o uso de inversores de frequência para ajuste dos parâmetros de vazão e pressão de

saída da BFT, esses mesmos parâmetros foram utilizados para a seleção do bombeamento. O cálculo da vazão e da pressão média considera o período de operação compreendido entre 8:00 e 20:00 horas, pois nos demais horários ocorre baixa vazão e baixo rendimento deste conjunto.

A Figura 25 exhibe o perfil de vazão diária do experimento.

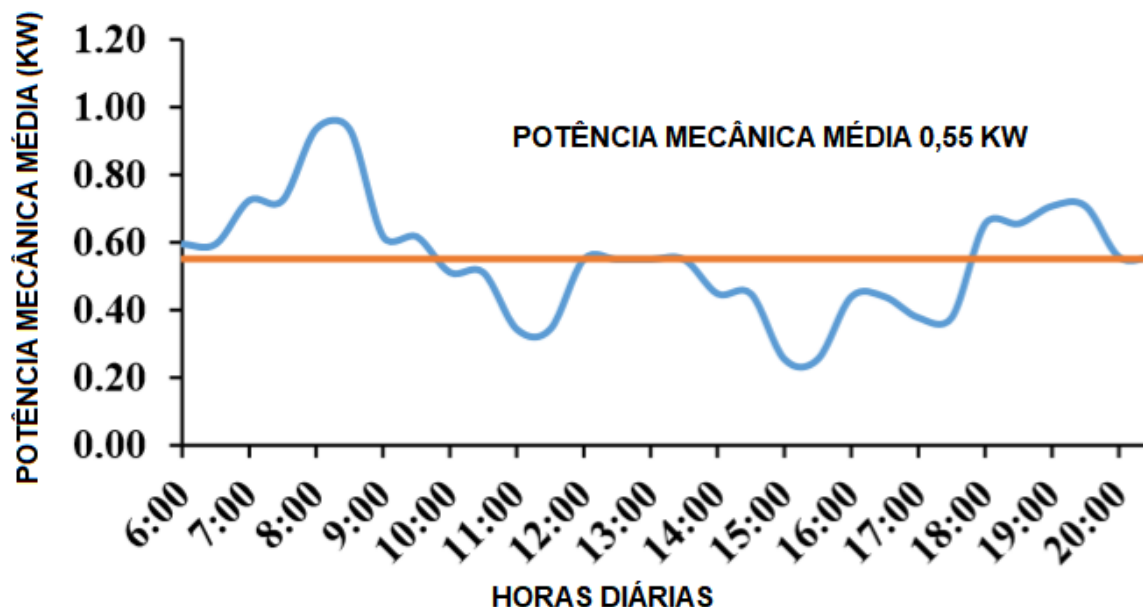


Fonte: Adaptado de Alberizzi *et al.* (2018).

Os parâmetros adimensionais como velocidade específica, diâmetro específico e rendimento foram comparados através de uma análise adimensional, considerando o funcionamento convencional como bombeamento e no formato BFT. Os resultados da simulação apontam para ganhos operacionais devido ao controle de velocidade dos proporcionado pelo inversor de frequência, produção de energia na ordem de 0,55 kW/ano, contabilizando a operação 5.835 horas/ano, totalizando uma geração anual de 6.430 kWh com saída de pressão constante. Ainda, com base no preço médio de energia local de 0,22 €/kWh (R\$ 1,35/kwh), projeta-se uma economia anual de 1.414 € (R\$ 8681,96, 1€=6,14, 13/12/2020).

A Figura 26 expõe a energia mecânica gerada entre 6 e 20 horas.

Figura 26 - Energia gerada entre 6 e 20 horas



Fonte: Adaptado de Alberizzi *et al.* (2018).

2.5.7 Indicadores do sistema de distribuição de água

Indicadores são elementos que sinalizam, comunicam e informam sobre uma questão qualquer. Eles quantificam e simplificam a informação explicitando seu significado e facilitando a comunicação. Indicadores também facilitam a comparação de resultados (MIRANDA, 2002).

Baseado nestes requisitos elencados, destaca-se para este estudo os indicadores de perdas: índice de perdas totais (IPT) e índice de perdas no faturamento (IPF); Consumo Energético Normalizado (CEN) e o Índice de Interrupção no Fornecimento de Água (X110).

2.5.7.1 Indicadores de perdas

O Índice de Perdas Totais (IPT) está relacionado com o Volume Produzido (VP), o Volume de Serviço (VS), o Volume Utilizado (VU) com o número de Ligações Ativas (LA) e o Número de Dias Contabilizados (ND). Este indicador relaciona o volume perdido entre a produção e os volumes consumidos, indexando a expansão do sistema através do número de ligações ativas (MIRANDA, 2002). É dado pela Equação 2:

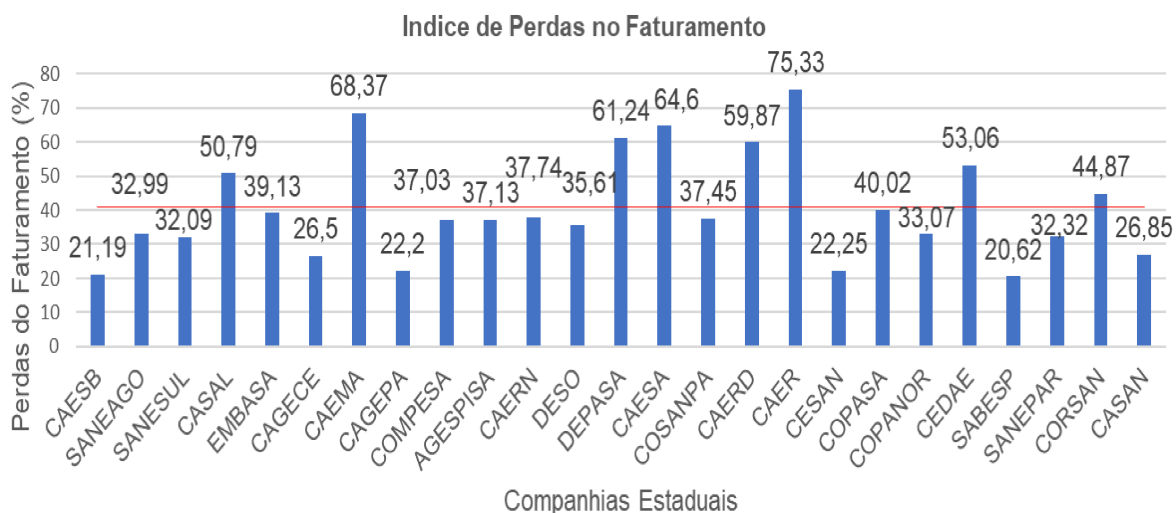
$$IPT \left(\frac{\text{litros}}{\text{ligação}} \cdot \text{dias} \right) = \frac{VP - VS - VU}{LA \times ND} \quad (2)$$

O Índice de Perdas do Faturamento (IPF) expressa a relação entre o Volume Produzido (VP) e o volume faturado (VF). É uma composição que sinaliza a perda a partir do viés financeiro, ou seja, o que se produziu, mas não foi faturado (SNIS, 2013). É dado pela Equação 3:

$$IPF(\%) = \frac{VP - VS - VF}{VP} \times 100 \quad (3)$$

A Figura 27 apresenta o índice de perdas no faturamento para diversas companhias estaduais.

Figura 27 - Índice de perdas no faturamento para diversas companhias estaduais



Fonte: SNIS (2018).

2.5.7.2 Consumo Energético Normalizado (CEN)

O CEN ou Ph5 da *International Water Association* (IWA) mede a eficiência energética normalizada de sistemas de abastecimento de água em um determinado período de referência. Este indicador é normalizado pela altura manométrica, ou seja, capta 4 peculiaridades de sistemas elevatórios cujas alturas manométricas são

diferentes, calculando o rendimento do conjunto motobomba e permitindo a comparação com demais elevatórias (ALEGRE *et al.*, 2006). É dado pela Equação 4:

$$CEN \left(\frac{Kwh}{m^3} \right) = \frac{D_1}{D_3} \quad (4)$$

Onde:

D_1 =Consumo de energia para o bombeamento em kwh;

D_3 =Fator de uniformização em metros x 100.

O fator de uniformização (D_3) é dado pela Equação 5:

$$D_3 = \frac{V \times h}{100} \quad (5)$$

Onde:

V = volume bombeado em um dado intervalo de tempo em m^3 ;

h = altura manométrica da bomba em mca.

2.5.7.3 Índice de interrupção no fornecimento de água

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) define desta forma o índice de interrupções no fornecimento de água:

É a interrupção no fornecimento de água ao usuário pelo sistema de distribuição, por problemas em qualquer das unidades do sistema de abastecimento, desde a produção até a rede de distribuição, que tenham acarretado prejuízos à regularidade do abastecimento de água. Inclui, dentre outras, as interrupções decorrentes de reparos e queda de energia. (SNIS, 2018, p. 41).

O SNIS considera interrupção no fornecimento de água o tempo de indisponibilidade a partir de 6 horas e é dado pelo número de paralisações/ano.

2.5.8 Balanço hídrico

Para que a distribuição de água ocorra de forma eficiente a auditoria ou balanço hídrico é um dos passos fundamentais para o sucesso desta iniciativa. O levantamento e a análise de dados que ocorre no balanço hídrico propicia a execução

de intervenções e a compreensão dos indicadores de performance, sendo estes, os demais passos fundamentais para um programa de controle de perdas de água (U. S. EPA, 2013). A Figura 28 apresenta os três passos para um programa de controle de perdas.

Figura 28 - Três passos para o controle de perdas na distribuição de água

PASSO 1 ELABORAÇÃO DA AUDITORIA/BALANÇO HÍDRICO	PASSO 2 AÇÕES DE INTERVENÇÃO	PASSO 3 ANÁLISE DOS INDICADORES DE PERFORMANCE
<ul style="list-style-type: none"> -Levantamento de informações; -Determinação das vazões de entrada e saída do sistema de distribuição de água baseada em medições e estimativas; -Cálculo dos Indicadores de performance; -Identificação das perdas a partir de medições e estimativas; -Análise de dados inconsistentes; -Considerar ações potenciais sob o ponto de vista econômico e dos seus benefícios; -Seleção das ações apropriadas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Levantamento de outras informações, se necessário; -Avaliação medidores, testes ou programa de substituição. -Detecção e localização de vazamentos; -Conserto ou substituição de tubulações; -Elaboração e ou revisão dos procedimentos operação e manutenção; Mudanças administrativas e ou políticas ; -Nenhuma ação é necessária. 	<ul style="list-style-type: none"> -Os objetivos da intervenção foram alcançados?Se não, porquê? -Onde o sistema precisa de mais informações? -Com que frequência o sistema deve repetir o processo de auditoria, intervenção e análise? -Existe outro indicador de performance que o sistema precisa considerar? -Como o sistema se compara? -Como o sistema pode melhorar seu desempenho?

Fonte: Adaptado de U. S. EPA (2013).

Balanço hídrico é uma ferramenta preconizada pela IWA utilizada para a análise de sistemas de distribuição baseada nos conceitos de perdas reais e perdas aparentes, sendo essencial para a tomada de decisão sobre a estratégia para a gestão de perdas. Existem dois métodos para a elaboração do balanço hídrico: o método *top down* e *bottom up*.

O método *top down* (de cima para baixo) efetua a tabulação de dados a partir de estimativas genéricas, apoiada em dados secundários ou de outros sistemas, portanto, de mais fácil obtenção, de menor custo, porém, de baixa precisão, apresentado no Quadro 5 (TARDELLI FILHO, 2016).

Quadro 5 - Balanço hídrico (*top down*)

Volume produzido ou disponibilizado	Consumos	Consumos autorizados faturados	Consumos medidos faturados (incluindo água exportada)	Águas faturadas
			Consumos não medidos faturados (estimados)	
		Consumos autorizados não faturados	Consumos medidos não faturados (Usos próprios, caminhões pipa)	Águas não faturadas
			Consumos não medidos não faturados (combate a incêndios, suprimentos de água em áreas irregulares)	
	Perdas	Perdas aparentes (comerciais)	Consumos não autorizados (fraudes)	
			Falhas do sistema comercial	
			Submedição hidrômetros	
	Perdas reais (físicas)	Vazamentos nas adutoras e redes de distribuição		
		Vazamentos nos ramais prediais		
		Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios setoriais e aquedutos		

Fonte: Tardelli Filho (2016).

O Quadro 5 apresenta a entrada do volume de água no sistema representado pelo campo volume produzido ou disponibilizado. Na extremidade à direita deste quadro estão os campos água faturada e águas não faturadas, estes dois campos balizam a contabilidade do que foi consumido e o que se perdeu em perdas reais e aparentes. As águas faturadas estão divididas em consumos medidos faturados e os consumos não medidos faturados (estimados). Este último é assim definido por não possuir medição por hidrômetros e sim por uma estimativa baseada em categorias de consumo. No campo águas não faturadas encontram-se os principais componentes que tabulam o volume perdido. No campo perdas visualiza-se as perdas aparentes (fraudes, falhas no sistema comercial e sub medição dos hidrômetros) e as perdas reais (vazamentos em adutoras, ramais e vazamentos e extravasamentos nos reservatórios e aquedutos). De forma concomitante o campo consumos autorizados não faturados, integra os consumos faturados e águas não faturadas e estão representados pelos usos próprios e caminhão-pipa, consumo medido e não faturados e pelos consumos não medidos e não faturados caracterizados pelo uso em combate a incêndios e consumos em ocupações irregulares.

O método *bottom up*, (de baixo para cima) ou modelagem de vazamentos em distritos de medição e controle, conforme (TARDELLI FILHO, 2004):

É o método mais preciso, porém mais trabalhoso e custoso de calcular o balanço hídrico. Este ocorre por meio de medições em campo das vazões mínimas noturnas, às quais, aplicando estimativas de consumos noturnos e correções de pressão, chega-se às perdas reais, e por diferença, às perdas aparentes. pode-se também efetuar exaustivo trabalho de avaliação de sub medição dos hidrômetros instalados e depois de estimar um volume relativo a potenciais fraudes e ou violações nesses medidores realizadas pelos consumidores finais, chegar às perdas aparentes, e por diferença, às perdas reais.

A Figura 29 apresenta a modelagem de vazamentos em distritos de medição e controle pelo método *bottom up*.

Figura 29 - Balanço hídrico *bottom up*

MODELAGEM DE VAZAMENTOS EM DISTRITO DE MEDIÇÃO E CONTROLE (DMC)							
DMC DMC-1							
Entrar com valores nos campos em branco (apagar os dados de exemplo)							
OBS: $PRAI = (18 \cdot ER + 0,8 \cdot NL) \cdot P$ $N1 = \log(L0 / L1) / \log(P0 / P1)$ $L1 = L0 \cdot (P1/P0)^{N1}$				Habitantes	15000	hab	
				Ext rede	65	km	
				Num Lig	5000	ligações totais	
N1 ADOTADO:				1,00	PERFIS DIÁRIOS		
ORDEM	HORÁRIO	Pressões médias	Volumes horários de vazamentos	Perdas Inerentes IWA	Perdas Inevitáveis - IWA	CONSUMO AUTORIZADO + PERDAS APARENTES	Volume de entrada
		mca	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h
1	00:00 - 01:00	30,25	165,99	4,57	6,52	50,57	216,56
2	01:00 - 02:00	31,21	171,27	4,71	6,72	29,26	200,53
3	02:00 - 03:00	31,81	174,80	4,80	6,85	16,50	191,1
4	03:00 - 04:00	32,21	176,76	4,98	6,94	8,99	185,75
5	04:00 - 05:00	32,15	176,43	4,85	6,93	7,60	184,03
6	05:00 - 06:00	31,15	170,96	4,70	6,71	17,76	188,72
7	06:00 - 07:00	29,15	159,97	4,40	6,28	50,55	210,52
8	07:00 - 08:00	27,59	151,40	4,17	5,94	77,70	229,1
9	08:00 - 09:00	25,53	140,13	3,88	5,50	110,48	250,61
10	09:00 - 10:00	23,54	129,22	3,56	5,07	140,16	269,38
11	10:00 - 11:00	22,95	125,93	3,46	4,94	157,75	283,68
12	11:00 - 12:00	22,92	125,81	3,46	4,94	165,33	291,14
13	12:00 - 13:00	23,15	127,04	3,50	4,99	161,56	288,6
14	13:00 - 14:00	22,86	125,47	3,45	4,92	160,16	285,63
15	14:00 - 15:00	23,98	131,60	3,62	5,17	150,14	281,74
16	15:00 - 16:00	24,42	134,03	3,69	5,26	139,03	273,06
17	16:00 - 17:00	25,10	137,73	3,79	5,41	132,20	269,93
18	17:00 - 18:00	25,36	139,20	3,83	5,46	129,15	268,35
19	18:00 - 19:00	25,58	140,41	3,86	5,51	125,88	266,29
20	19:00 - 20:00	26,01	142,73	3,93	5,60	117,94	260,67
21	20:00 - 21:00	26,40	144,90	3,99	5,69	113,03	257,93
22	21:00 - 22:00	27,43	150,53	4,14	5,91	98,81	249,34
23	22:00 - 23:00	28,18	154,65	4,26	6,07	83,87	238,52
24	23:00 - 00:00	29,15	159,99	4,40	6,28	68,87	228,66
PMS - TOTAIS:		27,0	3.557	98	140	2.313	5.870
						anual	
Valor médio das perdas inevitáveis (PI) em m ³ /h:				5,82	844.350		
Vazão mínima noturna - m ³ /h:				184,03			
Consumo mínimo noturno legítimo - % de Q min:				4,13%			
Consumo mínimo noturno legítimo - critério SABESP m ³ /h:				7,60			
Vazão de vazamentos na hora de mínima noturna - m ³ /h:				176,43			
INDICADORES DO DMC							
PERDAS REAIS ANUAIS CORRENTES:				1.298.215	M ³ /ANO		
PERDAS REAIS ANUAIS INEVITÁVEIS _{IWA} :				50.956	M ³ /ANO	IVI	25,5
PERDAS REAIS EM L / LIG / DIA:				711	L/LIG/DIA	% do VE	60,59%
PERDAS REAIS EM m ³ /h - km rede:				2,280	(m ³ /h)/km rede	Dens ligações lig/km rede	76,92

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 29, o balanço hídrico *bottom up* propõe uma estimativa de perdas reais e por consequência um quantitativo para perdas aparentes. Esta modelagem consiste na coleta de dados horários de vazão e pressão média, ao longo de 24 horas. Outros dados de entrada estão situados no campo superior da Figura 29: habitantes, extensão da rede e número de ligações. O campo superior à esquerda pode-se visualizar as equações determinantes, para a obtenção dos resultados fixados no campo inferior da figura, como as perdas reais inevitáveis (LAMBERT; TAYLOR, 2010), as perdas reais correntes em m^3/ano , está definida como o somatório de todos os tipos de perdas físicas no período de 12 meses. Ainda nesta modelagem visualiza-se o índice de perdas por ligação em L/lig. dia para as perdas reais e valores diários, como a vazão mínima noturna, o volume de vazamentos e as perdas inerentes (SANTOS, 2013). No canto inferior direito da figura é possível verificar o percentual do volume de entrada comprometido com as perdas físicas (%VE) e o índice de vazamento da infraestrutura (IVI). O IVI relaciona a infraestrutura da rede de distribuição através de um coeficiente obtido pela relação do volume de entrada e o volume consumido, quanto mais próximo de um, melhor será a performance do abastecimento (ALEGRE *et al.*, 2006).

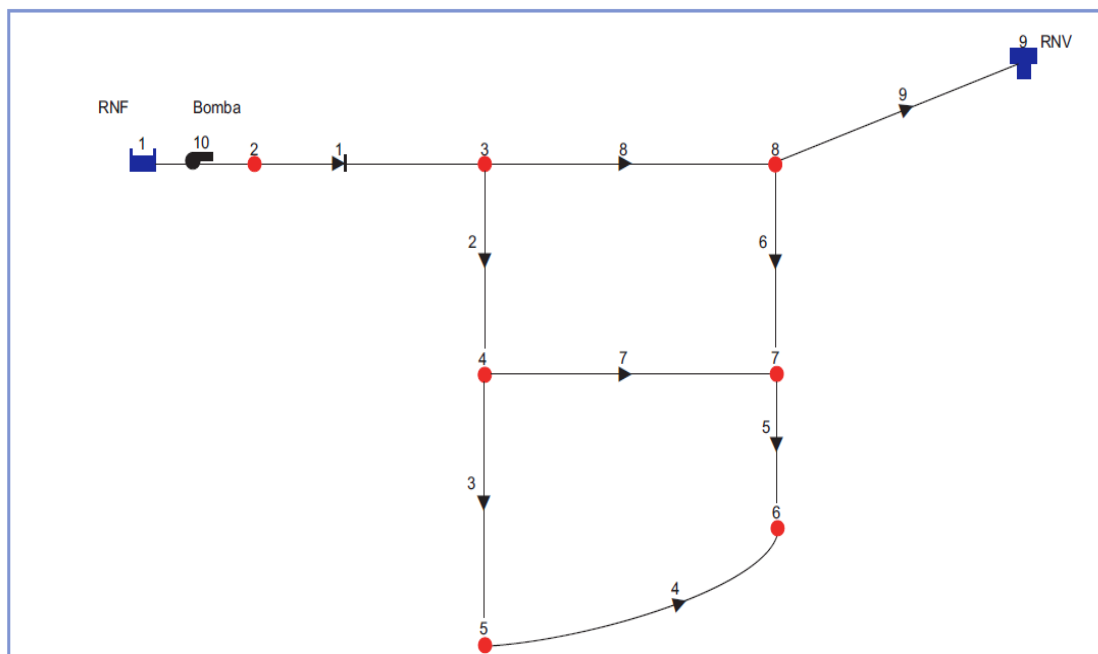
2.6 SOBRE O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA EPANET

Conforme Rede Lenhs (2010):

O EPANET é um programa computacional que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada. Uma rede é constituída por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. O EPANET permite obter os valores da vazão em cada tubulação, da pressão em cada nó (ponto de união entre os trechos), da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos intervalos de cálculo. Adicionalmente, além de espécies químicas, o modelo simula o cálculo da idade da água e o rastreamento da origem de água em qualquer ponto da rede. O EPANET foi concebido para ser uma ferramenta de apoio a análise de sistemas de distribuição, melhorando o conhecimento sobre o transporte e o destino dos constituintes da água para consumo humano. Pode ser utilizado em diversas situações, em que seja necessário efetuar simulações de sistemas pressurizados de distribuição. O estabelecimento de cenários de projeto e de alternativas de otimização de sistemas existentes, a calibração de modelos hidráulicos, a análise do decaimento do cloro residual e a avaliação dos consumos são alguns exemplos de aplicação do programa.

A Figura 30 apresenta uma modelagem realizada no ambiente EPANET.

Figura 30 - Simulação hidráulica EPANET



Fonte: Rede Lenhs (2010).

Na Figura 30 é possível visualizar os componentes principais de uma modelagem hidráulica via EPANET. Os pontos em vermelho representam os nós, objetos que conectam trechos de tubulações. Cada nó possui atributos como cota topográfica, categoria de consumo, consumo-base, perfil e padrão de consumo. Os seguimentos de retas entre dois nós e com numeração em preto são os trechos de rede, estes componentes carregam propriedades das tubulações, como diâmetro, comprimento, rugosidade, velocidade e a vazão em cada trecho. Os objetos em azul com a numeração 1 e 9 representam os Reservatórios de Nível Fixo (RNF) e o Reservatório de Nível Variável (RNV). O RNF representa uma reservação que não varia o seu nível, geralmente representa uma barragem, um rio ou outro componente que represente a entrada do sistema que se deseja modelar. O RNV representa o reservatório que se encontra operando dentro do sistema em análise, por isso possui em suas propriedades níveis mínimos e máximos que variam de acordo com o balanço de entrada e saída de água no qual está operando. O componente número 10 da Figura 30 é a bomba do sistema em modelagem. Este componente carrega as propriedades do conjunto motor bomba deste sistema como a curva pressão x vazão, curva de rendimento, potência, percentual de variação de velocidade do conjunto, entre outras propriedades. As setas que se visualiza nos trechos de tubulações indicam o sentido de fluxo da distribuição de água.

Um bom exemplo de aplicação do *software* EPANET encontra-se no estudo de Salvino (2010), em que o autor busca uma solução de custo mínimo para redes malhadas, ramificadas e ligações já existentes, além de um controle operacional ao longo da vida útil do projeto. O método de otimização estudado utilizou técnicas de simulação dinâmica juntamente com conceitos de engenharia econômica. A junção de técnicas e conceitos proporcionou a criação de um algoritmo dinâmico iterativo de convergência e controle de variáveis de pressão e velocidade no interior das tubulações, visando obter um custo mínimo para estas ações. Para se determinar as variáveis de estado do sistema, a cada iteração foi incorporado um algoritmo ao EPANET. O método foi testado em quatro redes com diversas condições de contorno. Os resultados apontam que este método pode ser realizado em qualquer porte de rede, não havendo restrições quanto a sua aplicação. Após o dimensionamento da rede, é apresentado um controle operacional que minimize pressões e demanda da população atual e, considera o aumento gradativo ao longo da vida útil do projeto, o que torna esta modelagem mais realista para os dimensionamentos existentes.

2.6.1 Propriedade dos materiais e o *software* CES EduPack 2005

O *software* CES (*Cambridge Engineering Selector*) *EduPack* 2005 é voltado para o ensino de ciência dos materiais, da engenharia de materiais, a seleção de materiais e do processamento de materiais. O *software* permite a análise de propriedades de materiais e processos como: composição, densidade, preço, propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas, propriedades ecológicas como a pegada de carbono e pegada hídrica; entre outras propriedades (SILVA, 2011). A Figura 14 apresenta aba que permite obter informações sobre as propriedades dos materiais no *software* CES *EduPack* 2005.

Figura 31 - Informações sobre materiais CES EduPack 2005

The screenshot shows the CES EduPack 2005 software interface. The title bar reads "CES EduPack 2005 - [MaterialUniverse\Metals and alloys\Ferrous]". The menu bar includes File, Edit, View, Select, Tools, Window, and Help. The toolbar contains icons for Browse, Select, Search, Print, Search Web, CES InDepth, and Ajuda. The main window is titled "High carbon steel" and displays the following properties:

Mechanical properties			
Young's Modulus	200	- 215	GPa
Elastic Limit	400	- 1155	MPa
Tensile Strength	550	- 1640	MPa
Elongation	7	- 30	%
Hardness - Vickers	160	- 650	HV
Endurance Limit	* 281	- 606	MPa
Fracture Toughness	27	- 92	MPa.m ^{1/2}

Thermal properties			
Thermal conductor or insulator?	Good conductor		
Thermal Conductivity	47	- 53	W/m.K
Thermal Expansion	11	- 13,5	µstrain/°C
Specific Heat	440	- 510	J/kg.K
Melting Point	1289	- 1478	°C
Maximum Service Temperature	* 200	- 350	°C

Electrical properties			
Electrical conductor or insulator?	Good conductor		

Optical properties			
Transparency	Opaque		

Eco properties			
Production Energy	24.3	- 26.9	MJ/kg
CO2 creation	2.06	- 2.28	kg/kg
Recycle	✓		

Supporting information
Typical uses
 Cutting tools; high performance bearings, cranks and shafts, springs.

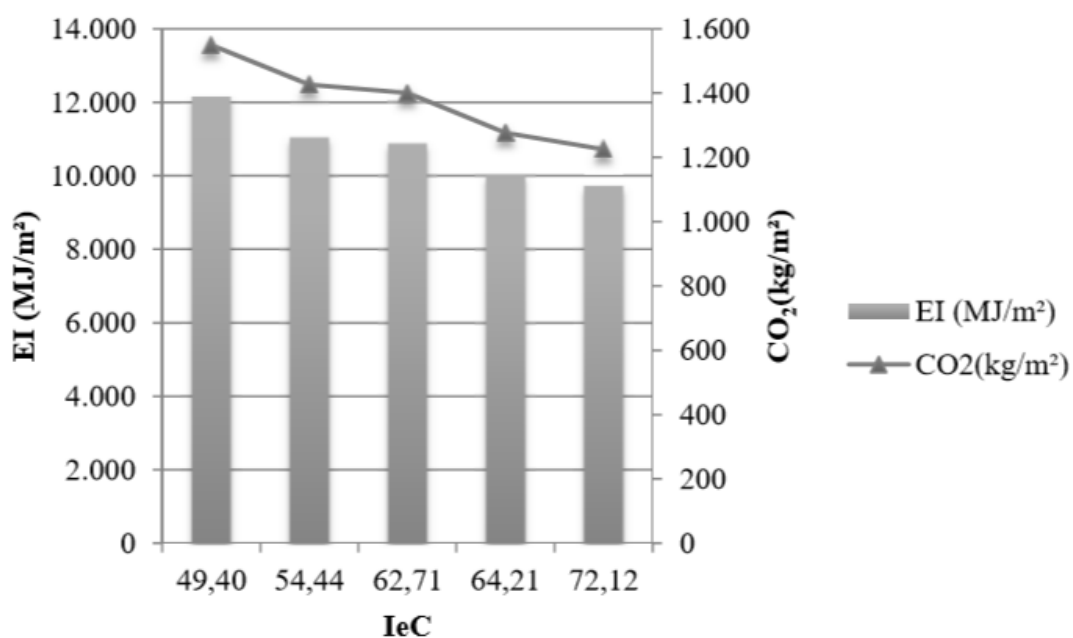
Fonte: Silva (2011).

A utilização deste *software* no estudo de Postay (2015) exemplifica o seu uso em trabalhos de pesquisa, relacionado a propriedades dos materiais. A pesquisa relata a grande utilização de matérias-primas e energia pelo setor da construção civil, especificamente no segmento residencial, desde a produção dos materiais e componentes até a energia utilizada na fase de uso das edificações. O estudo menciona o crescimento das habitações de interesse social visualizando nisso, ações para economia e otimização destas construções desde o projeto até a construção. O estudo afirma que o projeto tem a função de indutor da racionalização da construção em si e que estabelece uma relação de influência direta entre escolha de materiais, decisões quanto à arquitetura e o consumo de materiais e impactos relacionados. O estudo procurou investigar o efeito da compacidade do projeto através do Índice de Compacidade (Ic) em diversos sistemas construtivos utilizados em empreendimentos de habitações de interesse social na energia incorporada (EI) e nas emissões de dióxido de carbono (CO₂). A pesquisa analisou cinco projetos de edifícios, considerando três sistemas construtivos (alvenaria estrutural com blocos

cerâmicos, alvenaria estrutural com blocos de concreto e paredes de concreto). A condução da pesquisa foi realizada em três etapas: quantificação dos materiais dos projetos, análise da energia incorporada e das emissões de CO₂ dos materiais de construção, através de dados publicados na literatura e em dados do *software* CES *EduPack* 2005 e a verificação entre a compactidade, energia incorporada e emissões de dióxido de CO₂.

A Figura 32 apresenta a verificação mencionada para projetos de alvenaria com blocos cerâmicos.

Figura 32 - Correlação entre a compactidade, energia incorporada e emissões de CO₂ em projetos de alvenaria com blocos cerâmicos



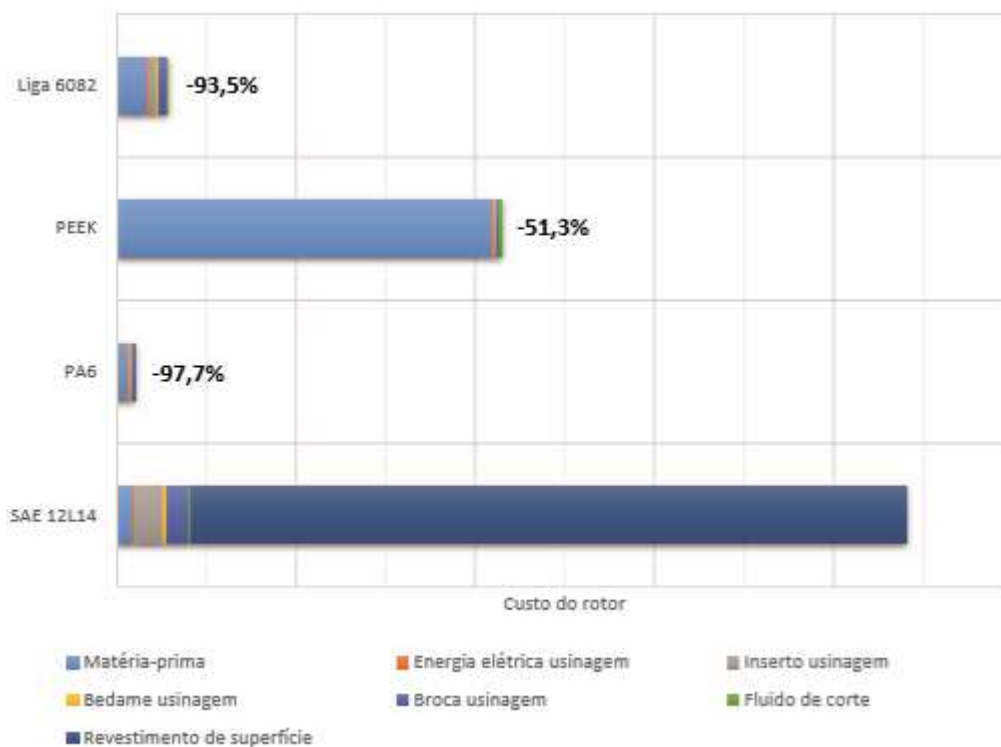
Fonte: Postay (2015).

Os resultados quanto ao consumo de materiais apontam uma diferença em torno de 20 % em massa (kg) entre os projetos com maior e menor IeC. A análise da energia incorporada e as emissões de CO₂ apresentaram uma diferença variando de 16 a 20 % entre os projetos de maior e menor IeC (POSTAY, 2015).

Souza (2019) realizou uma avaliação energética, ambiental e econômica de quatro materiais diferentes utilizados na fabricação de rotores para Bombas de Cavidade Progressiva (BCP), componente utilizado em máquinas dosadoras da indústria tintométrica, por meio de ferramentas de gestão ambiental, Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e P+L com o auxílio do *software* CES *EduPack*. Os quatro materiais avaliados foram: aço revestido de cromo duro, PA6 (poliamida 6),

PEEEK (poli-eter-eter-cetona) e alumínio Liga 6082. Durante a fabricação dos rotores foram contabilizados os insumos e a utilização de energia elétrica. Para os testes experimentais de desempenho dos rotores fabricados foi construído um equipamento para que fosse levantada a curva característica de cada BCP com seu respectivo rotor. Neste experimento se analisou o consumo de energia elétrica, o desgaste dos rotores e estatores e a eficiência energética de cada bomba. Os resultados apontam para o rotor de alumínio Liga 6082 como a melhor eficiência energética, o rotor de PA6 teve o pior resultado, cerca de 22,5 % de acréscimo de energia elétrica. No entanto, o PA6 apresentou o melhor desempenho ambiental e energético na fabricação. Todos os materiais apresentaram melhorias econômicas destacando os rotores de alumínio Liga 6082 e PA6 com redução de custo acima de 90%. A Figura 33 explicita a relação comparativa dos custos de cada rotor.

Figura 33 - Relação de custos dos rotores



Fonte: Souza (2019).

Na Figura 33 observa-se que o maior custo ficou representado pelo rotor em aço revestido de cromo duro, tendo como principal componente, a etapa do revestimento de superfície. O rotor em PEEK apresentou o segundo maior custo, este por sua vez, foi influenciado pelo valor da matéria-prima.

3 METODOLOGIA

A metodologia consiste na execução de três macro etapas: construção do modelo de simulação hidráulica, via *software* EPANET, desenvolvimento da ferramenta socioambiental (P+L) para distribuição de água e quantificação da pegada hídrica e a energia incorporada no abastecimento de água.

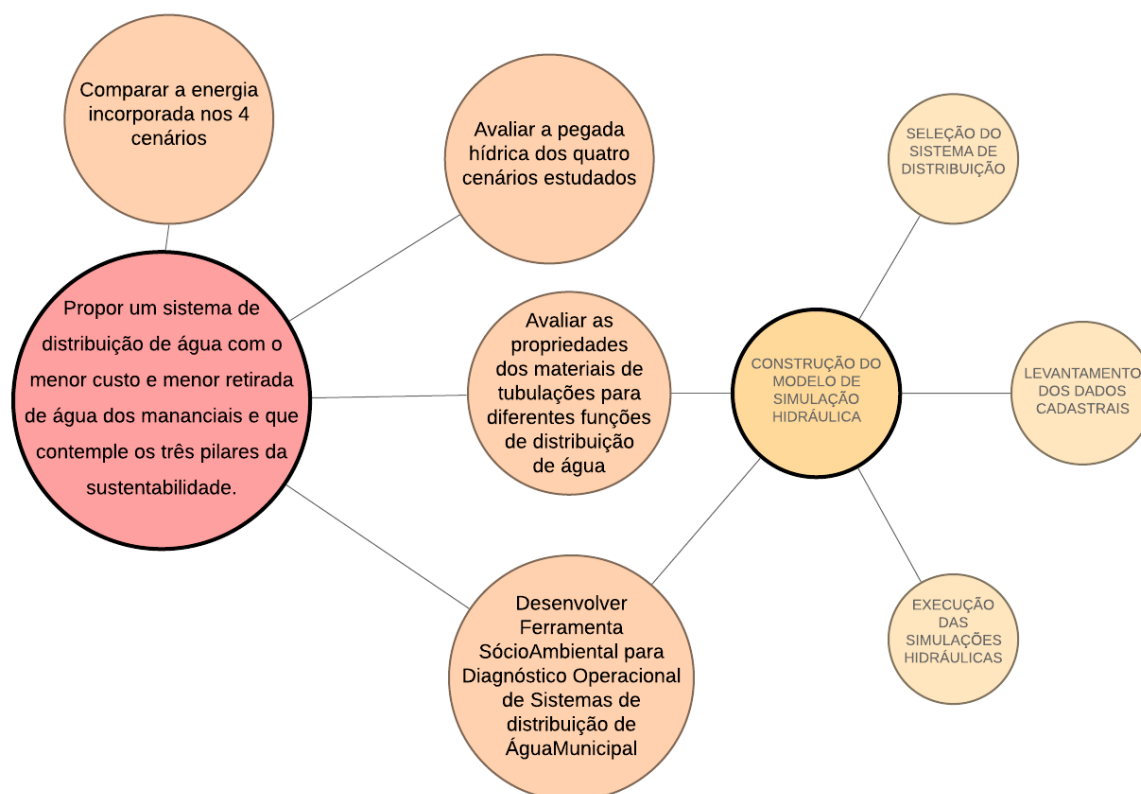
A construção do modelo de simulação hidráulica forma a base de dados necessárias para a implantação de um sistema de distribuição sustentável baseado nos três aspectos da sustentabilidade (social, ambiental e econômico) sinalizando menos retirada de água do manancial e um custo menor.

O desenvolvimento da ferramenta socioambiental consistiu numa adaptação do diagrama do *triple bottom line* da sustentabilidade (BARBOSA, 2007) e que considera VP, VF e o Balanço Energético (BE) definido pela diferença entre o consumo energético e a geração de energia localizada, quando existir. VP, VF e BE traduzem os três aspectos da sustentabilidade para a distribuição de água, o volume produzido dialoga diretamente com o ambiental e o econômico porque essa grandeza aponta o quanto significativo é o uso de recursos naturais e proporcionalmente a VP, o montante de recursos econômicos empregados em todo este sistema de produção. VF está associado ao aspecto social de forma direta, pois está ligado ao número de pessoas que são atendidas pela distribuição de água e no aspecto econômico o quanto isto representa em termos de arrecadação e capacidade de investimento. BE está conectado diretamente ao aspecto econômico por causa do montante de recursos financeiros empregados e ou economizados tanto para o consumo, como para a geração de energia, além deste aspecto, a interface com o meio ambiente está vinculada devido ao uso de Recursos Energéticos Não Renováveis (RECURSOS NATURAIS) inevitavelmente associados ao uso de energia.

A quantificação da pegada hídrica e a energia incorporada compõem a última etapa da metodologia consistindo na contabilização do uso de água e energia ao longo do processo de distribuição de água, bem como estes dados estendidos a potencial influência das diferentes matérias-primas utilizadas no abastecimento de água, seja no tratamento da água, seja nos materiais que compõem as tubulações do sistema de distribuição. Os valores obtidos foram obtidos dos bancos de dados do *software* CES *EduPack* 2005 e dos dados operacionais disponíveis da distribuição de água. As

etapas projetadas na metodologia, bem como suas relações com os objetivos desta encontram-se na Figura 34.

Figura 34 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SÃO LEOPOLDO

O sistema de distribuição de água do município de São Leopoldo é composto por uma malha de 773 km de rede com tubulações de diâmetros a partir de 32 mm até 1000 mm. Os tubos de distribuição são compostos basicamente pelos seguintes materiais: ferro fundido, PVC, PEAD e CA (cimento amianto). O número de ligações totalizava 64742 em março/2020. A categoria de consumidores está dividida em residencial (94,2%), comercial (5,1%), público (0,3%) e industrial (0,4%). O volume produzido em 2019 foi de 24.771.959,55 m³. O número de reservatórios é de 39 unidades totalizando uma capacidade de reserva de 25340 m³. O conjunto de elevatórias soma 25 unidades totalizando 95 conjuntos de moto bombas. A potência instalada para distribuição é de 2382,7 kW e o consumo energético em torno de

222.507 kWh/mês. A potência instalada de captação de água bruta é de 1103 kW e o consumo energético de aproximadamente 514.898 kWh/mês.

3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

A construção deste modelo compreende a seleção do sistema de distribuição de água, levantamento de dados cadastrais (comercial e técnico) e a execução da simulação hidráulica.

3.2.1 Seleção do setor de distribuição

Para a seleção do setor foi avaliado, de forma qualitativa, setores de distribuição que pudessem conter elementos básicos de distribuição de água como reservatórios, estações de bombeamento, redes de distribuição com materiais e diâmetros diferentes, presença de válvulas de controle (bloqueio, ventosas, alívio e reguladoras de pressão), potencial de aproveitamento energético e diversidade de medidores de vazão. A Figura 35 elenca de forma esquemática o encadeamento das etapas para construção do modelo de simulação hidráulica.

Figura 35 - Construção do modelo de simulação hidráulica



Fonte: Elaborada pelo autor.

O setor escolhido pertence à rede de distribuição do reservatório elevado Feitoria Cohab no Setor de Distribuição 15 (SD15). O SD15 possui dois reservatórios sendo um apoiado com capacidade de reservação de 1350 m³ e um reservatório elevado de 150 m³ de armazenamento. Possui dois conjuntos de motobombas com

40 cv de potência cada uma e um turbogerador de 5,5 kW. A rede de distribuição possui 1230 ramais de ligação e uma extensão de 428 m em ferro fundido e 7250 em PVC totalizando 7678 metros de tubulação. A categoria de consumo predominante é a residencial com 1221 ligações e a comercial apenas 9 ligações. O setor existente ainda conta com uma válvula reguladora de pressão e uma válvula de alívio⁷. O sistema de acionamento elétrico das motobombas é por chave de partida suave *soft start* e o acionamento do turbogerador utiliza inversor de frequência. A Figura 36 apresenta a imagem georreferenciada do SD15.

⁷ Válvula instalada em redes de distribuição para expulsar ou admitir ar no interior das tubulações, evitando rupturas por sobre ou sub pressão.

Figura 36 - Setor de distribuição SD 15



Fonte: GEOSEMAE (2017).

A Figura 36 apresenta o SD 15 com suas redes e reservatórios georreferenciados através do sistema SIG corporativo da autarquia (GEOSEMAE), onde se verificam as redes ao entorno das habitações simbolizadas em diferentes

cores de acordo com o diâmetro e o tipo de material. As redes em vermelho são de diâmetro 50 mm e material PVC, a rede em azul, 75 mm em PVC; em roxo, 200 mm em PVC e FºFº; e as redes sinalizadas em laranja, PVC e FºFº, 150 mm.

3.2.2 Levantamento de dados cadastrais

Nesta etapa foi realizado o levantamento de dados necessários para a simulação hidráulica.

O cadastro comercial fornece dados de consumo registrados, através da leitura dos micros medidores de vazão (hidrômetro), coordenada geográfica das unidades de consumo, volumes estimados, logradouros sem hidrômetros, e ocupações irregulares. Informações sobre o parque de hidrômetros, como a idade média desses medidores, o consumo total medido, o tempo de instalação, marca e formas construtivas dos hidrômetros também serão coletadas neste cadastro. O cadastro comercial forneceu as informações base para a estimativa de perda de volume faturado na ferramenta socioambiental para distribuição de água. Os dados de consumo dos ramais de ligação foram extraídos do relatório de consumo do Sistema Comercial de Informações (SCI). A Figura 37 apresenta a página 210 deste relatório.

Figura 37 - Relatório de consumo

SEMAB São Leopoldo		Sistema Comercial Integrado - SCI		RELATÓRIO DE CONSUMO m ³		Data: exc 25/07/2020	
						Hora: 08:22	
						Página: 210	
						Relatório: SCI8735	
Regional : 004 - SÃO LEOPOLDO		Filial: 001 - SÃO LEOPOLDO		Distr. Oper.: 1000 - SÃO LEOPOLDO			
Categoria: Todas		Referência: 04/2020		Grupo de Faturamento: 5			
Cons. Ini.: 0		Cons. Final: 999999		Setor: Todos		Sit. Lig.: ATIVA	
Sit. Edif.: Todas		Tp. Unidade: Todos		Tp. Area Imovel: Todos		Tp. Tarifa: Todos	
Matrícula	Cliente	Endereço	Hidrômetro	Categoria	Tp. Unid.	Cons. Real (m ³)	Cons. Fat. (m ³)
0067043-0		PE ALEIXO F.DA SILVA, 168, FEITORIA \ JARDIM CORA	55709	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0067171-1		JUVENAL LOPES, 101, FEITORIA \ SELLER	Y17F574052	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0067289-0		SAO PEDRO DO SUL, 193, FEITORIA \ INDEPENDENCIA	405653	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0067441-9		BERNARDO A GEORG, 200, FEITORIA \ JD DAS ACACIAS	55822	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0067480-0		ANT M DE ALCANTARA, 166, FEITORIA \ NOVA	A99N725599	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0067493-1		FREDERICO MAYER, 400, FEITORIA \ SAO GERALDO	A99S404649	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0067707-8		EQUADOR, 0, FEITORIA \ COHAB	A05L478559	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0067797-3		CARLOS BIER, 2509, FEITORIA \ SAO GERALDO	A96S404781	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0067931-3		FREDERICO MAYER, 1404, FEITORIA \ SAO GERALDO	A99S405607	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0068489-9		NERO FARIA LEAL, 386, FEITORIA \ NOVA	A15G9094	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0068772-3		PROF CLAUSS SAENGER, 121, FEITORIA \ SELLER	Y20F227595	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0068874-6		TUVALU, 740, FEITORIA \ SELLER	A06L317951	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0068899-1		NESTOR LAURI RECK, 123, FEITORIA \ SELLER	A15G9523	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0069060-0		FREDERICO MAYER, 1896, FEITORIA \ SAO GERALDO	A06L318187	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0069096-1		WALTER SANDER, 386, FEITORIA \ JD DAS ACACIAS	403638	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0069175-5		FREI A DA PIEDADE, 86, FEITORIA \ NOVA	Y03X44749	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0069566-1		JOAO CARLOS BECKER, 355, FEITORIA \ SELLER	Y20F223197	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8
0069924-1		FREDERICO MAYER, 674, FEITORIA \ SAO GERALDO	A02S53626	RESIDENCIAL	NORMAL	8	8

Página 210 de 519

Fonte: SCI SEMAB (2018).

A Figura 37 apresenta os dados de volumes consumidos em cada unidade do grupo de faturamento 5, ao qual pertence o setor de distribuição SD15. Dados gerais de identificação do relatório encontram-se na parte superior como referência (período de medição), grupo de faturamento⁸, entre outros dados. Abaixo dos dados de identificação do relatório encontram-se os dados de cada ligação domiciliar: número de matrícula, cliente, endereço, número do hidrômetro, categoria, tipo de unidade, consumo real e consumo faturado. Cabe salientar ainda a diferença entre consumo real e consumo faturado. Consumo real é o valor medido nos hidrômetros e o consumo faturado, a quantidade de água consumida estimada, pois não foi possível a leitura do volume utilizado. Quando não é possível a medição de consumo, o volume faturado contabiliza a média de consumo dos meses anteriores. O consumo real é inserido na simulação hidráulica através da propriedade do nó chamada consumo base⁹. O valor

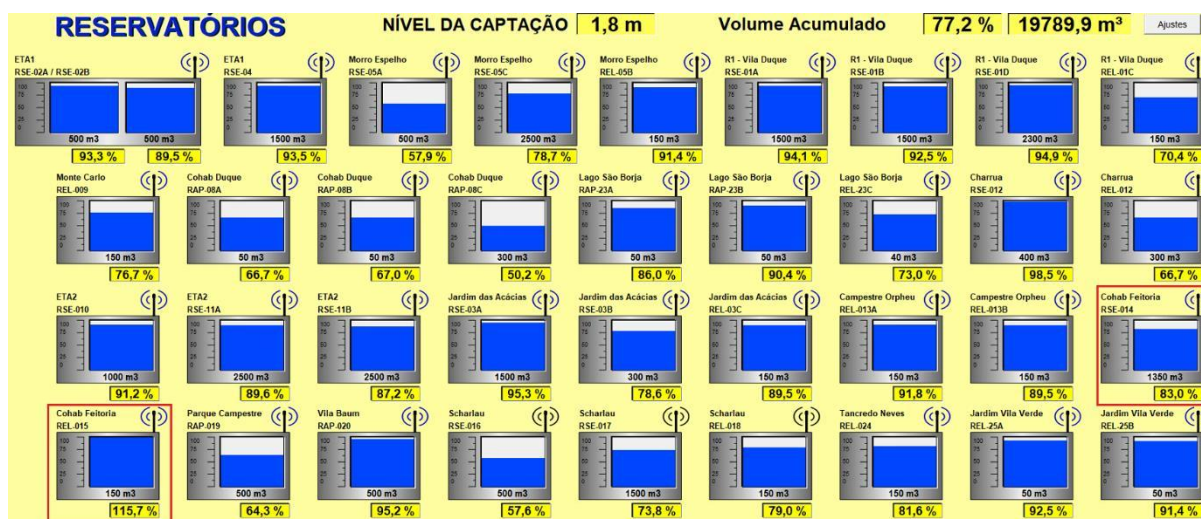
⁸ Divisão da cidade em grupos com o intuito de otimizar a coleta dos dados de volume consumido.

⁹ Consumo médio do ramal domiciliar para um determinado período em l/s.

consumido real ao longo de um mês ($m^3/mês$) é transformado em l/s quando inserido como consumo base.

O cadastro técnico fornece dados operacionais do sistema de distribuição de água. As informações deste cadastro estão armazenadas em três *softwares* distintos. Dados relativos aos reservatórios como cota de fundo, lâmina d'água, volume de armazenamento, quantidade de reservatórios e forma construtiva destes, regime de operação, vazão distribuída, pressão, consumo e geração de energia, entre outros, são obtidos através do Sistema de Supervisão e Controle (SCADA) da autarquia. A Figura 38 apresenta a tela de reservação do SCADA para o sistema de distribuição do município de São Leopoldo.

Figura 38 - Tela de reservatórios SCADA SEMAE



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 38 é visualizado a tela de níveis dos reservatórios da cidade com seus percentuais de reservação em tempo real com possibilidade de acesso ao histórico operacional. Os dois reservatórios em destaque estão inseridos como elementos utilizados na simulação hidráulica para o SD 15. Informações sobre as estações de bombeamento como potência instalada, curva pressão x vazão, rendimento, tipo de acionamento elétrico são extraídos do software de programação e gestão da manutenção - Gestor SM. As demais informações necessárias para a simulação hidráulica como o material e o diâmetro das tubulações, número e tipos de válvulas existentes, cotas topográficas e desníveis geométricos são obtidos do sistema GEOSEMAE.

3.2.3 Execução da simulação hidráulica

A execução da simulação hidráulica foi realizada por meio de diversos cenários para o sistema de distribuição selecionado:

- a) **cenário 1:** foi criado para validar os dados alimentados à simulação, ou seja, os resultados apresentados pelo cenário 1 devem manter proximidade com os dados do sistema real, desde a variação dos níveis dos reservatórios, períodos de operação dos bombeamentos, pressões e vazões de trabalho na rede de distribuição, bem como o volume consumido do setor de distribuição. Os cenários seguintes tiveram formatos que pudessem modificar a estrutura atual de distribuição de água buscando a redução do volume produzido e o consumo energético e no sentido de aumentar o valor faturado deste sistema. Nestes cenários foram avaliados o comportamento do sistema com a redução de reservatórios, a substituição de bombeamentos e redes, alterações da pressão de trabalho, a geração de energia, a incidência de vazamentos, a redução do consumo energético, entre outros. Baseado nestas condicionantes, a simulação conforme ocorre a operação atualmente (cenário real) é representada pelo cenário 1.
- b) **cenário 2:** avaliou a operação a partir da inserção de dois reservatórios, conforme ocorre em sistemas convencionais de abastecimento, ou seja, com um reservatório apoiado e outro reservatório elevado.
- c) **cenário 3:** teve como base o cenário 1, porém com ações para reduzir as perdas aparentes.
- d) **cenário 4:** simulou também sob a configuração do cenário 1 e com as melhorias projetadas quanto às perdas aparentes no cenário 3 acrescentando o controle de pressão através da instalação de VRP em diversos pontos da rede de distribuição.

A construção dos 4 cenários obedeceu a lógica do programa de produção mais limpa através das proposições elencadas nos níveis 1 e 2 do diagrama P+L (Figura 4) considerando a redução na fonte, a modificação do processo e da tecnologia, estas pertencentes ao nível 1, perpassando ao nível 2 com a reciclagem interna por meio do aproveitamento energético realizado pelo turbogerador. A Figura 39 ilustra a execução das simulações através dos quatro cenários mencionados.

Figura 39 - Execução das simulações em quatro cenários

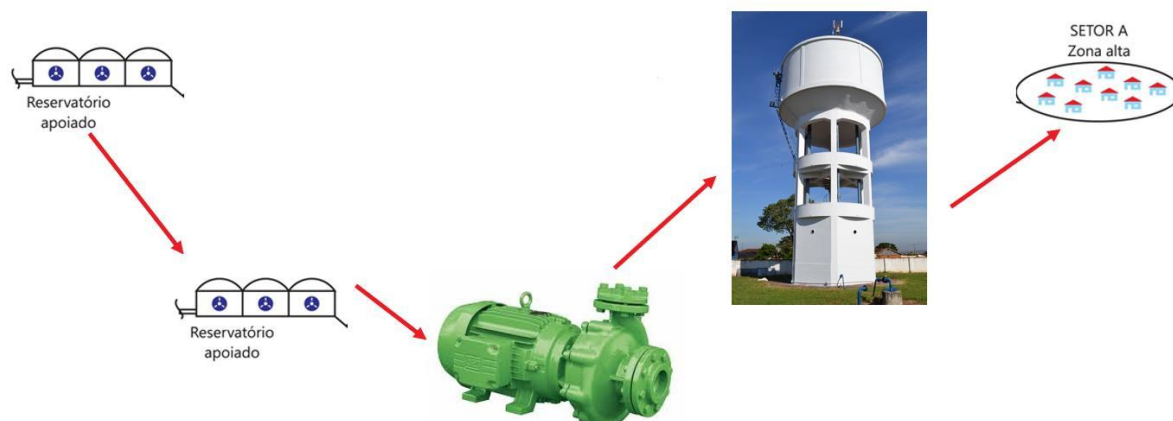


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3.1 Cenário 1- Sistema convencional

O cenário 1 de simulação avalia a operação convencional de sistemas de distribuição, isto é, um sistema composto de reservatório apoiado, moto bomba, reservatório elevado e setor de distribuição. A Figura 40 exemplifica os componentes da operação convencional de um sistema de distribuição de água.

Figura 40 - Cenário convencional

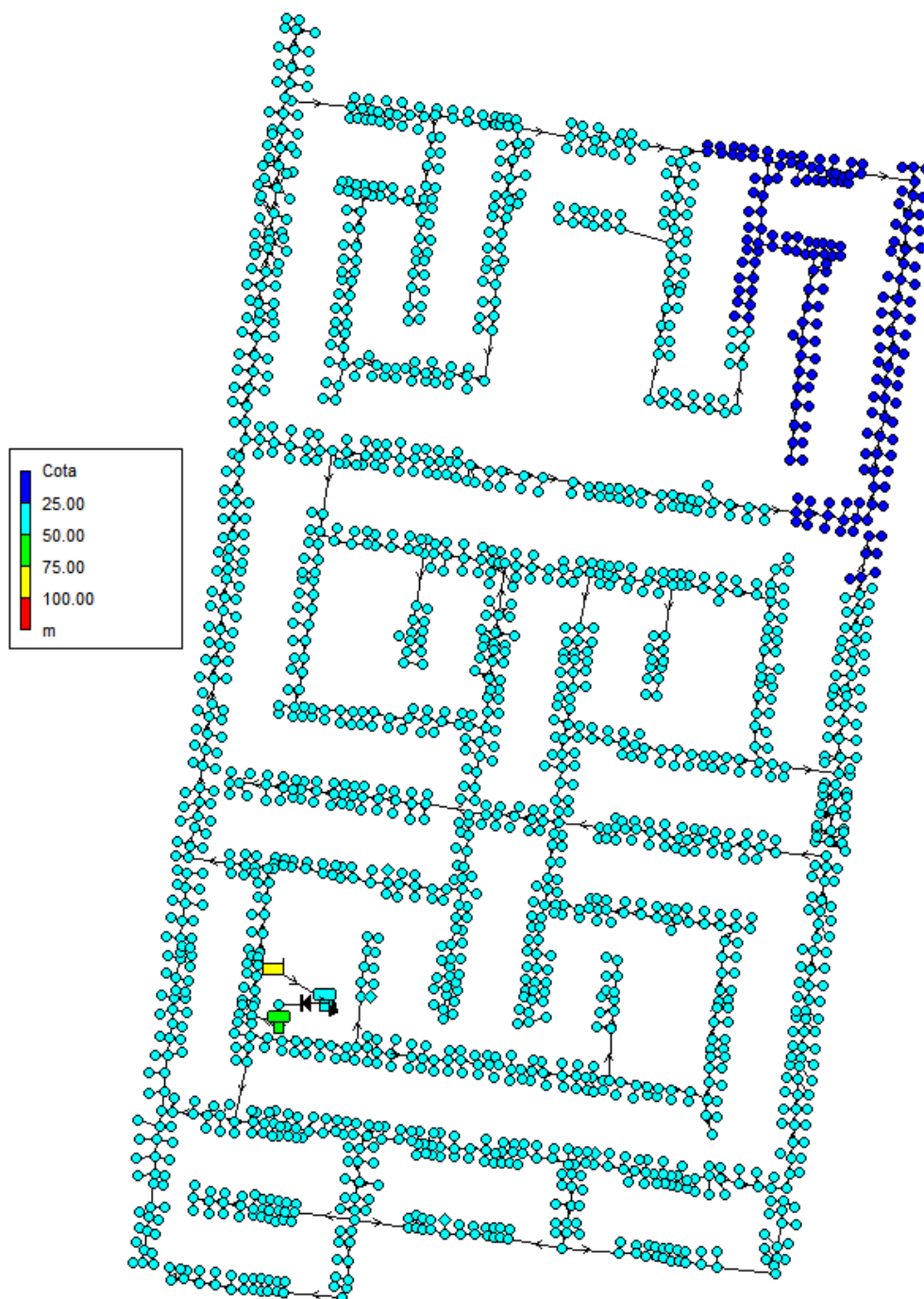


Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 40 o cenário 1 apresenta a forma convencional de operação para o abastecimento na zona alta de distribuição composta da esquerda para a direita de reservatórios apoiados, motobomba constituindo uma Elevatória de Água Tratada (EAT), reservatório elevado e um setor de distribuição da zona alta (Setor A).

A construção do modelo de simulação hidráulica para o cenário 1 serve de base para os próximos cenários executados, visto que a malha de distribuição e os perfis de consumo são os mesmos para todos os cenários. A inserção de dados no modelo de simulação hidráulica compreende inicialmente a inserção dos elementos físicos do setor de distribuição (tubulações, reservatórios e bombeamentos). Após esta etapa as propriedades destes elementos são inseridas através dos nós e dos trechos que compõem o SD 15. O *software* EPANET considera como elementos construtivos do modelo nós e trechos. A Figura 41 apresenta o modelo hidráulico com a inserção dos dados de cota topográfica.

Figura 41 - Construção do modelo de simulação hidráulica



Fonte: Elaborada pelo autor.

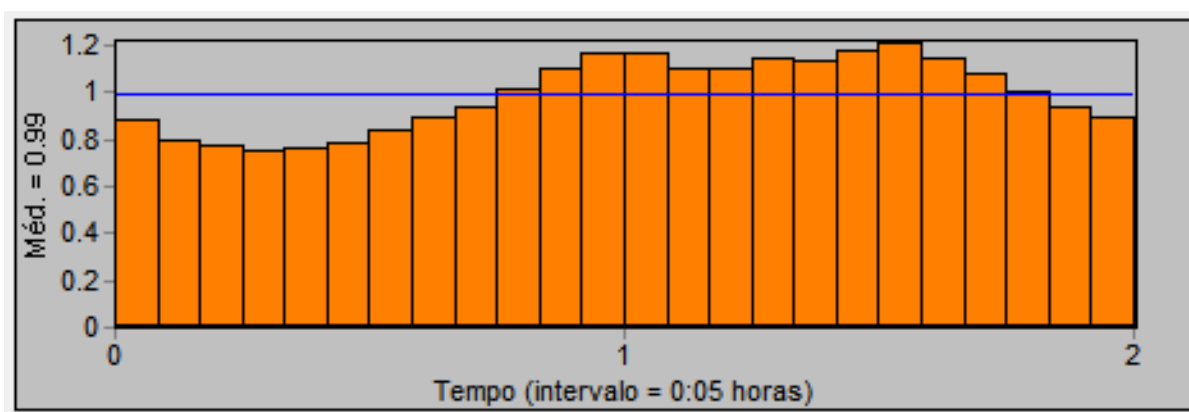
Na Figura 41 pode-se visualizar os elementos que constituem o SD 15 inseridos no modelo de simulação hidráulica:

- a) em amarelo verifica-se o Reservatório de Nível Fixo (RNV), ponto de partida das simulações, compreende um elemento de entrada de água no sistema a ser simulado e que na maioria das vezes não existe fisicamente;

- b) Na cor verde tem-se o reservatório elevado. Da mesma forma gráfica do reservatório anterior;
 - c) na cor ciano localiza-se o reservatório apoiado;
 - d) os demais nós do modelo, representam as conexões entre os trechos de tubulações e os pontos, onde situam-se os consumos dos ramais domiciliares.
- A legenda para a cota topográfica está representada no retângulo à esquerda.

A inserção do perfil de consumo do setor tem como base o histórico de vazão distribuída armazenado no *software* SCADA para o SD15. A Figura 42 mostra o perfil de consumo para o SD15 ao longo de 24 horas.

Figura 42 - Perfil de consumo diário SD15



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 42 ocorrem variações de consumo ao longo do dia em torno de 20%. Considerando a vazão média de 13 l/s (SCADA) a vazão está entre 14,9 e 11,34 l/s.

3.2.3.2 Cenário 2 - Sistema atual

O cenário 2 utiliza a base de dados alimentada ao cenário 1, porém retira da distribuição o reservatório apoiado, o bombeamento e o reservatório elevado. A Figura 43 ilustra o sistema de distribuição com a inserção do turbogerador.

Figura 43 - Cenário 2 com turbogerador



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 43 a instalação do turbogerador ao centro reduz componentes como o segundo reservatório apoiado (Figura 40), reservatório elevado e elevatória de água tratada.

Este é o cenário que o setor de distribuição utiliza na atualidade. Ele aproveita a pressão de entrada a este setor, em torno de 50 mca, que no cenário 1 era dissipada no reservatório apoiado. Para a utilização direta ao SD 15 da pressão de entrada, foi necessário reduzir a pressão de entrada para 20 mca utilizando um turbogerador e uma VRP. Tanto a VRP como o Turbogeração reduzem a pressão de saída, entretanto o controle de pressão por turbogeração permite o aproveitamento energético, ou seja, gera energia elétrica enquanto controla pressões. O modelo hidráulico construído para o cenário 2 considera apenas a utilização de VRP, haja vista, os dois apresentarem o mesmo resultado hidráulico. Os dados de geração de energia foram extraídos da base de dados sistema supervisor do SEMAE.

3.2.3.3 Cenário 3 - Sistema atual com redução de perdas aparentes

No cenário 3 utilizou-se como base o cenário anterior acrescentando ao consumo base da simulação hidráulica um volume estimado para ligações domiciliares que apresentam consumo zero. O cálculo para este volume considera o consumo médio de 132 l/hab. dia para a categoria de consumo residencial e 114 l/hab. dia para a comercial (NETTO, 2015) e uma taxa de ocupação de 2,93 pessoas por habitação (SEBRAE, 2020). A Equação 6 demonstra o cálculo do volume estimado (VE):

$$VE = \frac{C_{med} \times T_{ocup}}{86400} \quad (6)$$

Onde: C_{med} = consumo médio em l/hab.dia;

T_{ocup} = número de habitantes/ domicílio;

VE = volume estimado em l/s.

3.2.3.4 Cenário 4 - Sistema com redução de perdas aparentes e físicas

Neste cenário utiliza-se a construção do modelo hidráulico do cenário 3 com o acréscimo de ações para redução de perdas físicas. A redução de perdas físicas foi projetada com o acréscimo de 3 VRP ao longo da malha de distribuição estabelecendo como condição de parametrização destas válvulas, o limite mínimo e máximo de 10 e 30 mca, respectivamente. A Figura 44 expõe o cenário 4 com a adição de 3 VRP na rede de distribuição.

Figura 44 - Inserção de VRP no cenário 4



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 44 verifica-se a posição das 4 VRP ao longo de toda a rede. As cores diferentes dos nós indicam a faixa de pressão a qual estão inseridos e a variação das pressões ao longo de toda a rede de abastecimento. A parametrização das VRP (pressão entrada/saída) está exposta na Tabela 8.

Tabela 8 - Parametrização das VRP no cenário 4

VRP	Pressão de entrada (mca)	Pressão de saída (mca)
01	45	14
02	16	12
03	25	15
04	22	18

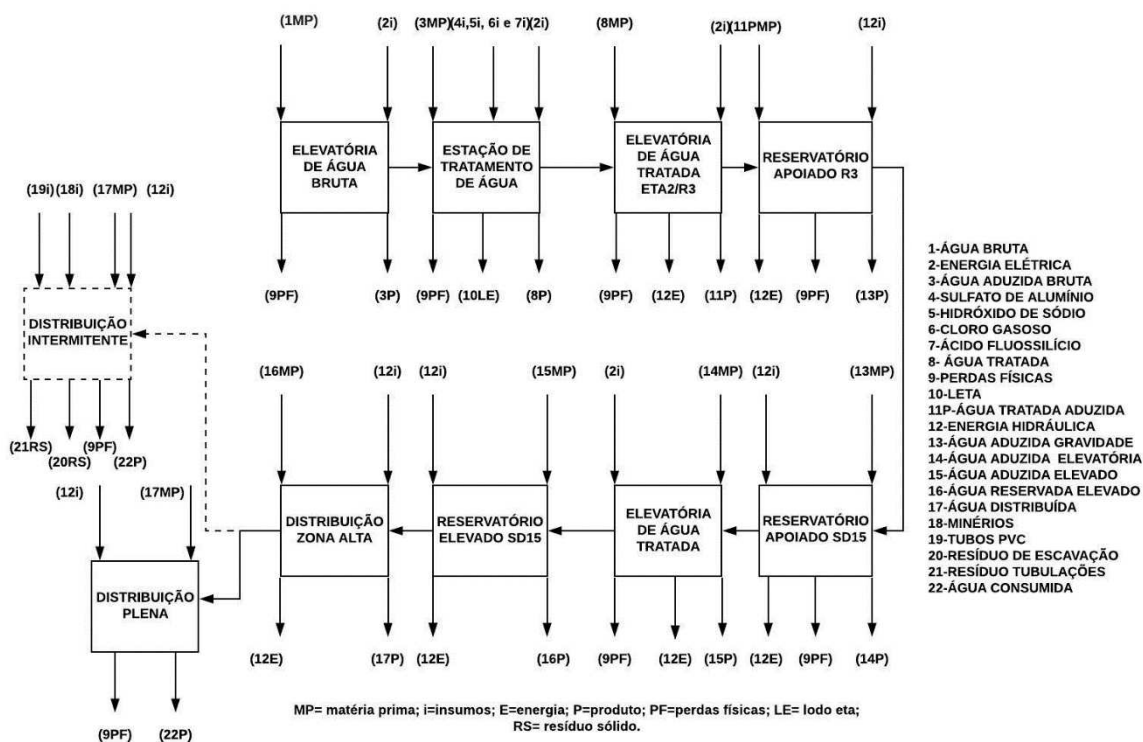
Fonte: Elaborada pelo autor.

Visualiza-se na Tabela 8 na primeira coluna à esquerda a numeração das VRP conforme descrito e localizado na Figura 44. A pressão de entrada e saída está nas colunas subsequentes. O critério para parametrização leva em conta o limite mínimo de pressão para que se mantenha o abastecimento pleno, isto é, mantendo em todos os nós a pressão igual ou superior à 10 mca.

3.3 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA SOCIOAMBIENTAL P+L PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Inicialmente foi necessária a elaboração do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) para o SD15, foi necessário para que fosse possível obter uma visão geral de todos os componentes e seus impactos ambientais no abastecimento público de água tratada e as transformações ocorridas através dos cenários simulados. O ICV está dividido em dois componentes: o diagrama de entradas e saídas e a planilha de aspectos e impactos ambientais. O diagrama de blocos tem por base as etapas de um sistema de abastecimento elencadas na Figura 6 considerando as modificações de processo que ocorrem entre os cenários simulados. Cada etapa está representada em um bloco do diagrama, com as respectivas entradas e saídas, classificadas como matéria-prima (MP), energia (E), produto (P), perdas físicas (PF), resíduos sólidos (RS) e insumos (i). A Figura 45 apresenta o diagrama de blocos para o cenário 1.

Figura 45 - Diagrama de entradas e saídas para o cenário 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

A planilha de aspectos e impactos ambientais traz para cada processo a classificação das entradas e saídas como aspectos considerando o impacto ao qual está relacionado. A planilha de aspectos e impactos ambientais pontua cada item através dos critérios de Abrangência (A), Severidade (S), Frequência (F), Risco (R) e Significância (S). A pontuação final é dada pelo percentual da significância, definida como a soma dos demais critérios, do aspecto/impacto em relação a pontuação total de todos os itens listados. Foram utilizados os critérios de pontuação para abrangência, severidade, frequência, risco e significância, do sistema de Gestão ambiental da UNISINOS (GOMES, 2013). O Quadro 6 descreve os critérios de abrangência, severidade, frequência, risco e significância.

Quadro 6 - Critérios de abrangência, severidade e frequência

Classificação da Abrangência	Pontuação
Causa impacto localizado ou no entorno do local de ocorrência	1
Causa impacto que ultrapassa o local de ocorrência	2
Causa impacto regional, podendo atingir até 100 km do local da ocorrência	3
Causa impacto regional ultrapassando o limite de 100 km do local da ocorrência	4
Classificação de Severidade	
Não causa danos	0
Causa danos leves, acima dos estabelecidos pela legislação, porém cessa o impacto ao ser feita a adequação	2
Causa danos severos, acima dos estabelecidos pela legislação, causa danos irreparáveis ao meio ambiente	4
Classificação de Frequência	
Periodicidade de ocorrência semestral ou maior	1
Periodicidade de ocorrência mensal	2
Periodicidade de ocorrência semanal	3
Periodicidade de ocorrência diária	4

Fonte: Adaptado de Gomes (2013).

A planilha de aspectos e impactos é realizada considerando cada um dos cenários simulados e as respectivas modificações. A elaboração do diagrama de entradas e saídas, bem como da planilha de aspectos e impactos, segue as recomendações da NBR ISO14.040 (ABNT, 2009a) e NBR ISSO 14.044 (ABNT, 2009b). O Quadro 7 apresenta a visão geral dos aspectos/impactos para todos os processos relacionados no diagrama de entradas e saídas.

Quadro 7 - Levantamento dos aspectos e impactos ambientais (visão geral)

(continua)

Processo	Aspectos	Impactos	A	Se	F	R	Si	%
Elevatória de água bruta	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais						
	Extração de Água bruta	Uso de Recursos naturais						
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais						
	Ocorrência de Perdas físicas	Uso de Recursos naturais						
Estação de tratamento de água.	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais						
	Ocorrência de Perdas físicas	Uso de Recursos naturais						
	Geração de efluente líquido	Contaminação da água e solo						
	Geração de resíduo sólido	Contaminação da água e do solo						
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais						
	Produção de Água tratada	Redução de riscos à saúde						
	Inserção de Produtos químicos	Uso de recursos naturais						
Elevatória de água tratada	Redução de risco à saúde	Uso de Recursos naturais						
	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais						
	Adução de água tratada	Uso de Recursos naturais						
	Ocorrência de Perdas físicas	Uso de Recursos naturais						
	Inserção de Energia hidráulica	Uso de Recursos naturais						
Reservatório apoiado	Armazenamento de Água tratada	Alteração da qualidade da água						
	Ocorrência de Perdas físicas	Uso de Recursos naturais						
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água						
	Armazenamento de Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais						
Reservatório elevado	Armazenamento de Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais						
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água						
	Água aduzida elevado	Alteração da qualidade da água						
Turbogerador	Entrada de Energia hidráulica	Uso de recursos naturais						

	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água								
	Geração de energia elétrica	Redução do uso de RECURSOS NATURAIS								
Distribuição zona alta	Água aduzida turbogerador e ou elevado	Uso de Recursos naturais								
	Presença de Energia Hidráulica	Uso de RECURSOS NATURAIS								
	Água distribuída	Uso de Recursos naturais								
	Utilização de Minérios	Depleção de recursos minerais								
	Utilização de Tubos em PVC	Depleção de recursos minerais fósseis								
	Resíduos de tubulações	Depleção de recursos minerais fósseis								
	Água consumida	Alteração da qualidade da água								
	Ocorrência de Perdas físicas	Uso de Recursos naturais								
	Geração de Resíduos de escavações	Depleção de recursos minerais								

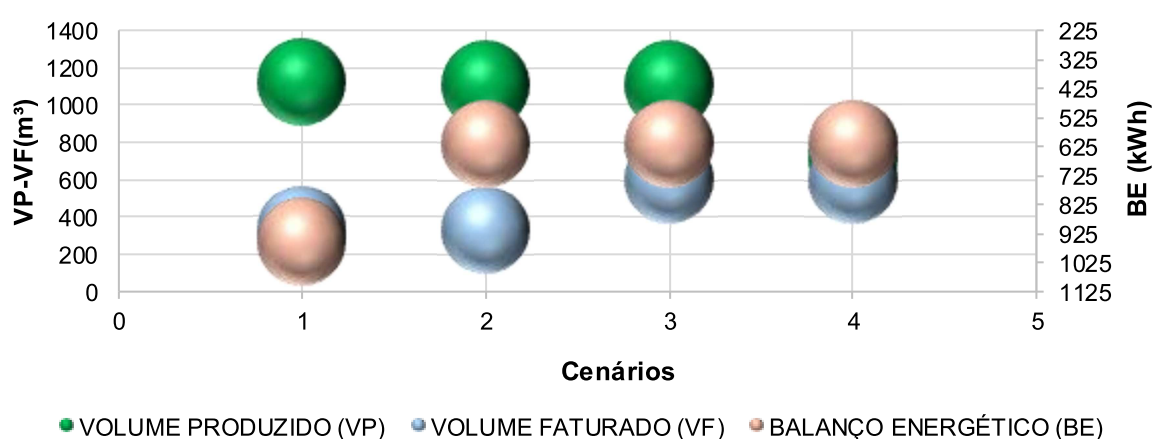
Abrangência (A), Severidade (Se), Frequência (F), Risco (R) e Significância (Si)

Fonte: Adaptado da NBR ISO14.040 (ABNT, 2009a) e NBR ISSO 14.044 (ABNT, 2009b).

Conforme o Quadro 7 os aspectos e impactos estão relacionados a cada processo de abastecimento de água desde a elevatória de água bruta até a distribuição da zona alta. As avaliações ocorrem de acordo com os critérios estabelecidos de abrangência, severidade, frequência e risco. A tabulação dos critérios é realizada para cada cenário, pois há alteração de magnitude dos aspectos/impactos e diminuição dos processos dependendo das simulações executadas.

O desenvolvimento da ferramenta socioambiental, com a utilização do conceito de P+L está baseado no produto das simulações dos diferentes cenários, extraindo destas, três dados principais: volume faturado, volume produzido e consumo/geração de energia. A ferramenta é representada por um diagrama, em que no eixo vertical à esquerda, estará a contabilização do VP e do VF em metros cúbicos, no eixo vertical à direita estará o balanço energético (consumo/recuperação de energia) em kWh. O eixo horizontal representa os quatro cenários simulados neste estudo. Esta ferramenta baseia-se no Diagrama 3S que tem como base o tripé da sustentabilidade a ser visualizado na Figura 3. Desta forma, denomina-se Diagrama 3S para a distribuição de água, em que as inter-relações entre os volumes e balanço energético devam garantir uma distribuição de água mais sustentável. A Figura 46 apresenta o diagrama 3S para distribuição de água.

Figura 46 - Diagrama 3s para distribuição de água



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 46, o diagrama 3S encontra a condição ideal de operação sustentável, quando os três círculos correspondentes ao volume faturado, volume produzido e balanço energético estejam sobrepostos, configurando a menor perda

física, o menor consumo energético e o maior volume faturado possíveis nestes quatro cenários.

3.4 QUANTIFICAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA E DA ENERGIA INCORPORADA NO ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A quantificação da pegada hídrica e da energia incorporada foi realizada através da análise de todo o Sistema de Abastecimento de Água (SAA), desde a captação até o ponto de consumo no SD15. A quantificação da pegada hídrica foi dividida em duas etapas. A primeira etapa considera o consumo de água no processo principal da produção e distribuição de água tratada e é denominada de pegada hídrica principal (P_{hp}). Na segunda etapa a quantificação é dada pelo uso de água na produção de insumos utilizados no abastecimento e é denominada de pegada hídrica secundária (P_{hs}), ambas são dadas em m^3/m^3_f (metro cúbico por metro cúbico faturado). O somatório da pegada hídrica principal com a pegada hídrica secundária denomina-se pegada hídrica global. A quantificação da energia incorporada também foi dividida em duas etapas: a energia incorporada na produção de insumos para tratamento (energia incorporada secundária) e a energia incorporada no abastecimento de água (energia incorporada principal), esses dois componentes formam a energia incorporada global. Para ambas as quantificações foram utilizados dados do *software EduPack 2020* e dados operacionais coletados em campo, além da literatura disponível sobre quantificação de pegada hídrica no saneamento e o banco de dados da biblioteca de inventários de ciclo de vida, plataforma *ecoinvent*¹. A Figura 47 apresenta o campo da plataforma, em que se obtém os dados de utilização de água e a energia incorporada ao processo para o insumo sulfato de alumínio.

¹ Fonte: <https://v30.ecoquery.ecoinvent.org/Account/LogOn?ReturnUrl=%2fSearch%2fIndex>

Figura 47 - Campo de obtenção de dados no *ecoinvent*

Unit Process Exchanges				
Name	Amount	Unit	Uncertainty	SD
Reference Products				
+ aluminium sulfate, powder	1	kg		
By-product/Waste				
To Environment				
air				
+ Water	5.125E-05	m3	Lognormal	1.4918
water				
+ Water	0.00019875	m3	Lognormal	1.4918
From Environment				
natural resource				
+ Water, unspecified natural origin	0.00025	m3	Lognormal	1.3269
From Technosphere				
+ aluminium hydroxide	0.25	kg	Lognormal	1.3269
+ electricity, medium voltage	0.5	kWh	Lognormal	1.3269
+ sulfuric acid	0.5	kg	Lognormal	1.3269

Fonte: Ecoinvent (2020).

Conforme a Figura 47 vislumbra-se todos os processos unitários de troca com vistas aos inventários de ciclo de vida. O produto selecionado para a pesquisa (*reference products*) sulfato de alumínio (*aluminium sulfate*) localizado no canto superior esquerdo apresenta como uma unidade de quantificação o kg de acordo com o retângulo em azul. No retângulo em laranja o uso de água em m³ por kg e no retângulo em vermelho o uso de energia em kWh/kg. O retângulo em roxo visualiza-se o desvio padrão de cada quantificação. Na primeira coluna à esquerda observa-se, após o produto de referência, a utilização de recursos e ou resíduos gerados para o meio ambiente e para a tecnosfera². Na quarta coluna é possível visualizar o método de avaliação da incerteza dos dados disponibilizados.

3.4.1 Determinação da pegada hídrica principal

A Pegada hídrica principal (P_{hp}) é dada pela Equação 7 (PATERSON, RUSHFORTH, *et al.*, 2015).

$$P_{hp} = \frac{(V_{AB} - V_{AT})}{VF} + \frac{VP_{SD25}}{vf} \quad (7)$$

² Espécie de camada terrestre que abrange as estruturas constituídas pelo trabalho humano no espaço da biosfera.

Onde:

V_{AB} é o volume aduzido de água bruta;

V_{AT} é o volume de água tratada;

VP_{SD25} é o volume produzido para o SD15;

VF é o volume faturado em todo o sistema;

vf é o volume faturado no SD15.

A obtenção dos valores de V_{AB} e V_{AT} foi feita através de dados operacionais via sistema supervisorio. A Tabela 9 apresenta os valores de água bruta aduzida e os valores de água tratada entre janeiro e julho de 2020.

Tabela 9 - Dados operacionais de V_{AB} e V_{AT} .

Período	Volume aduzido bruta (m ³)	Volume água tratada (m ³)	Volume faturado (m ³)	Diferença (m ³) ($V_{AB} - V_{AT}$)
01/2020	2257356	2201366	1018515	55990
02/2020	2068852	2007472	981601	61378
03/2020	2328706	2270986	913575	57720
04/2020	2125866	20627160	1035764	63150
05/2020	2170170	2068173	995110	101997
06/2020	2122148	1861465	851929	260683
07/2020	2285317	2064318	860716	220999
TOTAL	15358415	14536496	6657210	821919

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 9 é possível visualizar parte das grandezas para o cálculo de P_{hp} . O volume aduzido de água bruta, o volume de água tratada, o volume faturado e a diferença ($V_{AB} - V_{AT}$) servem para alimentar a primeira parte do cálculo da pegada hídrica principal. O volume faturado obtém-se pelo cadastro comercial para o mesmo período dos demais dados. Esses dados coletados são convertidos para a taxa diária em m³. O volume produzido para o SD15 (VP_{SD25}) é obtido através das simulações realizadas para cada cenário. O volume faturado no SD15 (vf) é obtido através do cadastro comercial para o primeiro cenário, após os volumes faturados são alimentados conforme a ação de melhoria projetada para cada cenário.

3.4.2 Determinação da pegada hídrica secundária

A pegada hídrica secundária (P_{hs}) é dada pela Equação 8:

$$P_{hs} = \frac{(P_{hpn_1} \times Q_{un_1}) + (P_{hpn_2} \times Q_{un_2}) + (P_{hpn_3} \times Q_{un_3}) + (P_{hpn_i} \times Q_{un_i})}{VF} + \frac{(P_{ht_1} \times Q_{ut_1}) + (P_{ht_i} \times Q_{ut_i})}{vf} \quad (8)$$

Onde:

P_{hs} = pegada hídrica em m^3/m^3f ;

P_{hpn_i} = taxa de utilização de água na produção do insumo n_i em m^3/kg ;

Q_{un_i} = quantidade utilizada no abastecimento de água do insumo n_i em kg;

VF = o volume faturado em m^3 ;

P_{ht_i} = taxa de utilização de água na produção do tubo ti ;

vf = volume faturado do SD15 em m^3 .

3.4.3 Determinação da pegada hídrica global

A pegada hídrica global (P_{HG}) é dada pelo somatório da pegada hídrica principal (P_{hp}) com a pegada hídrica secundária (P_{hs}), isto é, quantifica a utilização de água no sistema de abastecimento desde a captação até a entrega ao consumidor final, considerando ainda, o uso durante o processo de fabricação de insumos para o tratamento (produtos químicos) e à distribuição (tubos de PVC e PEAD). Desta forma, a pegada hídrica global é dada pela Equação 9:

$$P_{HG} = P_{hp} + P_{hs} \quad (9)$$

3.4.4 Determinação da energia incorporada principal

A energia incorporada principal (EI_p) é dada pela Equação 10:

$$EI_p = EI_{b1} + EI_{b2} + EI_{b3} \quad (10)$$

Onde:

EI_{b1} = energia incorporada em kwh/m^3 da elevatória de água bruta (EAB);

EI_{b2} = energia incorporada em kwh/m^3 da elevatória de água tratada da ETA;

EI_{b3} = energia incorporada em kwh/m^3 da elevatória de água tratada para o SD15 (EAT).

Os dados operacionais necessários para a determinação da energia incorporada são retirados do sistema supervisorio através do histórico de produção (m³) e consumo energético (kWh).

3.4.5 Determinação da energia incorporada secundária

A energia incorporada secundária é dada pela Equação 11:

$$EI_s = \frac{(EI_{n_1} \times Q_{u_{n_1}}) + (EI_{n_2} \times Q_{u_{n_2}}) + (EI_{n_3} \times Q_{u_{n_3}}) + (EI_{n_i} \times Q_{u_{n_i}})}{VP} + \frac{EI_{t_1} \times Q_{u_{t_1}} + EI_{t_i} \times Q_{u_{t_i}}}{Vf_{SD15}} \quad (11)$$

Onde:

EI_{n_i} = energia incorporada pelo insumo n_i em kWh/m³;

VP = volume produzido em m³;

EI_{t_i} = energia incorporada na fabricação do tubo t_i ;

V_f = volume faturado para o setor SD15.

A Tabela 10 apresenta os componentes para a estimativa da energia incorporada durante a produção dos produtos químicos de maior relevância, utilizados no tratamento de água.

Tabela 10 - Componentes para estimativa da energia incorporada na produção de produtos químicos

Insumos	EI(kWh/kg)	Utilização (kg/dia)
Sulfato de alumínio	0,50	4988,89
Hidróxido de sódio	3,52	425,81
Cloro gasoso	3,58	271,23
Ácido fluossilícico	0,138	431,62

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 10 sintetiza os dados necessários para a estimativa de energia incorporada para os produtos químicos utilizados no tratamento. Na primeira coluna à esquerda se encontra os principais insumos utilizados. Na segunda coluna encontra-se a utilização de energia na produção destes insumos em kWh/kg extraídos da plataforma *ecoinvent*. A última coluna trata da utilização diária destes insumos no tratamento de água, dado em kg/dia.

A Tabela 11 explicita os componentes para a estimativa de energia incorporada para a fabricação de tubos.

Tabela 11 - Componentes para estimativa da energia incorporada para as tubulações do SD15

Material	Quantidade (m)	Massa (kg/m)	EI (kwh/kg)
PVC (φ 50 mm)	761,25	0,911	16,625
PEAD (φ 20 mm)	774,9	0,145	22,22

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Tabela 11 é possível visualizar na primeira coluna à esquerda o material e o diâmetro utilizado nas tubulações. A segunda coluna identifica-se a quantidade em metro estimada para a substituição de trechos das tubulações. Na terceira coluna a massa do material é dada em kg/m. A última coluna apresenta a taxa de utilização de energia durante o processo de fabricação destes materiais em kWh/kg.

3.4.6 Determinação da energia incorporada global

A energia incorporada global (EI_g) é dada pelo somatório da energia incorporada principal e a energia incorporada secundária através da seguinte equação:

$$EI_g = EI_p + EI_s \quad (12)$$

A energia incorporada global é dada em kWh/m³.

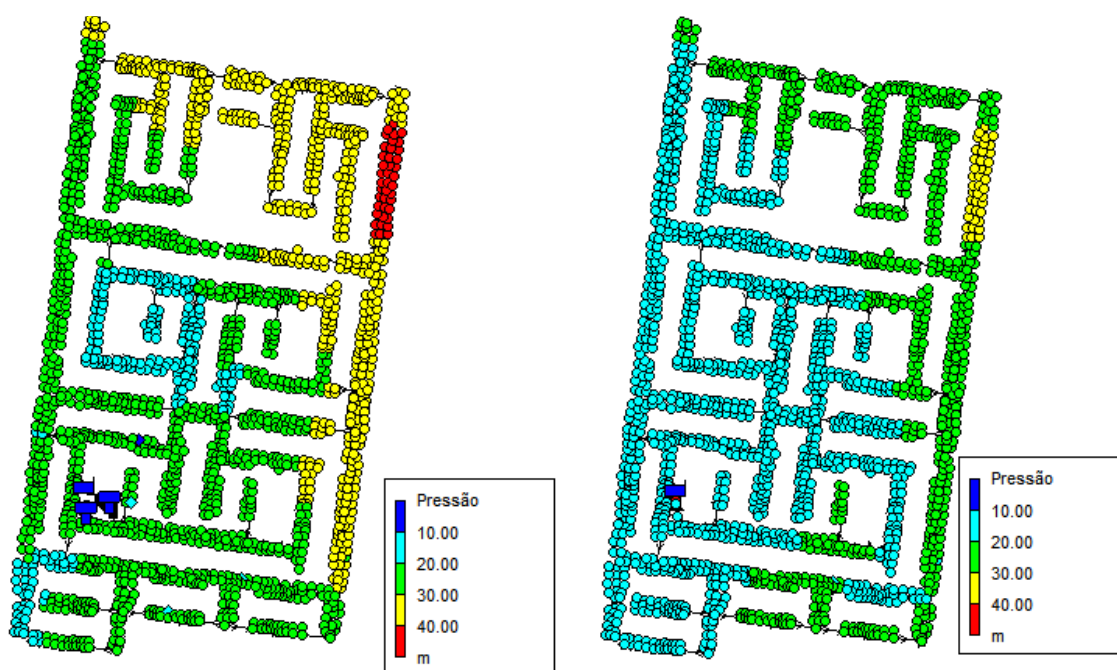
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir deste item apresenta-se os resultados e a posterior discussão estabelecendo como base o encadeamento lógico da metodologia aplicada e os objetivos propostos para este trabalho.

4.1 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

A simulação hidráulica foi realizada de acordo com o planejamento descrito na metodologia. A visualização das zonas de pressão através dos diversos cenários constitui um resultado significativo para a compreensão das ações proposta neste trabalho. Na Figura 48 pode-se visualizar as zonas de pressão para os cenários 1 e 2 no SD15.

Figura 48 - Da esquerda para a direita: zonas de pressão para os cenários 1 e 2 no SD15

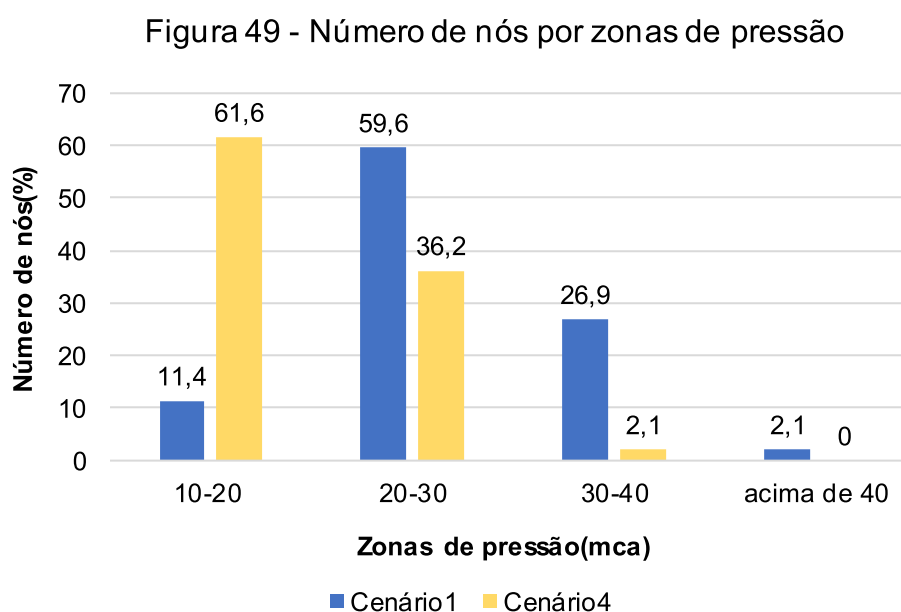


Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com a Figura 49 observa-se à esquerda o mapa das zonas de pressão para o cenário 1. A área em vermelho indica pressão de abastecimento acima de 40 mca. A zona em amarelo sinaliza pressão entre 30 e 40 metros de coluna d'água. A área em verde de 20 à 30 mca. A zona em ciano para pressão entre 10 e

20. Nota-se que no mapa à direita, cenário 2, há redução de uma forma geral da pressão média de abastecimento, fruto do conjunto de ações propostas ao longo dos quatro cenários. A zona em ciano apresenta a maior área, seguida pela verde. A zona de maior pressão passa a ser a zona entre 30 e 40 (área em amarelo), visto que a zona compreendida para pressão maior que 40, deixa de existir nesse cenário. A redução da pressão média do SD15 é acentuada no cenário 4 com a instalação de VRP. A diferença de pressão também é resultado do desnível geométrico do terreno, todavia, esta variável não se altera, portanto, como forma de tornar o sistema de distribuição de água mais sustentável com menos perdas físicas e mais disponibilidade, o uso de válvulas reguladoras de pressão e outras formas de controle, como turbogeradores.

As simulações do cenário 2 e 3 são apresentadas no Apêndice A, pois não contém modificações expressivas dos resultados. O número de nós para cada zona de pressão é apresentado na Figura 49.



Fonte: Elaborada pelo autor.

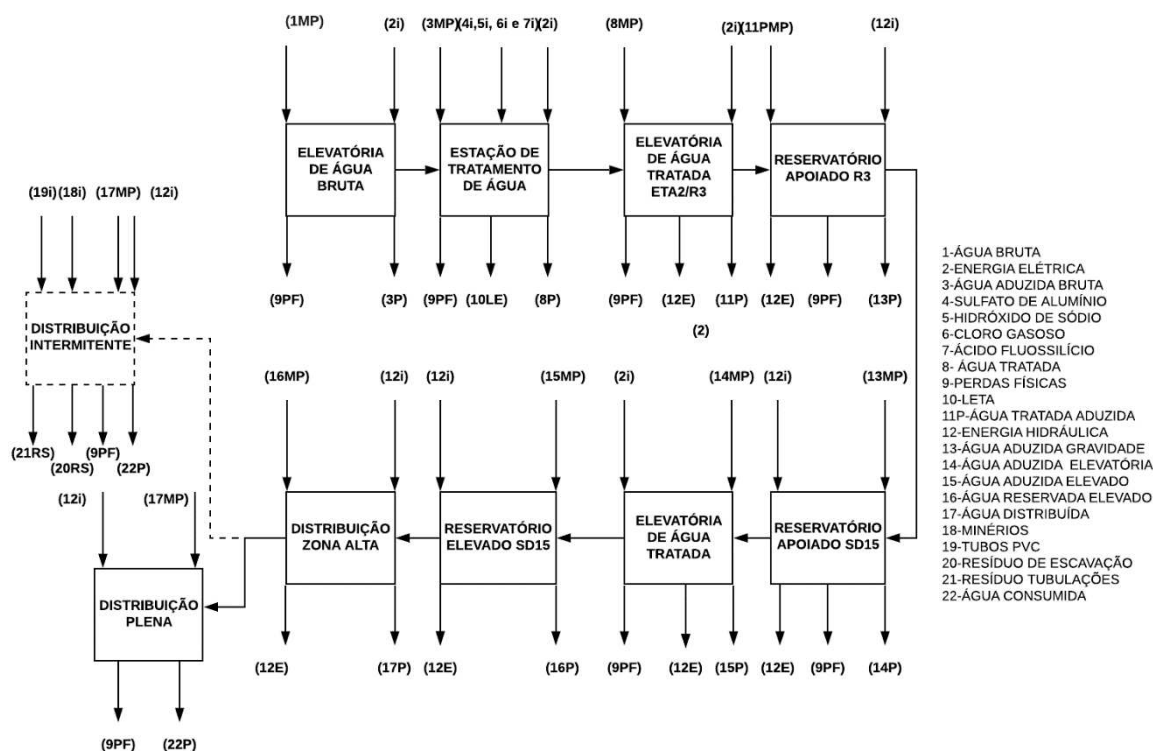
Na Figura 49 visualiza-se para cada zona de pressão o número de nós da rede de distribuição nos cenários 1 e 4. Observa-se que o cenário 1 possui o maior número de nós, na zona entre 20-30 mca, cerca de 59,6% e a zona de 30 a 40 mca, em torno de 26,9%. O cenário 1 ainda possui 2,1% dos nós acima de 40%. Em contraponto ao cenário 1, o cenário 4 apresenta a maioria de seus nós (61,6%) na zona de pressão entre 10 e 20 mca e 36,2% estão na zona compreendida pela faixa entre 20 e 30 mca.

Na zona com pressão entre 30 e 40 mca o número de nós é de apenas 2,1% e não ocorre nenhum nó desta rede simulada no cenário 4 com pressão superior a 40 mca. Torna-se perceptível através deste gráfico a redução de pressão em todo o SD15, ratificando o mapa da zona de pressão extraído das simulações via *software epanet* da Figura 31.

4.2 APRESENTAÇÃO DO ICV E DIAGRAMA 3S PARA A DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

O inventário de ciclo de vida (ICV) para o cenário 1 apresenta o diagrama de blocos de um sistema convencional de abastecimento, isto é, sem o turbogerador substituindo reservatórios e conjunto motor bomba. A Figura 50 apresenta o diagrama de entradas e saídas qualitativo para o cenário 1.

Figura 50 - Diagrama de entradas e saídas qualitativo para a distribuição de água (cenário 1)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 50 o diagrama do cenário 1 possui dez blocos formando as etapas da distribuição de água desde a elevatória de água bruta até a entrega ao consumidor final representado pelos blocos distribuição intermitente e plena. No Quadro 7 pode-se visualizar os aspectos e impactos ambientais avaliados de forma

qualitativa, com as entradas e saídas deste diagrama para cada processo do cenário 1.

Quadro 8 - Aspectos e impactos ambientais para o cenário 1

(continua)

Processo	Aspectos	Impactos	A	Se	F	R	Si	%
Elevatória de água bruta	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Água bruta	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,65
Estação de tratamento de água	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	4	1	8	2,64
	Geração de efluente líquido	Contaminação da água	2	2	4	1	9	2,97
	Geração de resíduo sólido	Contaminação do solo	2	2	4	1	9	2,97
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Água tratada	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Produtos químicos	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
Elevatória de água tratada	Água tratada	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Adução de água tratada	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,65
	Energia hidráulica	Uso de recursos naturais	4	2	1	1	8	2,64
Reservatório apoiado	Água tratada aduzida	Alteração da qualidade da água	1	2	4	1	8	2,64
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,65
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água	4	2	4	1	11	3,63
	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
Reservatório elevado	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água	2	2	1	1	6	1,98
	Água aduzida elevado	Alteração da qualidade da água	1	2	1	1	5	1,65
Distribuição zona alta	Água aduzida elevado	Uso de Recursos naturais	2	2	4	1	9	2,97

(conclusão)

	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Água distribuída	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,63
	Minérios	Depleção de recursos minerais	4	2	4	1	11	3,63
	Tubos em PVC	Depleção de recursos minerais fósseis	4	2	4	1	11	3,63
	Resíduos de tubulações	Depleção de recursos minerais fósseis	4	2	4	1	11	3,63
	Água consumida	Alteração da qualidade da água	4	2	1	1	8	2,64
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	2	2	4	1	9	2,97
	Resíduos de escavações	Depleção de recursos minerais	4	2	4	1	11	3,63

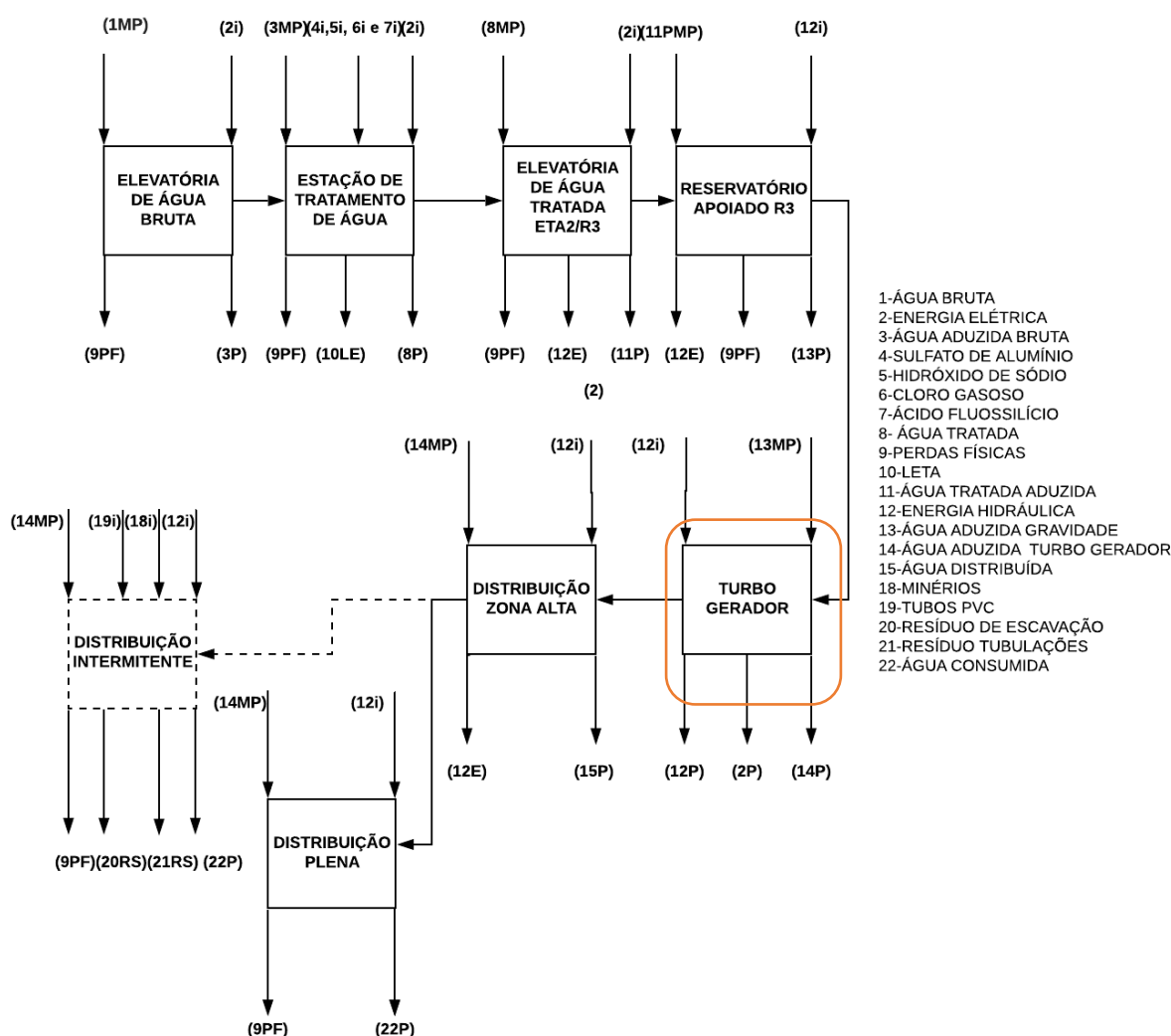
Abrangência (A), Severidade (Se), Frequência (F), Risco (R) e Significância (Si)

Fonte: Elaborada pelo autor.

No Quadro 8 é possível visualizar os aspectos e impactos ambientais para o cenário 1 destacando o uso de Recursos Naturais como principal impacto que figura no sistema de distribuição de água perpassando vários processos e sendo responsável por 67% do somatório de impactos ambientais. Cabe salientar que dentre estes impactos o principal aspecto ao qual está relacionado, diz respeito às perdas físicas de água.

No cenário 2 ocorre o ingresso do turbogerador modificando a estrutura convencional de abastecimento de água. A Figura 51 apresenta o diagrama de blocos para o cenário 2.

Figura 51 - Diagrama de entradas e saídas para o cenário 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que na Figura 51 ocorre a retirada de dois reservatórios e um conjunto motor bomba para o ingresso do turbogerador, destaque em vermelho. A

entrada deste componente acrescenta a este diagrama um novo produto que resulta da geração de energia elétrica, grandeza que geralmente figura como insumo nos demais blocos que necessitam de energia para executarem sua função. A entrada do turbogerador também modifica a planilha de aspectos e impactos ambientais. O Quadro 8 apresenta o levantamento dos aspectos e impactos ambientais para o cenário 2.

Quadro 9 - Aspectos e impactos ambientais para o cenário 2

(continua)

Processo	Aspectos	Impactos	A	Se	F	R	Si	%
Elevatória de água bruta	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Água bruta	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,67
Estação de tratamento de água.	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	4	1	8	2,67
	Geração de efluente líquido	Contaminação da água	2	2	4	1	9	3,00
	Geração de resíduo sólido	Contaminação do solo	2	2	4	1	9	3,00
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Produtos químicos	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
Elevatória de água tratada	Água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Adução de água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,67
	Energia hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	1	1	8	2,67
Reservatório apoiado	Água tratada aduzida	Alteração da qualidade da água	1	2	4	1	8	2,67
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,67
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água	3	2	4	1	10	3,33
	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
Turbogeração	Energia hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água	2	2	1	1	6	2,00
	Geração de energia elétrica	Redução do uso de Recursos naturais (positivo)	2	1	4	1	8	2,67
Distribuição zona alta	Água aduzida turbogeração	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67

	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Água distribuída	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Minérios	Depleção de recursos minerais	4	2	4	1	11	3,67
	Tubos em PVC	Depleção de recursos minerais fósseis	4	2	4	1	11	3,67
	Resíduos de tubulações	Depleção de recursos minerais fósseis	4	2	4	1	11	3,67
	Água consumida	Alteração da qualidade da água	3	2	1	1	7	2,33
	Redução das Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	2	2	4	1	9	3,00
	Resíduos de escavações	Depleção de recursos minerais	4	2	4	1	11	3,67

Abrangência (A), Severidade (Se), Frequência (F), Risco (R) e Significância (Si)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observa-se no Quadro 9 o uso de Recursos Naturais soma em torno de 66,34% dos impactos ambientais. A redução percentual desses impactos deve-se a entrada do turbogerador promovendo a geração de energia elétrica ao sistema acrescentando o impacto “redução do uso de recursos naturais (destaque em vermelho) e a diminuição das perdas físicas, ambos impactos de orientação positiva. A diminuição das perdas físicas ocorre devido a redução da frequência dos vazamentos em tubulações decorrentes do controle de pressão promovido pelo turbo gerador. Essa redução ocorre nos aspectos relacionados ao processo “distribuição zona alta”.

Os cenários 3 e 4 não sofrem alterações significativas do ponto de vista qualitativo dos aspectos e impactos tratados. Ambas as planilhas se encontram disponíveis no Apêndice B deste trabalho. A avaliação quantitativa concentra-se na energia consumida e na utilização de água em todo o processo através da quantificação da pegada hídrica e da energia incorporada.

A partir do cenário 2 ocorre uma mudança tecnológica e de processo por meio da introdução do turbogerador no SD15 retirando dois reservatórios e um conjunto motor bomba da distribuição de água para este setor de distribuição, além de promover o aproveitamento energético através da transformação da energia hidráulica em energia elétrica.

O balanço energético, ou seja, a quantidade de energia utilizada menos a energia gerada na distribuição de água no SD15, apresenta uma redução devido ao controle de pressão aplicado ao sistema através da lógica da turbogeração que aproveita esta energia originada da pressão manométrica da tubulação de entrada para transformação em energia elétrica. A introdução do turbogerador e seus resultados encontra consonância com os trabalhos de Alberizzi *et al.* (2018) que utilizando simulação matemática (*Matlab/Simulink Model*) projetam a redução da vazão de entrada através da manutenção da pressão de saída constante além do ganho já esperado da geração de energia elétrica. A pesquisa italiana utilizou uma moto bomba funcionando como turbina (BFT). A experiência brasileira apresenta e comprova estes resultados em dispositivos físicos reais, ou seja, resultados colhidos da instalação propriamente dita do turbogerador. Outro fator que contribui para este resultado é a retirada do conjunto motor bomba utilizado no cenário 1 representando a diminuição do 325,38 kWh no consumo energético. A geração de energia elétrica está na ordem de 3,32 kWh. Verifica-se também a redução do VP entre os dois

cenários. Isto, da mesma forma é devido ao controle de pressões que mantém a pressão de saída sem picos ou variações significativas, o que mantém o sistema de distribuição em equilíbrio, logo, com menos perdas físicas. A Tabela 12 apresenta a variação do BE e do VP para os cenários 1 e 2.

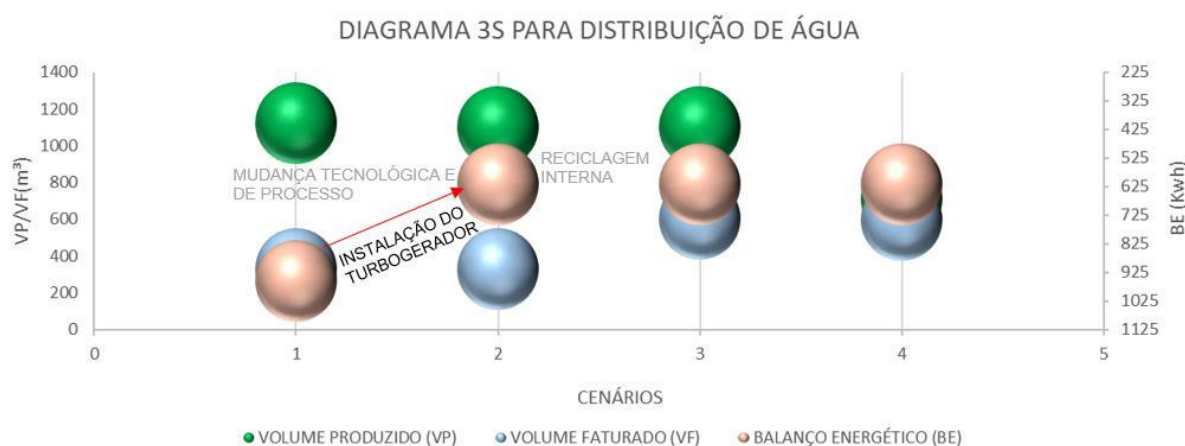
Tabela 12 - Variação de BE e VP para os cenários 1 e 2

Variável	Cenário 1	Cenário 2
Balanco Energético – BE (kWh)	953,7	617,86
Volume Produzido - VP (m ³)	1122,33	1103,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Torna-se perceptível a ocorrência de estratégias P+L a partir da análise do diagrama 3S para a distribuição entre os cenários 1 e 2. A Figura 52 apresenta as evidências de estratégias de P+L entre os cenários 1 e 2.

Figura 52 - Mudança tecnológica e de processo entre os cenários 1 e 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 52, identifica-se, estratégias de P+L nível 1, além de um componente nível 2, reciclagem interna, representada pelo aproveitamento energético proporcionado pelo turbogerador. A inserção do turbogerador no sistema promove a redução do consumo e a geração de energia uma diminuição no balanço energético na ordem de 335,84 kWh conforme demonstra o diagrama 3Ss a partir do cenário 2.

No cenário 3 ocorre a projeção para recuperar volumes não contabilizados, ou seja, perdas aparentes que são enfrentadas com renovação do parque de hidrômetros, estratégia também utilizada na cidade de Macao (VERMESCH; CARTEADO, 2008) e combate às fraudes, isto apresenta uma modificação

tecnológica e de processo visto que a substituição dos hidrômetros adiciona medidores de vazão tecnologicamente superiores e não ocorre somente de forma reativa, ou seja, a troca também é realizada por iniciativa da autarquia quando o cadastro comercial informa inconsistências nos volumes faturados e não somente por solicitação do usuário. A projeção de recuperação das perdas aparentes para o cenário 3 é apresentada pela Tabela 13.

Tabela 13 - Recuperação das perdas aparentes a partir do cenário 3

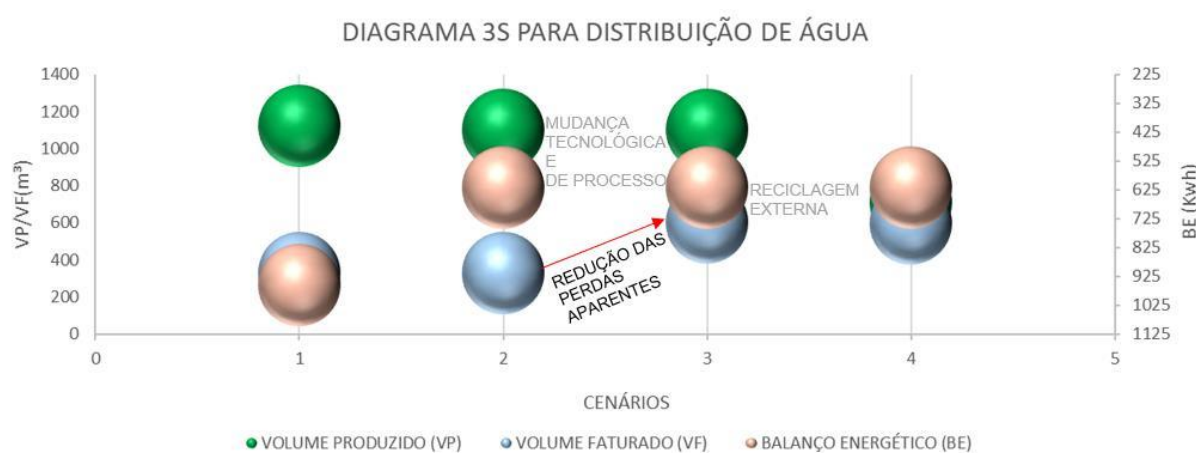
Variável	Cenário 2	Cenário 3
Volume Faturado - VF (m ³)	327,45	602,2
Volume Produzido - VP (m ³)	1103,33	1103,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Tabela 13, ocorre um aumento do volume faturado em 274,75 m³, enquanto o volume produzido permanece constante. A manutenção do volume produzido e o aumento do volume faturado é um resultado esperado para ações de recuperação de perdas aparentes. Este estudo corrobora com os trabalhos de recuperação de perdas aparentes realizados na cidade de Seattle (U. S. EPA, 2016), onde o volume consumido não faturado vem aproximando-se ao volume faturado ao longo dos anos através de ações para reduzir este tipo de perdas.

A demanda de consumo estava sendo atendida, visto que inexistia ocorrência de interrupções sistemáticas no abastecimento. Entretanto, a contabilização do volume exige uma modificação de processo e de tecnologia. A Figura 53 apresenta as estratégias P+L na redução das perdas aparentes do cenário 3.

Figura 53 - Estratégias P+L na redução de perdas aparentes no cenário 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 53 observa-se que a redução das perdas aparentes é significativa, haja visto que o diagrama 3Ss para este cenário aproxima a esfera azul que representa o VF das demais esferas tornando a operação deste sistema de distribuição mais sustentável. Na redução das perdas aparentes a mudança tecnológica e de processo centraliza-se na renovação do parque de hidrômetros e no combate às fraudes, ou seja, novamente temos uma estratégia P+L nível 1. Ainda temos uma estratégia de nível 3 representada pela reciclagem externa dos hidrômetros substituídos. Os hidrômetros substituídos retornam ao fabricante onde são reaproveitadas as carcaças para montagem de novos hidrômetros que recebem nova relojoaria¹. Esta operação é formalizada através de contrato ente o SEMAE e a empresa responsável pela reciclagem.

No cenário 4 temos o acréscimo das VRP na rede de distribuição, a redução das perdas físicas torna-se significativa reduzindo o VP. A Tabela 14 apresenta o volume produzido e o volume faturado nos cenários 3 e 4.

Tabela 14 - Volume produzido e faturado nos cenários 3 e 4

Variável	Cenário 3	Cenário 4
Volume faturado (m ³)	602,2	597,02
Volume produzido (m ³)	1103,33	617,03

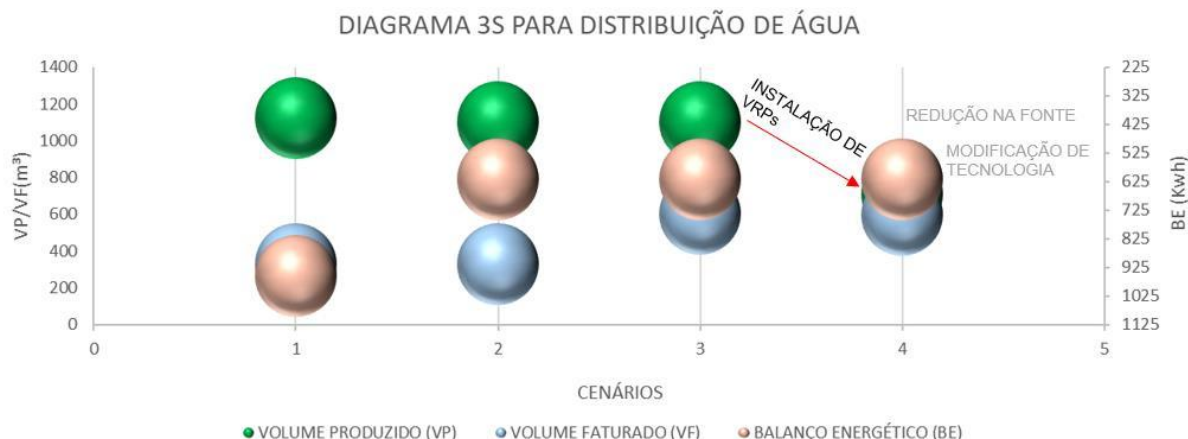
Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com a Tabela 14 o volume produzido reduz para 617,03 m³ no cenário 4, isto ocorre devido à instalação de 3 VRP na rede de distribuição de água resultando na redução de vazamentos e em consequência disto, diminuição do volume produzido. A redução de vazamentos com o emprego de VRP encontra-se em consonância com o estudo de Gonçalves e Lima (2007), pois é uma forma de reduzir pressão ao longo de 24 horas em especial, as pressões máximas noturnas na rede de distribuição quando o consumo tende a zero.

A instalação de VRP também evidencia estratégia de P+L. A Figura 54 apresenta as estratégias de P+L utilizadas no cenário 4.

¹ Conjunto de engrenagens e demais componentes mecânicos montados no interior dos hidrômetros para efetuar a medição de volume disponibilizado para cada ligação domiciliar.

Figura 54 – Estratégias de P+L para o cenário 4



Fonte: Elaborada pelo autor.

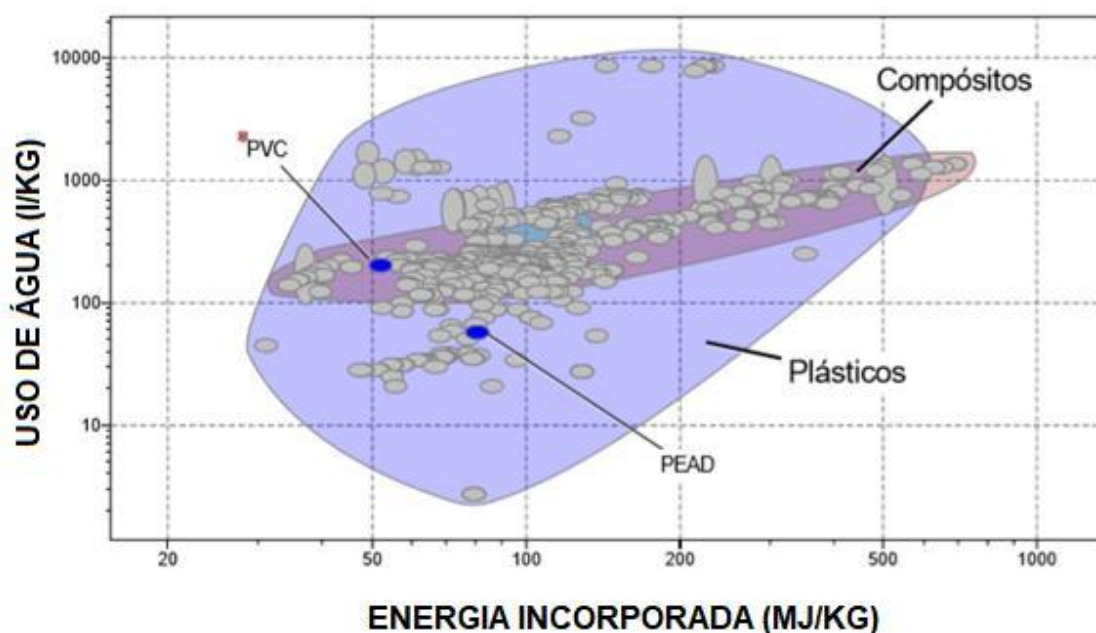
Conforme a Figura 54 a estratégia nível 1 de redução na fonte ocorre com o controle e a redução da pressão de abastecimento proporcionada pela instalação de VRP, pois diminui a necessidade de captação de água do manancial (água bruta) e dos demais processos. A modificação de tecnologia (estratégia P+L nível 1) com ingresso dessas válvulas na rede de abastecimento incute neste processo uma limitação de pressão com modulação da vazão de acordo com a demanda de consumo ao longo do dia. Portanto, o cenário 4 apresenta características de uma estratégia de P+L nível 1 com redução na fonte e modificação de tecnologia.

O diagrama 3Ss apresenta os cenários 3 e 4 com os melhores resultados visto que existe uma proximidade entre as três variáveis analisadas, sendo o cenário 4 considerado o modelo ideal sob à ótica dos pilares da sustentabilidade, pois encontra-se em proximidade o volume produzido e o volume faturado ao mesmo tempo a eficiência energética, estes que na operação de sistemas de distribuição de água transubstanciam os pilares ambiental, social e econômico da sustentabilidade.

4.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE TUBULAÇÕES

Para a análise dos materiais das tubulações foram selecionadas duas propriedades que possuem relação com o escopo deste trabalho: a utilização de água e o uso de energia ao longo do processo de produção de tubos em PEAD e PVC. Na Figura 55 apresenta-se a simulação feita no software CES Edu Pack para obtenção da utilização da água versus uso de energia durante o processo de produção dos materiais PVC e PEAD.

Figura 55 - Dados sobre a utilização de água e energia na produção de PVC e PEAD



Fonte: CES EduPak (2020).

De acordo com a Figura 55 os materiais PEAD e PVC possuem diferenças significativas quanto à utilização de água e energia em seus processos de fabricação. Quanto ao uso de água a obtenção de PEAD utiliza em torno de 58,2 l/kg, enquanto o PVC utiliza cerca de 208,5 l/kg, ou seja, cerca de 358% de acréscimo na utilização de recursos hídricos. Por outro lado, o PVC possui energia incorporada na produção primária em torno de 51,85 MJ/kg em contraponto ao PEAD que utiliza 80 MJ/kg, isto é, o PEAD necessita da adição de cerca de 54% de energia em comparação ao PVC. Ainda sobre a Figura 56, o campo em violeta delimita a família dos plásticos, enquanto o campo em carmim sinaliza o campo dos compósitos.

4.4 PEGADA HÍDRICA PRINCIPAL

A pegada hídrica apresenta queda a partir do cenário 1 à medida que as ações de melhoria são empregadas. A Tabela 15 apresenta a evolução da P_{hp} nos cenários 1, 2, 3 e 4.

Tabela 15 - Pegada hídrica principal para os cenários 1,2,3 e 4

Cenários	P_{hp} (m ³ /m ³ f)
1	3,53
2	3,47
3	1,93
4	1,28

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se visualizar na Tabela 15 a evolução da pegada hídrica principal através dos cenários propostos. O cenário 2 apresenta a primeira redução na P_{hp} devido à entrada do turbogerador controlando a pressão de entrada e com isso promovendo a diminuição do volume produzido para o SD15. O cenário 3 reduz a P_{hp} para 1,93 (m³/m³f) com a redução das perdas aparentes fazendo com que o volume faturado vf influencie significativamente nesta redução da pegada hídrica principal. O último cenário apresenta o melhor resultado, pois além do somatório de todas as ações de melhoria executadas nos cenários 2 e 3, o cenário 4 traz o acréscimo de válvulas reguladoras de pressão que reduzem o volume perdido em vazamentos, reduzindo o VP_{SD25} , principal grandeza responsável por esta diminuição da pegada hídrica que atinge 1,28 m³/m³f, ou seja, para cada m³ disponibilizado, cerca de 1,28 m³ são utilizados na produção e distribuição de água tratada ao final do cenário 4.

4.5 PEGADA HÍDRICA SECUNDÁRIA

Os dados da pegada hídrica secundária foram obtidos a partir da plataforma *ecoinvent*.

Tabela 16 - Dados de produtos químicos utilizados para cálculo da pegada hídrica secundária

Insumos	P_{hp} (m ³ /kg)	$Q_{u_{ni}}$ (kg/dia)
Sulfato de alumínio	$2,5 \times 10^{-4}$	4988,89
Hidróxido de sódio	10^{-2}	425,81
Cloro gasoso	$2,9 \times 10^{-2}$	271,23
Ácido fluossilícico	$1,33 \times 10^{-2}$	431,62

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 16 apresenta os dados utilizados para o cálculo da pegada hídrica secundária. Pode-se visualizar na coluna à esquerda os insumos em avaliação: sulfato de alumínio, hidróxido de sódio, cloro gasoso e ácido fluossilícico. Na segunda coluna obtém-se a taxa de utilização de água por kg do produto extraídos da plataforma *ecoinvent*. A quantidade utilizada aparece na terceira coluna em kg, obtida através de dados de consumo fornecidos pela diretoria de operação da autarquia.

Os dados relativos à utilização de água durante o processo de fabricação de tubos consideram as informações disponíveis no *software* CES *EduPack* 2020 para os materiais PVC e PEAD. A estimativa de substituição das tubulações foi baseada no trabalho realizado por Sarzedas (2009) na cidade de São Paulo na qual cita valores em torno de 2%. Para os tubos em PVC considera-se o diâmetro de 50 mm e para PEAD o diâmetro de 20 mm. A Tabela 17 apresenta os dados utilizados para a obtenção da pegada hídrica no ciclo de produção dos tubos em PEAD E PVC.

Tabela 17 - Dados de tubulações para estimativa da pegada hídrica

Material	Quantidade (m)	Massa (kg/m)	P_{hp} (m ³ /kg)
PVC (φ 50 mm)	761,25	0,911	0,198
PEAD (φ 20 mm)	774,9	0,145	0,116

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 17 apresenta os dados utilizados para calcular a pegada hídrica secundária nas tubulações utilizadas majoritariamente no SD15. Na primeira coluna à esquerda visualiza-se os materiais utilizados bem como o diâmetro correspondente a cada tubulação. A quantidade em metros na segunda coluna é calculada tomando por base o percentual de 2% sobre o comprimento total das tubulações (SARZEDAS, 2009). A massa por metro linear é dada na segunda coluna. Na última coluna observa-se a taxa de utilização de água na produção do insumo. O produto da quantidade (m) pela massa (kg/m) é igual a quantidade utilizada ($Q_{u_{ni}}$) em kg.

Da mesma forma que a pegada hídrica principal apresenta queda a partir do cenário 1, a pegada hídrica secundária acompanha a tendência de queda até o cenário 4. A Tabela 18 apresenta a pegada hídrica secundária para os cenários 1, 2, 3 e 4.

Tabela 18 - Pegada hídrica secundária para os cenários 1,2, 3 e 4

Cenários	$P_{hs}(\text{m}^3/\text{m}^3_f)$
1	1,12E-01
2	1,12E-01
3	7,23E-02
4	7,28E-02

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Tabela 18 a redução do uso da água no processo de distribuição é acentuada a partir do cenário 3 e 4 quando ocorrem mudanças significativas no volume faturado, principal impulsionador deste resultado. Embora o resultado possa transparecer insignificante quanto a utilização de água em processos secundários, são necessários para cada litro de água disponibilizado 72,8 litros para a produção de produtos químicos e tubulações.

4.6 PEGADA HÍDRICA GLOBAL

A pegada hídrica global é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Pegada hídrica global

Cenários	$P_{HG}(\text{m}^3/\text{m}^3_f)$
1	3,64
2	3,58
3	2,00
4	1,36

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Tabela 19 a pegada hídrica global, resultado da soma da pegada hídrica principal e pegada hídrica secundária, se mantém em queda ao longo das simulações propostas. No cenário 1 eram necessários 3,64 m³ de água para cada metro cúbico faturado, mesmo com as ações propostas ao longo dos cenários ainda é preciso cerca de 1,36 m³ para cada metro cúbico disponibilizado, externando, portanto, um potencial de melhoria que se mantém bastante significativo apesar de todas as ações propostas.

4.7 ENERGIA INCORPORADA PRINCIPAL

A estimativa da energia incorporada principal considera três pontos onde acontece a adição de energia elétrica para que os blocos desse processo façam a entrega para o bloco seguinte, conforme descrito nos diagramas de entradas e saídas elaborados para este trabalho. Os três blocos são: Elevatória de Água Bruta (EAB), Estação de Tratamento de Água (ETA) e Elevatória de Água Tratada (EAT). A Tabela 20 apresenta os dados obtidos via sistema supervisorio do SEMAE da energia incorporada ao processo para o cenário 1 e 2.

Tabela 20 - Taxa de consumo energético por blocos para o cenário 1 e 2

Blocos	EI_p *(kWh/m³) – cenário 1	EI_p *(kWh/m³) – cenário 2
Elevatória de Água Bruta	0,26	0,26
Estação de Tratamento de Água	0,30	0,30
Elevatória de Água Tratada	0,22	0,00
Total	0,78	0,56

EI_p *: Energia Incorporada Principal.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 20 apresenta a taxa de consumo energético em kWh/m³. A coluna à esquerda apresenta os três blocos avaliados. A coluna à direita apresenta a taxa de consumo energético dada em kWh/m³, ou seja, a energia incorporada principal. A redução da Energia Incorporada Principal (EI_p) no cenário 2 deve-se a adição do turbogerador e a retirada da EAT no SD15. Os demais cenários não foram considerados nesta avaliação haja visto não ter ocorrido modificações significativas quanto ao consumo energético do sistema de distribuição nos cenários 3 e 4.

4.8 ENERGIA INCORPORADA SECUNDÁRIA

A estimativa da Energia Incorporada Secundária (EI_s) considera para esta análise os produtos químicos de maior relevância para o tratamento e as tubulações empregadas durante os consertos de vazamentos no SD25 quando da fabricação destes. A Tabela 21 demonstra os componentes para a estimativa de EI_s para os produtos químicos utilizados no tratamento de água.

Tabela 21 - Componentes para estimativa da EI_s para produtos químicos

Insumos	EI^* (kWh/kg)	Utilização (kg/dia)	EI_s^{**} (kWh/m ³)
Sulfato de alumínio	0,50	4988,89	$7,98 \times 10^{-2}$
Hidróxido de sódio	3,52	425,81	$4,98 \times 10^{-2}$
Cloro gasoso	3,58	271,23	$3,11 \times 10^{-2}$
Ácido fluossilícico	0,138	431,62	$1,91 \times 10^{-3}$
Total			$1,61 \times 10^{-1}$

EI^* : Energia Incorporada

EI_s^{**} : Energia Incorporada Secundária

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Tabela 21 observa-se que o insumo mais significativo para a composição da Energia Incorporada Secundária é o sulfato de alumínio, embora a taxa de consumo energético seja menor que o hidróxido de sódio e o cloro gasoso, a utilização no processo, cerca de 4988 kg/dia, é a maior quantidade entre os demais insumos.

A energia incorporada na substituição das tubulações da rede de distribuição é apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 - Energia incorporada secundária nas redes de distribuição de água

Material	EI_s^* cenário 1 (kWh/m ³)	EI_s^* cenário 2 (kWh/m ³)	EI_s^* cenário 3 (kWh/m ³)	EI_s^* cenário 4 (kWh/m ³)
PVC (φ 50 mm)	6,97	6,97	3,79	3,82
PEAD (φ 20 mm)	$8,84 \times 10^{-1}$	$8,84 \times 10^{-1}$	$4,81 \times 10^{-1}$	$4,09 \times 10^{-1}$
Total	7,85	7,85	4,27	4,23

EI_s^* : Energia Incorporada Secundária

Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se na Tabela 22 que as tubulações em PVC têm maior significância na composição da energia incorporada em todos os cenários em análise. Isto deve-se ao peso específico e a taxa de energia incorporada no processo de fabricação, haja visto que a maior extensão de tubulações pertence ao material PEAD. A Energia Incorporada Secundária é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 - Energia incorporada secundária nos 4 cenários simulados

Cenários	EI_s^* (kWh/m ³)
1	8,01
2	8,01
3	4,43
4	4,39

EI_s^* : Energia Incorporada Secundária

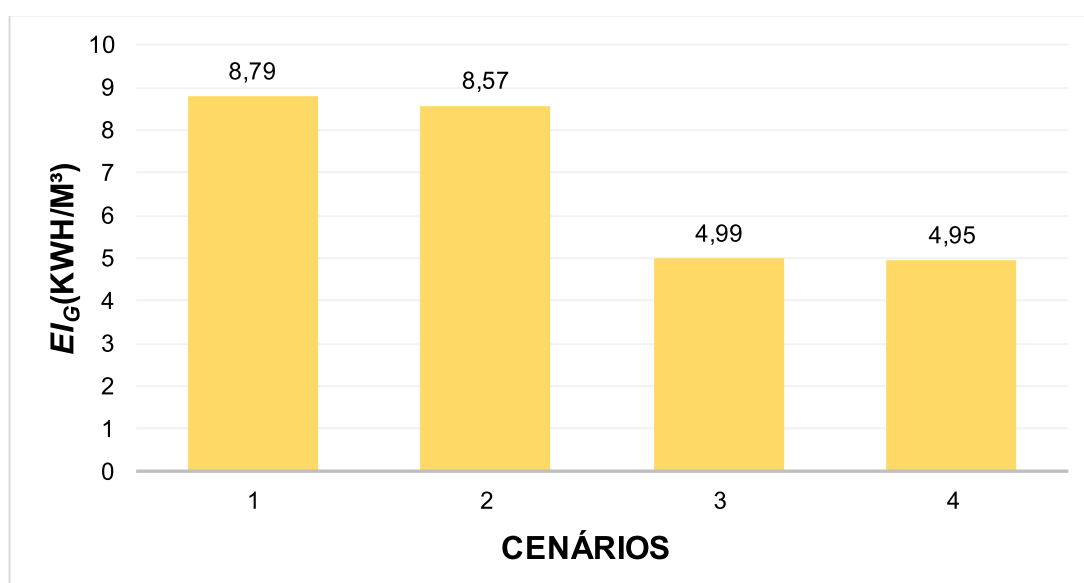
Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Tabela 23 a Energia Incorporada Secundária apresenta decréscimo a partir do cenário 3 devido ao aumento do volume faturado no SD 15.

4.9 ENERGIA INCORPORADA GLOBAL

A energia incorporada global apresenta através dos quatro cenários simulados resultados distintos de acordo com as ações propostas. A Figura 56 apresenta a energia incorporada global ao longo dos 4 cenários simulados.

Figura 56 - Energia incorporada ao longo dos 4 cenários simulados



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 56 apresenta no cenário 1 a maior Energia Incorporada para o processo de distribuição de água, visto que ainda não há nenhuma ação implementada no sistema de distribuição, alcançando o valor de 8,79 kWh/m³. No cenário 2 com o ingresso do turbogerador ocorre a redução da Energia Incorporada Principal, pois o conjunto motor bomba do SD15 é desativado refletindo de forma significativa na Energia Incorporada Global. A partir do cenário 3 o aumento do volume faturado para as mesmas taxas de energia incorporada confere uma redução da energia inserida por m³ no sistema de distribuição. Da mesma forma no cenário 4 a manutenção de um elevado volume faturado no SD15 reduz as taxas de Energia Incorporada, somado a isso, o controle de pressão e conseqüentemente a diminuição das perdas físicas. Isto projetado para todo o município vislumbra uma redução 43,6% da Energia Incorporada sendo esta decomposta em grandezas como o consumo

energético de 1083.124 kWh/mês, o volume faturado de 942556 m³/mês e o volume produzido de 2153.628 m³/mês.

Para o consumo energético e o volume captado o potencial é de redução e para o volume faturado há a possibilidade de aumento. Esta tendência corrobora para a perspectiva de uma distribuição de água sustentável ambiental, econômica e social, através destas três grandezas que exercem influência entre si. Desta forma, o cenário 4 une em síntese: produção consciente, acesso à água e a energia limpa conforme preconizam os objetivos do desenvolvimento estratégico ODSs 12,6 e 7.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa realizada buscou aproximar as questões ambientais do saneamento através de uma ferramenta que relacionasse os aspectos que contribuem para que a operação de sistemas de distribuição de água seja mais sustentável. O Diagrama 3Ss da distribuição de água aproxima esses conceitos quando propõe que a condição ótima de operação respeite a menor retirada de água dos mananciais, o uso eficiente dos recursos energéticos e a disponibilização de água tratada para todas as comunidades como preconiza os objetivos do desenvolvimento sustentável. O volume produzido, volume faturado e o balanço energético antes que no sistema de distribuição de água influenciam diretamente nos aspectos social, ambiental e econômico do desenvolvimento sustentável e, portanto, da cidade, onde este sistema está inserido. De forma a atingir os pressupostos ligados ao *triple bottom line* da sustentabilidade essas três grandezas se inter-relacionam e dependem da harmonia entre consumo, produção e energia para que o abastecimento seja viável economicamente e cumpra sua função social.

O trabalho situa-se num contexto em que recursos naturais são escassos frente ao crescimento populacional em que cidades e comunidades buscam tornar-se sustentáveis e deste modo contribuir para a sustentabilidade do planeta. Por isso a análise foi além do processo principal, discutindo o consumo energético e o uso de água no processo de fabricação de insumos necessários ao tratamento e a distribuição de água.

O sistema atual no SD 15, cenário 2 aponta que para cada m³ disponibilizado à população é necessário 8,57 kWh desde a produção de insumos às atividades inerentes ao abastecimento de água. A projeção do cenário 4 é que se possa com

redução das perdas aparentes e físicas reduzir essa taxa de energia incorporada para 4,95 kWh/m³. Da mesma forma para cada metro cúbico disponibilizado a população no cenário 2, a utilização de água no processo principal e nos demais processos secundários, cerca de 3,58 m³, quando o cenário projetado 4 vislumbra uma pegada hídrica possível de 1,36 m³.

A extração de recursos naturais, podem ser evitados com uma operação na distribuição de água que atentem ao consumo consciente e responsável. A renovação do parque de hidrômetros e o combate às fraudes na medição de água dos usuários, ações projetadas no cenário 3, é um bom exemplo. Na medida que ocorre a recuperação de consumos não-faturados, aumenta a percepção das comunidades sobre estes serviços, impulsionando a conscientização sobre o uso racional da água. O cenário 3 projeta recuperação de perdas aparentes na ordem de 45,6%.

A produção de água tratada resulta de uma equação que junta a demanda de consumo e os vazamentos ao longo de todo o processo contínuo de produção. Se forem diminuídos os vazamentos, cerca de 395,65 m³/dia, diferença entre o volume produzido do cenário 2 e o cenário 4, tem-se a redução potencial de 54,6 % do volume produzido para o SD15. Na esteira deste resultado, essa mesma redução de perdas físicas representa a não utilização de 125,3 l/dia de água durante a produção de sulfato de alumínio. Isto reforça que as perdas físicas representam um impacto ambiental que transcendem os limites das instalações, corroborando com o ICV realizado que descreve este impacto como uso de recursos naturais não-renováveis ou escassos.

Portanto, o estudo cumpre o objetivo principal de propor um sistema de distribuição que promova o abastecimento com o menor custo e menor retirada de água dos mananciais e que contemple os três pilares da sustentabilidade.

6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O trabalho remete a outros aspectos e impactos ambientais que precisam ser tratados e mensurados para que a sustentabilidade da distribuição de água seja plena. Há a necessidade de avaliação do lodo proveniente do tratamento de água (LETA) quanto ao seu impacto ambiental, bem como o potencial econômico do tratamento e da destinação adequada. Da mesma forma aprofundar o estudo do percentual de substituição das tubulações e seus respectivos materiais além do PVC e do PEAD acrescentando materiais como ferro fundido, polipropileno, entre outros.

O levantamento das emissões de carbono no sistema de distribuição de água e do sistema de esgotamento sanitário também se apresenta como um importante campo para pesquisa e desenvolvimento de técnicas e equipamentos com vistas a tornar estes processos cada vez mais viáveis do ponto de vista da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ALBERIZZIA, J. C.; RENZI, M.; NIGRO, A.; ROSSI, M. Study of a Pump-as-Turbine (PaT) speed control for a Water Distribution Network (WDN) in South-Tyrol subjected to high variable water flow rates. **Energy Procedia**, v. 148, p. 226-233, 2018.

ALEGRE, H.; BAPTISTA, J. M.; CABRERA JÚNIOR, E.; CUBILLO, F.; DUARTE, P.; HIRNER, W.; MERKEL, W.; PARENA, R. **Performance indicators for water supply services**. 2. ed. Londres: IWA Publishing, 2006.

AMANCO. **Amancowavin**, 2008. Disponível em: <http://amancowavin.com.br/produtos/infraestrutura/saneamento-agua>. Acesso em: 02 jul. 2020.

ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). **Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água: posicionamento e contribuições técnicas da ABES**. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: http://abes-dn.org.br/pdf/28Cbesa/Perdas_Abes.pdf. Acesso em: 02 jul. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14.040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR ISO 14.044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009b.

BARBOSA, P. R. **A. Índice de sustentabilidade empresarial da bolsa de valores de São Paulo (ISE-BOVESPA): Exame da adequação como referência para aperfeiçoamento da gestão sustentável das empresas e para formação de carteiras de investimento orientadas por princípios de sustentabilidade corporativa**. 2007. Dissertação (Mestrado em Administração) – Instituto COPPEAD de Administração, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BARROS FILHO, E. G. D. **Sistema inteligente para o controle de pressão de redes de distribuição de água abastecidas por bombas associadas em paralelo**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2016.

BIBRI, S. E.; KROGSTIE, J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. **Sustainable Cities and Society**, v. 31, p. 183-212, 2017.

BIOSETA. **Triple bottom line**. Disponível: <http://www.bioseta.com.br/wp-content/uploads/2014/10/triple.jpg>. Acesso em: 03 jul. 2020.

BOBAT, A. The preliminary results of smart water systems in mitigation of water losses. **Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 6, n. 12, p. 117-125, 2019.

CARAIBA METAIS. **Reaproveitamento da escória granulada do cobre**. Prêmio FIEB de desempenho ambiental. Dias d'Avila. 2002.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS (CNTL). **Princípios Básicos de Produção mais Limpa em Matadouros Frigoríficos**. SENAI-RS, 2003. Disponível em:

https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/manual_principios_de_pmais_l_em_frigorificos.pdf. Acesso em: 03 jul. 2020.

CES EduPak. Disponível em: <https://grantadesing.com/education/ces-edupack/>. Acesso em: 03 jul. 2020

COELHO, A. C. D. **Avaliação da aplicação da metodologia de produção mais limpa UNIDO/UNEP no setor de saneamento estudo de caso: EMBASA S.A.** 2004. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

COLTRO, L.; GARCIA, E. E. C.; QUEIROZ, G. D. C. Life cycle inventory for electric energy system in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, p. 290-296, 2003.

CONEJO, J. G. L.; LOPES, A. R. G.; MARCKA, E. **Medidas de redução de perdas elementos para o planejamento**. Brasília: Ministério das Cidades, 1999.

COPELLO, J. E. R. **Estratégias ambientais: Estudo de caso da Caraíba Metais (Bahia)**. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração) – MPA da Escola de Administração da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2003.

DONAIRE, D. **Gestão ambiental nas Empresas**. São Paulo: Atlas, 1999.

ECOINVENT. 2020. Disponível em:

<https://v30.ecoquery.ecoinvent.org/Account/LogOn?ReturnUrl=%2fSearch%2fIndex>. Acesso em: 02 abr. 2020.

EMPRESA BAIANA DE ÁGUAS E SANEAMENTO (EMBASA). **Relatório de Produção Mais Limpa-Barreiras**. EMBASA. Salvador. 2001.

EUROPEAN COMMISSION. **International reference life cycle data system: general guide for life cycle assesment**. [S.l.]: [s.n.], 2010.

FERREIRA, F. J. T. E.; FONG, J. A. C.; ALMEIDA, A. T. Ecoanalysis of variable-speed drives for flow. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 6, p. 2117-2125, 2011.

FERREIRA, R. C. D. Indicadores de eficiência energética adequados para regulação. **Programa de eficiência energética no saneamento**, 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=AnS0paT6lHo>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

FILION, Y.; MACLEAN, H. A.; KARNEY, B. Life-cycle energy analysis of a water distribution system. **Journal of infrastructure system**, v. 10, n. 3, p. 120-130, 2004.

FIORI, S. E. A. Avaliação qualitativa e quantitativa do reuso de águas cinzas em edificações. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 19-30, janeiro/março 2006.

FORSTINUS, N. O.; IKECHUKWU, N. E.; EMENIKE, M. P.; CHRISTIANA, A. O. Water and waterborne diseases: A review. **International Journal of Tropical Disease & Health**, v. 12. P. 1-14. 2016.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H-J.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; HISCHIER, R.; HELLWEG, S.; HUMBERT, S.; KÖLLNER, T.; LOERINCIK, Y.; MARGNI, M.; NEMECEK, T. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods**.ecoinvent report, n. 3, v. 2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007

FUNASA. **Manual de saneamento. Normas e diretrizes**. 5. ed. Brasília: FUNASA, 2019. 55-56 p. Disponível em: <www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/Manual_de_Saneamento_Funasa_5a_Edicao.pdf/278113a8-2cda-4b9f-8611-9087912c9dff>. Acesso em: 26 abr. 2020.

GERTEN, D.; HOFF, H.; ROCKSTRÖM, J.; JÄGERMEYR, J.; KUMMU, M.; PASTOR, A. V. Towards a revised planetary boundary for consumptive freshwater use: Role of environmental flow requirements. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 5, p. 551-558, 2013.

GIACOMIN, G. S.; OHNUMA JR., A. A pegada hídrica como instrumento de conscientização ambiental. **Revista Monografias Ambientais**, v. 7, p. 1517-1526, 2012.

GODSKESEN, B.; MERON, N.; RYGAARD. LCA of Drinking Water Supply. In: GODSKESEN, B.; MERON, N.; RYGAARD, M. **Life Cycle Assessment -Theory and Practice**. Springer International Publishing, 2018. Cap. 33, p. 836-840.

GOMES, A. Seminário gestão do uso de energia elétrica no Brasil-AESBE. **Docplayer**, 2013. Disponível em: <https://docplayer.com.br/21929918-Seminario-gestao-do-uso-da-energia-eletrica-no-saneamento.html>. Acesso em: 05 jul. 2020.

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água**: dimensionamento econômico e operações de redes e elevatórias. João Pessoa: Editora Universidade Federal da Paraíba, 2004.

GOMES, H. P. **Sistemas de saneamento**. João Pessoa: UFPB, 2010. 366 p.

GONÇALVES, E.; LIMA, C. V. **Guias práticos - Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água - Controle de pressões e operação de válvulas reguladoras de pressão**. Brasília: Ministério das Cidades, v. 4, 2007. 18-21 p.

GOTLIB, D.; KULISIEWICZ, T.; MURASZKIEWICZ, M.; OLSZEWSKI, R. Multiagency modeling of transformation strategies towards sustainable smart cities, **Applied Sciences**, v. 3, n. 10, 2020.

GRUPO DE SISTEMAS INTELIGENTES DE MANUFATURA (GSIGMA-UFSC). **O neurônio artificial**. 2020. Disponível em: https://www.gsigma.ufsc.br/~popov/aulas/rna/neuronio_implementacao/. Acesso em: 07 jul. 2020.

GUANAIS, A. L. R.; COHIM, E. B.; MEDEIROS, D. L. Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1187-1196, novembro/dezembro 2017.

HENRIQUES, L. P.; QUELHAS, O. L. G. Produção Mais Limpa: Um exemplo para as Organizações, 2007. Disponível em: http://www.sp.senac.br/hotsites/sigas/docs/20071016_CAS_ProducaoMaisLimpa.pdf. Acesso em: 23 nov. 2019.

HIGRA. **Apresentação usina compacta de hidrogeração anfíbia**. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal: [s.n.]. 2019.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K. The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. **Ecological Economics**, v. 64, p. 143-151, 2007.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC). **Manual sobre contratos de performance e eficiência para empresas de saneamento em Brasil**. 2013. Disponível em: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/45666c30-cf76-4318-a48f-8677e1f66941/WaterUtilityBrazilPortuguese.pdf?MOD=AJPERES&CVID=j--RHJf>. Acesso em: 02 abr. 2020.

KARADIREK, I. E. Urban water losses management in Turkey: The legislation and challenges. **Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering**, v. 17, n. 3, p. 572-584, 2016.

KINGDOM, B.; LIEMBERG, L.; MARIN, P. The challenge of reducing non revenue water (NRW) in developing countries. **Site do World Bank**. 2006. Disponível em: <documents.worldbank.org/curated/pt/385761468330326484/pdf/394050Reducing1e0water0WSS81PUBLIC1.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

LABORATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE (LASSU). Pilares da sustentabilidade. **Universidade de São Paulo**, 16 novembro 2019. Disponível em: <http://www.lassu.usp.br/sustentabilidade/pilares-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 02 jul. 2020.

LAMBERT, A.; TAYLOR, R. **Water loss guidelines**. [S.l.]: Water New Zealand, 2010. Disponível em: www.waternz.org.nz/Folder?Action=View%20File&Folder_id=101&File=100503_waterloss_guidelines.pdf. Acesso em: 02 jul. 2020.

LEFF, E. **Saber Ambiental, Sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder**. 8. ed. [S.l.]: Petrópolis: Vozes, 2011.

MANSI, P.; MARVADI, B.M.; PATEL, A.; PRAKASH, I. Planning of water distribution network, using GIS techniques. **International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology**, v. 4, n. 2, p. 1-6, 2016.

MARCKA, E. **Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água**. Brasília: Ministério das Cidades, 2004.

MENEZES, T. D. V. *et al.* **Uma Análise do uso de Inversores de Frequência em Sistemas de Abastecimento de Água para Redução do Consumo de Energia elétrica e Água**. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Recife: [s.n.]. 2008

MIRANDA, E. C. D. **Avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água – Indicadores de perdas e metodologias para análise de confiabilidade**. 2002. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

MUNDOGEO. O uso de Sistemas de informações geográficas na operação de sistemas de distribuição de água. **MundoGeo**, 04 dezembro 2010. Disponível em: <https://mundogeo.com/2000/01/01/o-uso-de-sistemas-de-informacoes-geograficas-na-operacao-de-sistemas-de-distribuicao-de-agua/>. Acesso em: 17 jan. 2020.

NETTO, J. M. A. **Manual de Hidráulica**. São Paulo. 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). 17 Objetivos para transformar o mundo. **Nações Unidas**, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/>. Acesso em: 17 jan. 2020.

PATERSON, W.; RUSHFORTH, R.; RUDDLELL, B. L.; KONAR, M.; AHAMS, I. C.; GIRONÁS, J.; MIJIC, A.; MEJIA, A. Water footprint of cities: A review and suggestions for future research. **Sustainability**, v. 7, p. 8461-8490, 2015.

PRESCOTT, S. L.; ULANICK, B. Improved Control of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 1, p. 56-65, 2008.

REDE LENHS. **Rede LENHS UFPB**. Universidade Federal da Paraíba, 2010. Disponível em: http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=32. Acesso em: 19 jan. 2020.

SALVINO, M. M. **Método de dimensionamento e controle operacional otimizado para redes de distribuição de água**. Rede LENHS UFPB, João Pessoa, 2010. Disponível em: www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=472. Acesso em: 19 jan. 2020.

SANTOS, D. D. **Avaliação da metodologia para controle de perdas de água em sistema de distribuição no Recife-PE**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SÃO LEOPOLDO. **Decreto nº 8165, de 14 de julho de 2015**. Estabelece o regulamento dos serviços prestados pelo Serviço Municipal de Água e Esgotos - SEMAE, consolidando a legislação sobre a matéria. São Leopoldo, RS: Prefeitura

Municipal, 2015. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/rs/s/sao-leopoldo/decreto/2015/816/8165/decreto-n-8165-2015-estabelece-o-regulamento-dos-servicos-prestados-pelo-servico-municipal-de-agua-e-esgotos-semae-consolidando-a-legislacao-sobre-a-materia>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SARZEDAS, G. L. **Planejamento para substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água. Aplicação na rede de distribuição de água na região metropolitana de São Paulo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SEATTLE PUBLIC UTILITIES. **2013 water system plan our water. Our future**. Seattle: [s.n.], v. 1, 2012. Disponível em: www.seattle.gov/Documents/Departments/SPU/Documents/2013WaterSystemPlanVolumel.pdf. Acesso em: 04 jul. 2020.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Perfil das cidades gaúchas**. SEBRAE. Porto Alegre. 2020.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI) Unidade CETIND. **Relatórios das 16 unidades da EMBASA**. EMBASA. Salvador. 2001.

SILVA, V. P. R.; ALEIXO, D. O.; DANTAS NETO, J.; MARACAJÁ, K. F. B.; ARAÚJO, L. E. Uma medida de sustentabilidade ambiental: Pegada hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 100-105, 2013.

SILVA, W. L. V. **Um modelo de seleção de materiais com abordagens complementares: O uso da logística aplicada a empresas do setor minero metalúrgico**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SISTEMA COMERCIAL INTEGRADO - SERVIÇO MUNICIPAL DE ÁGUAS E ESGOTOS (SCI SEMAE). **SCI**, 2018. Disponível em: <http://sci.semae.rs.gov.br:5050/Relatorio/RelatoriosReportingService?tpRelatorio=8735&modulo=7>. Acesso em: 25 jul. 2020.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS GEOSEMAE. **GEOSEMAE**, 2017. Disponível em: <https://semae.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=cd247855090440a0bbd74c60d0ffe820&extent=-51.1468,-29.7562,-51.1359,-29.7494>. Acesso em: 18 jul. 2020.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Brasília: Ministério das Cidades, 2013.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento-glossário de informações**. Brasília. 2018.

SOUZA, M. A. T. Repositório jesuíta. **Avaliação energética, ambiental e econômica de bombas de cavidades progressivas com rotores produzidos a partir de diferentes materiais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

SPOSTO, R. M.; PAULSEN, J. S. Sustentabilidade na construção civil: Avaliação do Ciclo de Vida energético e de emissões de CO₂ de fachadas para habitações sociais. **Arquitetura e Urbanismo**, p. 40-49, 2014.

TARDELLI FILHO, J. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. **Revista DAE**, p. 06-20, 2016.

TARDELLI FILHO, J. Controle e Redução de Perdas. In: TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 2. ed. São Paulo: São Paulo, 2004. Cap. 10, p. 457-525.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. São Paulo: ABES, 2004.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). **Best practices to consider when evaluating water conservation and efficiency as an alternative for water supply expansion**. Washington, 63 p. 2016.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). **Water audits and water loss control for public water systems**. 2013. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/epa816f13002.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2020.

UHR, J. G. Z.; SCHMECHEL, M.; UHR, D. A. P. Relação entre saneamento básico no Brasil e saúde da população sob a ótica das internações hospitalares por doenças de veiculação hídrica. **Revista de Administração, Contabilidade e Economia da Fundace**, Ribeirão Preto, v. 7, p. 01-16, 2016.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Declaração Internacional sobre Produção Mais Limpa**. 1999. Disponível em: <http://www.unep.fr/scp/cp/network/pdf/portuguese.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2020.

VERMERSCH, M.; CARTEADO, F.; RIZZO, A.; JOHNSON, E.; ARREGUI, F.; LAMBERT, A. **Guidance notes on apparent losses and water loss reduction planning**. Programme Solidarité Eau, 2016. Disponível em: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/wlranda_free_guidance_notes_on_apparent_losses_water_loss_reduction_planning_2016.pdf. Acesso em: 03 jul. 2020.

VERMESCH, M.; CARTEADO, F. **Water meter policy – The Macao city case**. Second ADKOM Water Loss Conference. Ohrid: [s.n.]. 2008.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M.; HEINEN, L. G. **Introdução à engenharia ambiental**. Tradução de Arlete Sousa; Marileide Gomes e Monica Aguiar. São Paulo: Cengage Learning edições Ltda., 2018.

WATERFOOTPRINT. **Waterfootprint**, 2013. Disponível em: <https://waterfootprint.org/en/>. Acesso em: 16 fev. 2020.

WERNER, E. M.; BACARJI, A. G.; HALL, R. J. Produção Mais Limpa: Conceitos e Definições Metodológicas. *In*: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA (SEGeT), 2009, Resende. **Anais eletrônicos** [...]. Resende: Associação Educacional Dom Bosco, 2009. Disponível em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos09/306_306_PMaisL_Conceitos_e_Definicoes_Metodologicas.pdf. Acesso em: 23 nov. 2019.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B. The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. **International Journal Life Cycle Assessment**, v. 21, p. 1218-1230, 2016.

WIESEN, K.; WIRGES, M. From cumulated energy demand to cumulated raw material demand: the material footprint as a sum parameter in life cycle assessment. **Energy, Sustainability and Society**, v. 7, p. 13, 2017.

APÊNDICE A - SIMULAÇÕES DO CENÁRIO 2 (A) E CENÁRIO 3 (B)

Figura 57 - Simulações do cenário 2 (A) e cenário 3 (B)



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B - LEVANTAMENTO DOS ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS DO CENÁRIO 3 E 4

Quadro 10 - Levantamento dos aspectos e impactos ambientais do cenário 3

(continua)

Processo	Aspectos	Impactos	A	Se	F	R	Si	%
Elevatória de água bruta	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Água bruta	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,67
Estação de tratamento de água	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	4	1	8	2,67
	Geração de efluente líquido	Contaminação da água	2	2	4	1	9	3,00
	Geração de resíduo sólido	Contaminação do solo	2	2	4	1	9	3,00
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Produtos químicos	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
Elevatória de água tratada	Água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Adução de água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,33
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,67
	Energia hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	1	1	8	2,67
Reservatório apoiado	Água tratada aduzida	Alteração da qualidade da água	1	2	4	1	8	2,67
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,67
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água	3	2	4	1	10	3,33
	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
Turbogerador	Energia hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água	2	2	1	1	6	2,00

(conclusão)

	Geração de energia elétrica	Redução do uso de Recursos naturais	2	1	4	1	8	2,67
Distribuição zona alta	Água aduzida turbogerador	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Água distribuída	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,67
	Minérios	Depleção de recursos minerais	4	2	4	1	11	3,67
	Tubos em PVC	Depleção de recursos minerais fósseis	4	2	4	1	11	3,67
	Resíduos de tubulações	Depleção de recursos minerais fósseis	4	2	4	1	11	3,67
	Água consumida	Alteração da qualidade da água	3	2	1	1	7	2,33
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	2	2	4	1	9	3,00
	Resíduos de escavações	Depleção de recursos minerais	4	2	4	1	11	3,67

Abrangência (A), Severidade (Se), Frequência (F), Risco (R) e Significância (Si)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 11 - Levantamento dos aspectos e impactos ambientais do cenário 4

(continua)

Processo	Aspectos	Impactos	A	Se	F	R	Si	%
Elevatória de água bruta	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,86
	Água bruta	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,51
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,51
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,75
Estação de tratamento de água.	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,86
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	4	1	8	2,81
	Geração de efluente líquido	Contaminação da água	2	2	4	1	9	3,16
	Geração de resíduo sólido	Contaminação do solo	2	2	4	1	9	3,16
	Água bruta aduzida	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,51
	Água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,51
	Produtos químicos	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,86
Elevatória de água tratada	Água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,51
	Consumo de energia elétrica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,86
	Adução de água tratada	Uso de Recursos naturais	3	2	4	1	10	3,51
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,75
	Energia hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	1	1	8	2,81
Reservatório apoiado	Água tratada aduzida	Alteração da qualidade da água	1	2	4	1	8	2,81
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	1	2	1	1	5	1,75
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água	3	2	4	1	10	3,51
	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,86
Turbogerador	Energia hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,86
	Água aduzida gravidade	Alteração da qualidade da água	2	2	1	1	6	2,11
	Geração de energia elétrica	Redução do uso de Recursos naturais	2	1	4	1	8	2,81
Distribuição zona alta	Água aduzida turbogerador e ou elevado	Uso de Recursos naturais	2	2	4	1	9	3,16

	Energia Hidráulica	Uso de Recursos naturais	4	2	4	1	11	3,86
	Água distribuída	Uso de Recursos naturais	2	2	4	1	9	3,16
	Minérios	Depleção de recursos minerais	4	2	1	1	8	2,81
	Tubos em PVC	Depleção de recursos minerais fósseis	4	2	1	1	8	2,81
	Resíduos de tubulações	Depleção de recursos minerais fósseis	4	2	1	1	8	2,81
	Água consumida	Alteração da qualidade da água	3	2	4	1	10	3,51
	Perdas físicas	Uso de Recursos naturais	2	2	2	1	7	2,46
	Resíduos de escavações	Depleção de recursos minerais	4	2	1	1	8	2,81

Abrangência (A), Severidade (Se), Frequência (F), Risco (R) e Significância (Si)

Fonte: Elaborado pelo autor.