

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA AMBIENTAL**

LUCAS APOENA VERCESI DO ROSÁRIO (GRR20182455)

**Proposição de Uma Planta de Osmose Inversa (RO) e Destilação a Múltiplos Efeitos
(MSF) Utilizando Como Aporte a Incineração de RSU e Concentração Solar**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2023

LUCAS APOENA VERCESI DO ROSÁRIO

**Avaliação Termoeconômica da Produção Combinada de Eletricidade e Água
Dessalinizada a Partir da Energia Solar e da Queima de Resíduos Sólidos Urbanos no
Município de Paranaguá/PR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção
do título de Engenheiro
Ambiental da Universidade Federal do Paraná.

Professor Orientador: Marcelo Risso Errera, Ph. D.
Co-orientador: José Joaquim Conceição Soares Santos

Curitiba

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

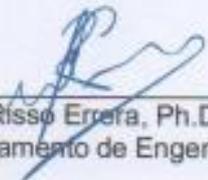
TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

LUCAS APOENA VERCESI DO ROSÁRIO

AVALIAÇÃO TERMOCONÔMICA DA PRODUÇÃO COMBINADA DE ELETRICIDADE E ÁGUA DESSALINIZADA A PARTIR DA ENERGIA SOLAR E DA QUEIMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE PARANAGUÁ/PR

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 88 (oitenta e oito), pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):


Marcelo Rizzo Errera, Ph.D.
Departamento de Engenharia Ambiental

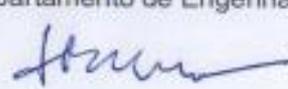
Co-orientador(a):


Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos
Departamento de Engenharia Mecânica - UFES

Membro(a) 1:


Dr. Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental

Membro(a) 2:


George Stanescu, D. Sc.
Departamento de Engenharia Mecânica (aposentado)

Curitiba, 23 de fevereiro de 2023

Curitiba, 10 de fevereiro de 2023.

RESUMO

Do Rosário, Lucas Apoena. Análise Termoeconômica Para Instalação de Planta de Dessalinização no Município de Paranaguá – PR: Avaliação Termoeconômica da Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada a partir da Energia Solar e da Queima de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Paranaguá/PR. 2021. Trabalho de conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Paraná.

Este trabalho trata do nexo geração de energia elétrica obtidas através de fontes renováveis, abastecimento de água potável e tratamento de resíduos sólidos urbanos. Juntos, cada um deles está respectivamente associado a questões de grande importância do momento, quais sejam, escassez hídrica, econômica, tratamento e destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU) e redução de emissões de gases de estufa para atenuar a aceleração das mudanças climáticas. Em Paranaguá, no estado do Paraná, não é diferente: diversos fatores, incluindo os citados, influenciam na caracterização da situação atual do município e demonstram suas fragilidades. Propõe-se, assim, uma possibilidade para os três temas para a cidade de Paranaguá através da concepção e análise de uma planta de dessalinização de água do mar, de processamento de resíduos sólidos urbanos e geração de energia elétrica excedente para o município e ainda combinada com energia solar térmica. A análise da planta foi iniciada com a definição da estrutura desta, logo após foram feitas algumas hipóteses e simplificações, definição das condições do ambiente e definição dos estados das correntes que compõe a planta (estes baseados na bibliografia). O aporte de RSU estimado foi de 1,43 kg/s (123,55 ton/dia), capaz de gerar no incinerador 14,3 MJ/s em forma de calor para o gerador de vapor. Este aporte de energia em forma de calor teve o mesmo valor para o suprimento oriundo da planta de concentração solar. Foram apresentadas também, considerações, acerca dos equipamentos que compõe a planta. Assim, aplicando as leis e equações termodinâmicas apresentadas na revisão bibliográfica, e também os conceitos da termoeconomia. Os valores de fluxo de energia, fluxo de exergia, custo exergético e custo exergético unitário para cada corrente foram determinados e para os volumes de controle foi determinada a geração de entropia, geração de irreversibilidades, destruição de exergia, eficiência energética e eficiência exergética. A taxa total de geração de irreversibilidades para o aporte da planta de incineração de RSU obtida foi 10.851 kW enquanto que, para o aporte de concentração solar o valor obtido para este total foi de 9.400 kW. Já a taxa de destruição de exergia para o aporte de calor fornecido pela incineração de RSU foi de 9.478 kW, enquanto que para o aporte da concentração solar este valor foi de

8.026 kW. A produção estimada de água dessalinizada foi de aproximadamente $3.637 \text{ m}^3/\text{dia}$ (MSF) e $9.573 \text{ m}^3/\text{dia}$ (RO), totalizando para a planta o atendimento de aproximadamente 136.604 habitantes. Já a energia entregue para a rede foi de aproximadamente $3,4 \text{ MWh}$ ($81,6 \text{ MWdia}$) para o aporte da incineração de RSU, enquanto no aporte de calor advindo da concentração solar foi aproximadamente $3,2 \text{ MWh}$ ($76,8 \text{ MWdia}$).

Palavras-Chave: Dessalinização. Análise Exergética. Termoeconomia. Resíduos Sólidos Urbanos. Energia Solar. Paranaguá-PR.

ABSTRACT

Do Rosário, Lucas Apoena. Termoeconomic Analysis for Installing a Desalination Plant in the City of Paranaguá – PR: Termoeconomic Evaluation of the Combined Production of Electricity City of Paranaguá/PR. 2021. Final paper for the bachelor's degree in Environmental Engineering at the Federal University of Paraná.

This work deals with the nexus of generating electricity from renewable sources, supplying drinking water and treating urban solid waste. Together, each one of them is respectively associated with issues of great importance at the moment, namely, water economy, economics, treatment and disposal of solid urban waste (MSW) and reduction of greenhouse gas emissions to mitigate climate change. In Paranaguá, in the state of Paraná, it is no different: several factors, including those mentioned, influence the characterization of the current situation in the municipality and demonstrate their emotions. Thus, a possibility is proposed for the three themes for the city of Paranaguá through the design and analysis of a seawater desalination plant, urban solid waste processing and surplus electricity generation for the municipality and even combined with thermal solar energy. The analysis of the plant started with the definition of its structure, soon after some hypotheses and simplifications were made, definition of the environmental conditions and definition of the states of the currents that make up the plant (these based on the bibliography). The estimated amount of MSW was 1.43 kg/s (123.55 ton/day), capable of generating 14.3 MJ/s in the form of heat for the steam generator in the incinerator. This input of energy in the form of heat had the same value as the supply from the solar concentration plant. Considerations about the equipment that make up the plant were also compensated. Thus, applying the laws and considering simplified thermodynamics in the bibliographic review, and also the concepts of thermoeconomics. The values of energy flow, exergy flow, exergy cost and unitary exergy cost for each stream were determined and for the control volumes entropy generation, irreversibilities generation, exergy destruction, energy efficiency and exergy efficiency were determined. total generation of irreversibilities for the contribution of the treated MSW incineration plant was 10,851 kW while, for the contribution of solar concentration, the value obtained for this total was 9,400 kW. The exergy destruction rate for the heat input provided by MSW incineration was 9,478 kW, while for the solar concentration input this value was 8,026 kW. The estimated production of desalinated water was approximately 3,637 m^3/dia (MSF) and 9,573 m^3/dia (RO), totaling approximately 87,423 inhabitants for the plant. The energy delivered to the grid was approximately 3.4 MWh (81.6

MWday) for the input of MSW incineration, while the input of heat from solar concentration was approximately 3.2 *MWh* (76.8 *MWday*).

Key Words: Desalination. Exergy Analysis. Termoeconomic. Urban solid waste. Solar energy. Paranagua-PR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Panorama da Escassez de Água a Nível Mundial.	16
Figura 2 - Mapa do Índice de Segurança Hídrica.	19
Figura 3 - Exemplo de uma ETA.	23
Figura 4 - Estação de tratamento de esgoto Santa Quitéria, Curitiba/PR.	25
Figura 5 - Representação de um sistema de energia solar térmica concentrada.	33
Figura 6 - Tecnologias de concentração solar.....	33
Figura 7 - Aterro controlado do Jóquei, conhecido como lixão da Estrutural, Brasília/DF.....	36
Figura 8 - Exemplo de planta de incineração (tipo: Rotary Klin).....	38
Figura 9 - Órgãos da Prefeitura Municipal de Paranaguá responsáveis pela gestão de Resíduos sólidos no município de Paranaguá.	67
Figura 10 - Diagrama simplificado para produção de energia elétrica e água dessalinizada utilizando sistema híbrido a partir da incineração de RSU utilizando aporte de energia solar.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da água com relação a salinidade.....	26
Tabela 2 - Classificação da água segundo CONAMA 357/2005.....	26
Tabela 3 - Comparação entre tecnologias de dessalinização.	31
Tabela 4 - Propriedades relevantes para uso da biomassa na geração de energia..	35
Tabela 5 - Quantificação por tipologia de tratamento/destinação por região do Brasil.	36
Tabela 6 - Composição dos RSU a nível global.....	37
Tabela 7 - Acumulados de precipitação para o município (1925-2019).	54
Tabela 8 - Classificação da Vegetação no Município de Paranaguá.	55
Tabela 9 - Caracterização das AEG's presentes no município de Paranaguá.	57
Tabela 10 - Demanda hídrica atual calculada para Paranaguá.....	59
Tabela 11 - Índice de desenvolvimento Humano e taxa de pobreza por município do litoral paranaense.....	65
Tabela 12 - Indicadores socioeconômicos do município de Paranaguá.....	66
Tabela 13 - Composição e geração de RSU estimadas no município de Paranaguá conforme as taxas do PERS/PR e a população estimada pelo IBGE para 2020.	68
Tabela 14 - Parâmetros do Ar Atmosférico e Água do Mar em Paranaguá.	76
Tabela 15 - Propriedades de estado morto utilizadas no estudo.....	78
Tabela 16 - Correntes da planta proposta e seus respectivos estados.....	79
Tabela 17 - Porcentagem em Massa (RSU).....	84
Tabela 18 – Proporção de Elementos Químicos Presentes no RSU a Partir da Matéria Orgânica.....	85
Tabela 19 - Valores para o Balanço de Energia na Incineração de RSU.....	86
Tabela 20 - Recursos e produtos para os subsistemas da planta proposta, utilizando o aporte advindo da queima de RSU.	96
Tabela 21 - Recursos e produtos para os subsistemas da planta proposta, utilizando o aporte advindo da concentração solar.	96
Tabela 22 - Matriz de incidência - aporte RSU.....	97
Tabela 23 - Equações auxiliares para o cálculo dos custos exergéticos das correntes da planta para aporte da incineração de RSU.....	98
Tabela 24 - Matriz de incidência aumentada - aporte RSU.....	99
Tabela 25 - Matriz de incidência - aporte PTC.	100
Tabela 26 - Equações auxiliares para o cálculo dos custos exergéticos das correntes da planta para aporte PTC.	101
Tabela 27 - Matriz de incidência aumentada - aporte energia solar.....	102
Tabela 28 - Fluxos de energia e exergia, custo exergético e custo exergético unitário para aporte de incineração de RSU.	103
Tabela 29 - Balanço de exergia para os subsistemas da planta com aporte de RSU.	104

Tabela 30 - Taxa de geração de entropia, destruição de exergia, irreversibilidades e eficiências paras os subsistemas da planta com aporte de RSU.	104
Tabela 31 - Fluxos de energia e exergia, custo exergético e custo exergético unitário para aporte da concentração solar.	105
Tabela 32 - Balanço de exergia para os subsistemas da planta com aporte da concentração solar.	106
Tabela 33 - Taxa de geração de entropia, destruição de exergia, irreversibilidades e eficiências paras os subsistemas da planta com aporte da concentração solar.	106

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 - Fluxos básicos do processo de dessalinização.....	26
Fluxograma 2 - Métodos de dessalinização.	27
Fluxograma 3 - Destilação multietapa por efeito flash (MSF).....	29
Fluxograma 4 - Subsistemas do processo de osmose inversa.	30
Fluxograma 5 – Processos e rotas para conversão de biomassa em energia.	34
Fluxograma 6 - Fluxos básicos para uma Planta Dual com Sistema Híbrido.	39
Fluxograma 7 - Central térmica exemplo em seu nível máximo de agregação.	46
Fluxograma 8 - Execução de coleta convencional de RSU no município de Paranaguá.....	69
Fluxograma 9 - Execução dos serviços de limpeza pública no município de Paranaguá.....	71
Fluxograma 10 - Volume de Controle 03.....	80
Fluxograma 11 - Volume de Controle 05.....	81
Fluxograma 12 - Volume de Controle 07.....	81
Fluxograma 13 - Estrutura Física CTV - MED.....	118

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Município de Paranaguá/PR.	53
Mapa 2 - Geologia no município de Paranaguá.	56
Mapa 3 - Tipificação dos solos.	57
Mapa 4 - Enquadramento proposto para as AEG's.	58
Mapa 5 - Domínios hidrogeológicos e poços outorgados.....	60
Mapa 6 - Sistemas de abastecimento de água potável em Paranaguá e sua área de abrangência.....	61
Mapa 7 - Sistema de esgotamento sanitário de Paranaguá.....	63
Mapa 8 - Setores de coleta convencional no município de Paranaguá.....	70
Mapa 9 - Unidades de destinação final de resíduos no município de Paranaguá.	72
Mapa 10 - Localização da Planta Proposta.....	89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperaturas médias anuais em Paranaguá.	54
Gráfico 2 - Evolução do consumo de energia elétrica em Paranaguá (2010-2018).	64
Gráfico 3 - Taxa de crescimento anual da população residente total- Paranaguá e Paraná - 1991-1980 - 2019/2011.	65
Gráfico 4 - Irradiação média para o município de Paranaguá.	67
Gráfico 5 - Composição dos resíduos sólidos urbanos no Estado do Paraná.....	68
Gráfico 6 - Taxa de geração de entropia para as unidades de dessalinização, turbina + gerador e gerador de vapor.....	108
Gráfico 7 - Taxa de geração de entropia para motores + bombas, bifurcações e junção.....	109
Gráfico 8 - Taxa de geração de irreversibilidades para as unidades de dessalinização, turbina + gerador e gerador de vapor.	110
Gráfico 9 - Taxa de geração de irreversibilidades para motores + bombas, bifurcações e junção.	111
Gráfico 10 - Taxa de destruição de exergia para as unidades de adução de água do mar, dessalinização, turbina + gerador e gerador de vapor.	112
Gráfico 11 - Taxa de destruição de exergia para motore + bomba de condensado, bifurcações e junção.	113
Gráfico 12 – Eficiência exergética para bifurcação 1.0, motor + bomba 1, TVC + gerador e gerador de vapor.....	114
Gráfico 13 - Eficiência exergética para junção 1.0, bifurcação 1.1, motor + bomba 3, unidade Ro e unidade MSF.....	115
Gráfico 14 - Eficiência energética dos equipamentos.	116

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Motivação.....	17
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Estrutura.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Tratamento de Água.....	22
2.1.1	Estações de Tratamento de Água (ETA).....	22
2.1.2	Tratamento de Água de Esgotamento Sanitário (ETE).....	24
2.1.3	Dessalinização.....	25
2.2	Energia.....	32
2.2.1	Energia Solar.....	32
2.2.2	Energia de Biomassa.....	33
2.3	Planta Dual: Cogeração e Dessalinização Híbrida.....	38
2.4	Fundamentos de Termoeconomia.....	40
2.4.1	Termodinâmica.....	41
2.4.2	Formulação.....	47
3	ESTUDO DE CASO – PARANAGUÁ, LITORAL PARANAENSE.....	52
3.1	Município de Paranaguá/PR.....	52
3.2	Clima.....	54
3.3	Cobertura Vegetal.....	55
3.4	Relevo.....	55
3.5	Solos.....	56
3.6	Hidrografia.....	57
3.7	Sistema de Abastecimento de Água Potável.....	60
3.8	Descrição do Sistema de Esgotamento Sanitário.....	62
3.9	Caracterização Elétrica.....	64
3.10	Caracterização Sócio Econômica.....	64
3.11	Radiação Solar.....	66

3.12	Resíduos Sólidos Urbanos	67
3.12.1	Coleta Convencional	69
3.12.2	Limpeza Pública	70
3.12.3	Destino Final dos Resíduos Sólidos Urbanos em Paranaguá	71
4	METODOLOGIA	73
4.1	Planta Proposta	73
4.2	Dados de Entrada para a Modelagem	74
4.2.1	Simplificações	75
4.2.2	Condição Ambiente	76
4.2.3	Propriedades Termodinâmicas	76
4.2.4	Estado Morto	78
4.2.5	Estados e Correntes	79
4.2.6	PTC	83
4.2.7	Resíduos Sólidos Urbanos	84
4.2.8	Turbina de Contrapressão e Gerador	87
4.2.9	Motor e Bomba	87
4.2.10	Unidade MSF	87
4.2.11	Unidade RO	87
4.2.12	Captação de Água do Mar	88
4.3	Modelagem	93
4.3.1	Cálculo nas Correntes e Volumes de Controle	93
4.3.2	Balances Ciclo a Vapor	94
4.3.3	Balances Unidade de Dessalinização	95
4.3.4	Matriz F – P – L	95
4.3.5	Custos Exergéticos Com Aporte da Incineração de RSU	97
4.3.6	Custos Exergéticos Com Aporte da Incineração de RSU	100
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
5.1	Aporte de RSU	103
5.2	Aporte PTC	105
5.3	Capacidade de Geração de Energia Elétrica e Água Dessalinizada	106
5.4	Custos exergéticos e custos exergéticos unitários	116
5.5	Comparação com a Bibliografia	117
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	119

6.1	Recomendações para Trabalhos Futuros	121
6.1.1	Atribuição de Custos Monetários	121
6.2	Alocação de CO₂	121
6.2.1	Variação no Aporte de Energia para as Unidades de Dessalinização	121
6.2.2	Tratamento do Rejeito – Salmoura	121
6.2.3	Exergias Químicas das Correntes.....	122
6.3	Cenário Temporal	122
6.4	Análise de Equipamentos Reais.....	122
6.5	Locação da Planta.....	122
6.6	Concentração Solar.....	123
6.6.1	Outros Potenciais do Município	123
	REFERÊNCIAS.....	124
7	APÊNDICE	138
7.1	Mapas Relevantes Para Caracterização Local (Plano diretor do Município de Paranaguá)	138
7.2	Códigos <i>Interactive Thermodynamics</i> V3.1 para os Volumes de Controle.....	143

1 INTRODUÇÃO

Embora a quantidade de água seja abundante no planeta Terra, esta não reflete na sua disponibilidade. A parcela de águas “doces” é de somente 3% do total (sendo os outros 97 % relativos aos oceanos), desta fração de águas doces aproximadamente 2% estão nas geleiras, assim restando somente 1% disponível para consumo (WWF-Brasil, 2021).

Além disso, a distribuição espacial ao redor do globo da disponibilidade hídrica também é bastante irregular. Dados apontam que 27% dos recursos hídricos estão concentrados em apenas 5 rios (Agência Brasil, 2018). Muitas regiões e países sofrem com a escassez da água devido as suas condições geográficas.

Fatores como o clima e hidrografia influenciam muito na oferta de água, entretanto muitas vezes a baixa oferta se dá também por fatores econômicos relacionados à infraestrutura, os múltiplos usos dos recursos hídricos e controle da qualidade da água. A Figura 1 a seguir apresenta parte deste quadro:

Figura 1 - Panorama da Escassez de Água a Nível Mundial.



Fonte: IWMI (International Water Management Institute).

A escassez física se concentra na parte norte do continente africano, oriente médio e norte asiático. Na América do Sul, parcela oceânica da Ásia e em quase todo o continente africano a escassez também possui um fator econômico. Uma vez que para a gestão dos recursos hídricos há uma necessidade de altos investimentos, em especial onde não há grande disponibilidade de água doce em rios e aquíferos.

No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Economia da Fundação Getulio Vargas (FGV IBRE) e INTERÁGUAS para a população de 204 milhões de habitantes, contabilizando 5177 municípios, soma-se um total de 1640 prestadores de serviços de saneamento. Dos quais 64,8% são geridos pela administração pública e 25,9% são autarquias. A abrangência do atendimento do fornecimento de água no ano de 2010 era de 92,4% no ano de 2010, aumentando para 92,9% no ano de 2019 ((FGV IBRE, 2020).

No setor energético, a expansão das fronteiras do conhecimento auxilia cada vez mais na tomada de decisões, uma destas ferramentas é a termoeconomia, que, de forma simplificada, busca a combinação de análise exérgica e princípios econômicos. As formulações da Termodinâmica Clássica introduzem conceitos como o de entalpia, transferência de calor e trabalho, entropia, balanços, entre outros. Com as quais é possível modelar processos e com isto visualizar fontes de ineficiência e possibilidades de melhoria.

O Brasil é um país com dimensões continentais, e embora a disponibilidade de recursos hídricos seja uma das maiores no mundo, ainda enfrenta inúmeros problemas com relação ao abastecimento de água. A falta do acesso a este recurso acarreta vários passivos sociais como por exemplo diminuição do desenvolvimento econômico, dos índices de saúde, qualidade de vida e bem-estar social. A garantia do fornecimento de água, o uso eficaz e o tratamento de águas residuais representam uns dos desafios mais importantes para o país e seu desenvolvimento.

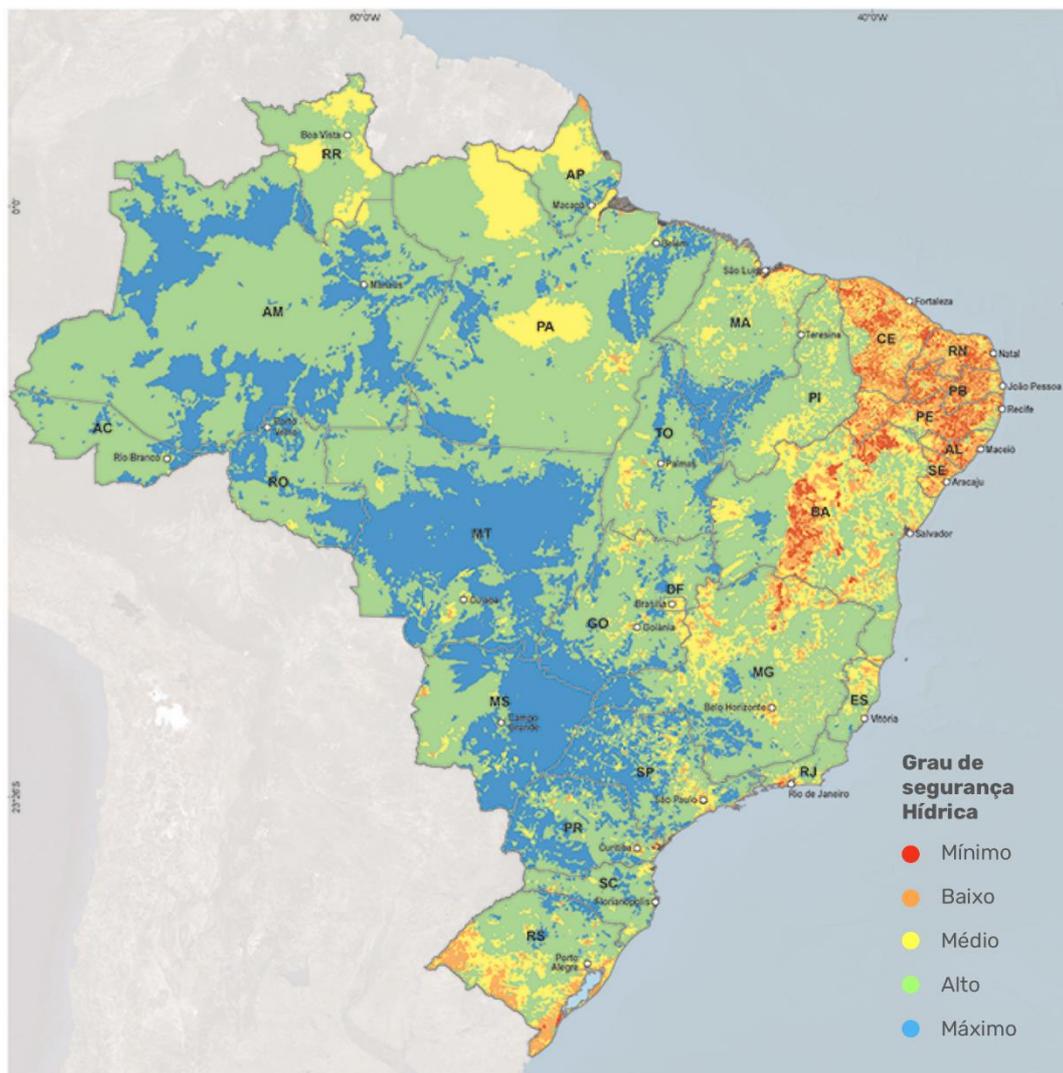
O nexos da água com o desenvolvimento também envolve a produção de energia elétrica, pois esta também é um insumo essencial para o desenvolvimento humano. Em países como o Brasil, aonde a matriz energética é baseada na geração hidrelétrica a relação entre água e energia é ainda mais relevante. Os recursos hídricos e energéticos se relacionam de diversas maneiras, dentre as quais podemos citar a própria geração de energia, com a crise de recursos hídricos a produção de energia elétrica é comprometida. O inverso também ocorre, pois, estações de tratamento de água demandam de aporte energético para sua operação.

1.1 Motivação

Tendo em vista a fragilidade do sistema de abastecimento de água no Brasil e também a nível mundial, o crescimento da população, que diretamente irá aumentar o consumo de água e de energia elétrica. Crescimento este que também aumentará os passivos ambientais, como a geração de resíduos sólidos. Assim a demanda de soluções para estas três problemáticas torna-se cada vez mais relevante, além, da busca por soluções sustentáveis inerente a inúmeros outros problemas pelos quais o planeta passa.

Historicamente a região que mais sofre com a disponibilidade hídrica no país é a região nordeste (PNSH, ANA, 2022), porém para apresentar o problema fora de uma escala global e genérica, trazendo este para uma realidade próxima a vivenciada pelo autor deste projeto, foram analisados os municípios do estado do Paraná. Em especial os mais próximos à cidade de Curitiba. Como base para a demanda hídrica, foi utilizado o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNHS), o qual analisa esta segurança nas diferentes regiões do país, avaliando integradamente aspectos humanos, econômicos, ecossistêmicos e de resiliência.

Figura 2 - Mapa do Índice de Segurança Hídrica.



Fonte: PNSH, ANA, 2022.

O mapa apresentado no plano demonstra, no estado do Paraná, a fragilidade na capital e também na região da bacia de Paranaguá. O município localizado no litoral paranaense apresenta um grau de segurança hídrico mínimo. Assim a exploração de outras fontes de fornecimento de água além das já utilizadas atualmente torna-se muito relevante para a cidade.

Aliando-se o exposto, juntamente com a porcentagem de geração de energia elétrica por fontes não renováveis no país (ANEEL, 2005) e também ao potencial de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, é possível observar ainda mais a relevância do tema apresentado no presente trabalho. Os resíduos sólidos urbanos são destinados, em sua maioria a aterros sanitários, aonde nada de seu potencial é aproveitado, salvo situações aonde há a queima do metano produzido nestes. Além de seu potencial não ser aproveitado, da geração de

passivos ambientais, ainda há um custo elevado relacionado ao gerenciamento dos RSU, o qual inclui coleta, transporte e destinação, entre outros.

O desenvolvimento de uma região é associado também aos recursos disponíveis, assim com uma segurança hídrica e elétrica e um tratamento sustentável para os passivos gerados pela sociedade, haverá também a melhoria na qualidade de vida da população em todas as esferas. Observando que atualmente o IDH para o município é de 0,782.

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho, tendo em vista o exposto na seção anterior, é avaliar as singularidades e potenciais para uma planta de osmose inversa (RO) e destilação a múltiplos efeitos (MSF) utilizando como aporte a incineração de RSU e concentração solar no município de Paranaguá – PR. aplicando os conceitos que serão apresentados na revisão bibliográfica o presente trabalho consiste na análise energética e exergética de um sistema de geração de energia elétrica e dessalinização de água utilizando fontes renováveis para conversão de energia. Bem como avaliar as eficiências de cada parte (subsistema) desse processo. Avaliando custos exergéticos e exergéticos unitários, eficiências, destruição de exergia e comparando estes com a bibliografia. Por fim, estimando e avaliando a aplicação desta tecnologia no município de Paranaguá – PR e utilização dessa água tratada para o abastecimento da população. Apresentando assim uma possível solução as fragilidades regionais. A planta proposta incorpora características sustentáveis e visa a maior eficiência no processo. planta proposta.

1.3 Estrutura

Além do capítulo introdutório, o presente trabalho é estruturado com mais 6 capítulos, são estes:

- **CAPÍTULO 2:** Este capítulo apresenta os conceitos de tratamento de água, energia, plantas duais híbridas e também sobre a termoconomia. Conceitos estes que servirão de base para o estudo de caso;
- **CAPÍTULO 3:** O terceiro capítulo é referente a uma caracterização geração do município de Paranaguá – PR, abrangendo suas características físicas, sociais e econômicas;

- CAPÍTULO 4: Intitulado Metodologia, neste capítulo é apresentada a planta proposta, bem como os dados de entrada (simplificações, condições ambiente, as propriedades termodinâmicas dos estados, características dos equipamentos e também locação da planta) para a sua modelagem. Esta, realizada por meio de cálculos para as correntes e volumes de controle que compõe a planta, aplicação dos conceitos de termoeconomia e de alocação de custos;
- CAPÍTULO 5: Apresenta os resultados obtidos a partir da modelagem para a configuração da planta bem como os discute;
- CAPÍTULO 6: Por fim são apresentadas as conclusões acerca da modelagem da planta proposta e algumas recomendações para trabalhos futuros que podem contribuir para a proposição de medidas reais.

Os apêndices demonstram alguns dados adicionais sobre o município de Paranaguá – PR e também os códigos desenvolvidos no programa *Interactive Thermodynamics V 3.1* para a obtenção dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos para o atingir os objetivos propostos para este trabalho. Inicialmente serão descritos os métodos para obtenção de água própria para consumo humano, abordando o tratamento em estações de água, esgoto e por meio de dessalinização.

Também serão apresentados conceitos relativos à produção de energia elétrica, geração por meio da energia solar e através da biomassa residual. Neste tópico a temática dos resíduos sólidos urbanos será caracterizada devido ao seu potencial para geração de energia termelétrica. Serão apresentadas plantas duais, onde há a geração de energia elétrica em conjunto com dessalinização. Por fim serão apresentadas as bases teóricas para a modelagem desta tipologia de planta, envolvendo os conceitos de termoeconomia. Para a melhor compreensão desses, serão revisitados os conceitos básicos de termodinâmica e posteriormente os conceitos específicos para a alocação de custos em plantas de cogeração.

2.1 Tratamento de Água

A água tratada que atende os padrões de potabilidade passa por diversos processos antes de ser consumida. Para o atingimento dos níveis estabelecidos por lei (Portaria GM /MS nº 888/2021) existem diversos métodos e processos a depender das disponibilidades específicas para cada caso.

2.1.1 Estações de Tratamento de Água (ETA)

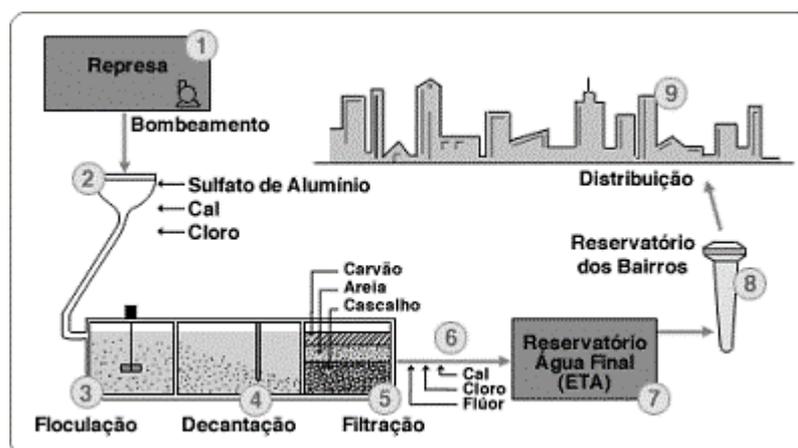
A água pode ser proveniente de fontes de abastecimento como rios, lagos, açudes, represas e água de chuva. A proposição do método de tratamento a ser aplicado e o dimensionamento da estação irão depender da caracterização das demandas locais.

No Brasil, existem normas para auxiliar no projeto de estações de tratamento de água (NBR 12216/1992), estas para prover o abastecimento, utilizam em sua maioria um ciclo completo. Primeiramente a água que chega na estação passa por um gradeamento para retenção de sólidos com grandes dimensões, em seguida inicia-se o ciclo de tratamento da água na estação utilizando métodos físico-químicos. Este ciclo é composto normalmente de seis operações unitárias:

- **Coagulação:** Adição de coagulantes para que pequenas partículas se tornem sedimentáveis;
- **Floculação:** Por meio de agitação mecânica as partículas agregam-se e tornam-se maiores formando flocos;
- **Flotação (sedimentação):** Esta etapa é realizada em tanques, após a floculação é obtida uma mistura heterogênea e os flocos sedimentam-se no fundo (esta parcela que se acumula no fundo forma o lodo da estação de tratamento, o qual é descartado em aterros sanitários);
- **Filtração:** a água é encaminhada para unidades de filtração utilizando um meio poroso (areia grossa e fina, cascalho e carvão), o objetivo desta etapa é a retenção de flocos que não foram sedimentados na etapa anterior;
- **Desinfecção:** Esta etapa visa o ajuste do pH da água e a eliminação dos microrganismos presentes nesta, utilizando agentes físicos ou químicos;
- **Fluoretação:** a adição de flúor na água tratada ajuda na prevenção de cáries.

Após o tratamento da água esta é direcionada a reservatórios e posteriormente distribuída na rede de abastecimento.

Figura 3 - Exemplo de uma ETA.



Fonte: Adaptado de: SABESP, 2021;

O lodo gerado na ETA é considerado um passivo ambiental, estes devem ser devidamente tratados e destinados, estudos apontam além do destino mais comum (aterros sanitários) estes podem ser utilizados para a fabricação de cimento, fabricação de tijolos, compostagem, entre outros.

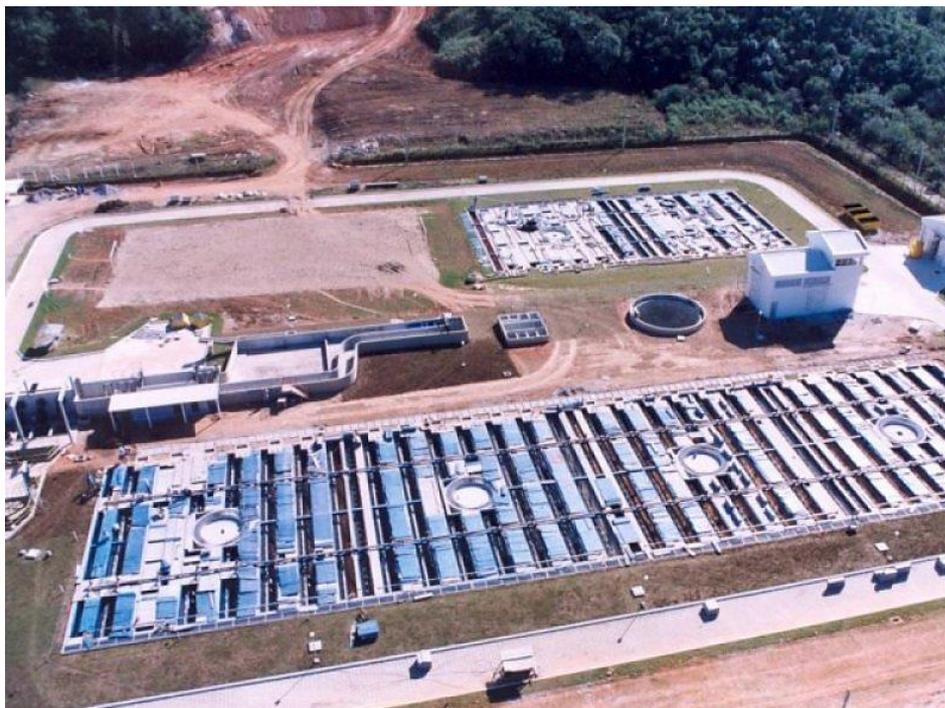
2.1.2 Tratamento de Água de Esgotamento Sanitário (ETE)

Assim como no tratamento em estações de tratamento de água, o que definirá o melhor processo para o tratamento do esgoto, seu dimensionamento e padrões a serem atingidos são as características locais. Pequenas unidades podem ser concebidas para soluções pontuais, não somente para efluentes domésticos como também para efluentes industriais.

A seguir serão resumidos alguns dos processos mais aplicados para o tratamento de esgoto:

- **Lodos Ativados:** este método utiliza micro-organismos para a decomposição da matéria orgânica, é um processo aeróbio. Este processo utiliza um grande aporte de energia, porém possui elevados níveis de eficiência;
- **Lagoas de Estabilização:** existem diversas variantes para este método de tratamento, como por exemplo lagoas facultativas, aeradas, anaeróbias, de maturação, entre outras. Estas também visam a degradação da matéria orgânica, porém demandam uma grande área, os pontos positivos deste método de tratamento são a simplicidade de operação e baixo aporte energético;
- **Métodos Anaeróbios para o Tratamento de Esgoto:** a principal característica destes processos é a independência da adição de oxigênio a mistura no processo. Nestes microrganismos também realizam a degradação da matéria orgânica presente no efluente, atualmente dois principais métodos aplicados no Brasil são o UASB (sigla em inglês para Reator Anaeróbio de Manta de lodo com Fluxo Ascendente) e o RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente). As eficiências neste modelo também são elevadas e atendem os padrões de potabilidade.

Figura 4 - Estação de tratamento de esgoto Santa Quitéria, Curitiba/PR.



Fonte: SANEPAR, 2021.

A depender do processo de tratamento o processamento e disposição final do lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto podem representar uma grande parcela dos custos de operação da ETE. Juntamente com o grande potencial poluidor do lodo, fica evidente a necessidade de destiná-los corretamente. O desafio é encontrar formas corretas e economicamente viáveis para esta disposição final.

2.1.3 Dessalinização

A alta salinidade da maior parcela de água disponível na natureza apresenta índices de salinidade, o que a torna imprópria o consumo humano. Assim, não de hoje, existe a necessidade de se separar o sal da água. A dessalinização visa diminuir consideravelmente esta salinidade da água, tornando-a assim dentro dos padrões para consumo humano. Esta prática remonta a Grécia antiga onde se definiram os princípios para esta separação e a parti deste ponto iniciaram-se os estudos acerca desta tecnologia.

Tabela 1 - Classificação da água com relação a salinidade.

Água	Salinidade (ppm)
Ultrapura	0,03
Pura	0,3
Deionizada	3
Doce (potável)	<1.000
Salobra	1.000-10.000
Salina	10.000-30.000
Salmoura	>50.000

Fonte: Adaptado de: Uche et al., 2002.

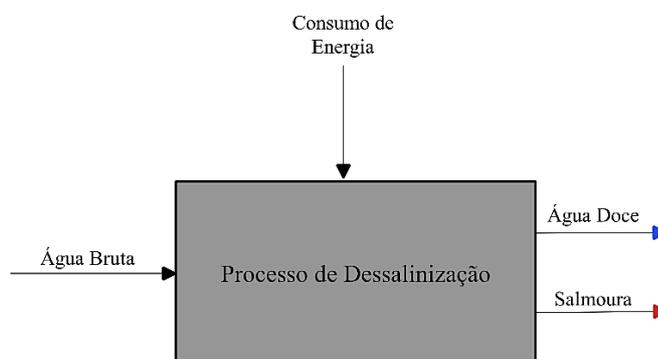
No arcabouço legal brasileiro o Art. 2º da Resolução 357 do CONAMA de 17 de março de 2005 classifica a água em 3 categorias:

Tabela 2 - Classificação da água segundo CONAMA 357/2005.

Água	Salinidade (ppm)
Doce	≤500
Salobra	500-30.000
Deionizada	≥30.000

A água salobra é, no âmbito da dessalinização chamada de água bruta, por sua vez a água potável ou doce é o produto do processo. Processo este que gera como subproduto (resíduo ou rejeito do processo) a salmoura, contendo uma concentração de sal maior do que a água bruta. O Fluxograma 1 demonstra de forma simplificada como se dá a dessalinização.

Fluxograma 1 - Fluxos básicos do processo de dessalinização.



Fonte: Adaptado de: Santos, 2005.

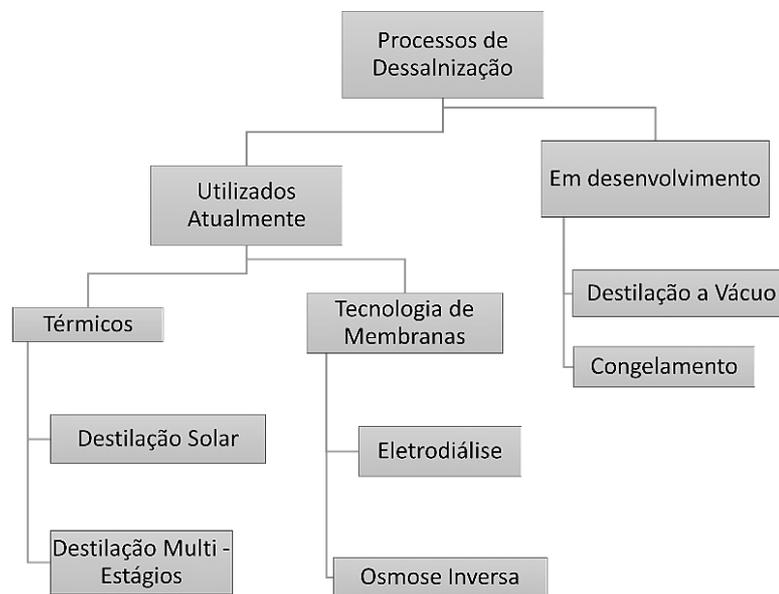
Os insumos dos sistema de dessalinização são a água salobra e também o aporte de energia (seja térmica ou elétrica). Parte desta água bruta, após o processo, sai como água doce e parte como salmoura. O principal fator que muitas vezes inviabiliza a destilação é o alto custo energético do processo.

Existem diversos processos de dessalinização, entretanto poucos são técnica e economicamente viáveis a ponto de serem aplicados em grandes escalas. A qualidade do produto depende da tecnologia aplicada e da qualidade da água bruta.

2.1.3.1 Processos e Tecnologias de Dessalinização

Simplificadamente a dessalinização é um processo físico-químico para se retirar os sais da água. Para se obter água doce a partir da bruta, os processos podem ser classificados como: Químicos (intercâmbio iônico), com membranas (eletrodiálise e osmose inversa) e processos com mudança de fase (destilação e congelamento).

Fluxograma 2 - Métodos de dessalinização.



Fonte: Younos et al., 2005.

Porém, na prática somente os processos de Osmose Inversa (RO) e destilação são vastamente aplicados em escala industrial, devido às suas viabilidades técnicas e econômicas, devido a este fato somente estas duas tecnologias serão descritas e analisadas nesta revisão bibliográfica.

I. Destilação

A destilação é um processo térmico e que ocorre também na natureza, a água pura é extraída da água bruta adicionando-se calor a solução, assim evaporando a água e deixando somente o sal. Posteriormente o vapor de água obtido é condensado obtendo-se água doce. Este processo não exige um pré-tratamento pois as impurezas contidas na água bruta não evaporam com ela. Os processos de destilação são muito aplicados a água do mar, pois estes utilizam o mesmo aporte de energia independente da salinidade da água bruta.

Atualmente a destilação é obtida por meio de 5 principais tecnologias:

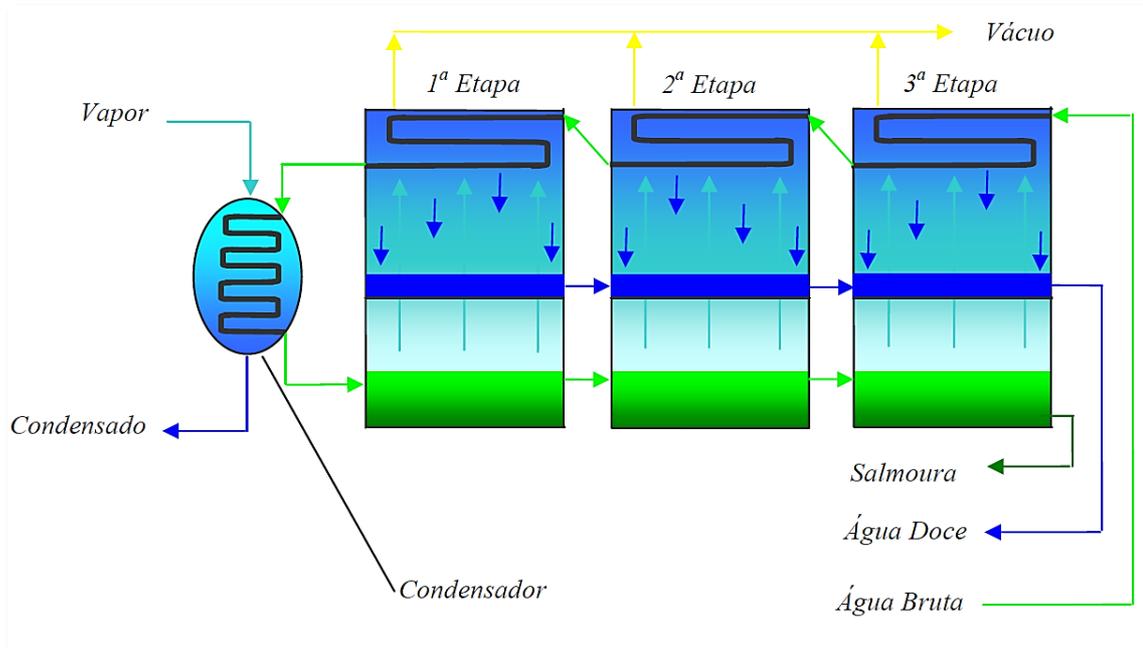
- Destilação solar (SD);
- Compressão mecânica a vapor (MVC);
- Evaporação multietapa por efeito flash (MSF);
- Destilação a múltiplos efeitos (MED): esta possui várias subdivisões onde são acoplados equipamentos (termo compressor, compressor mecânico, bomba de calor por absorção) a planta visando uma maior eficiência.

II. Evaporação Multietapa por Efeito Flash (MSF)

No processo MSF o aporte de energia se dá majoritariamente em forma de calor (vapor), o consumo de energia elétrica se dá somente no bombeamento e em outros equipamentos auxiliares. A evaporação por efeito flash ocorre em vácuo em várias etapas sucessivas com o pré-aquecimento da água salobra.

A água entra em uma célula com pressão menor a sua, este *delta* de pressão parte dela é evaporada instantaneamente (*flash*). A energia fornecida ao processo é térmica e em forma de vapor de média ou baixa pressão, este se condensa no condensador, assim cedendo calor para a água bruta até a sua temperatura de saturação. A pressão na primeira fase é menor do que a da água bruta no condensador e como já dito parte da água se evapora e a fração restante vai para a próxima etapa onde a pressão é ainda menor, fazendo com que mais uma parcela se evapore e assim sucessivamente. O número de etapas depende da disponibilidade de energia e da salinidade pretendida pelo processo.

Fluxograma 3 - Destilação multietapa por efeito flash (MSF).



Fonte: Santos, 2005.

Em cada etapa a condensação se dá pela transferência de calor, o vapor de água resultado do efeito flash entra em contato com a parte exterior dos tubos na parte superior. Nestes circula a água salobra que vai recebendo energia em forma de calor advinda da condensação. O vácuo em cada etapa (este aumenta com a evolução das etapas consecutivas para gerar a diferença de pressão) ocorre por meio dos ejetores, onde também são extraídas as impurezas (não condensáveis). A água doce condensada após as trocas de calor escoar por uma calha.

III. Osmose Inversa (RO)

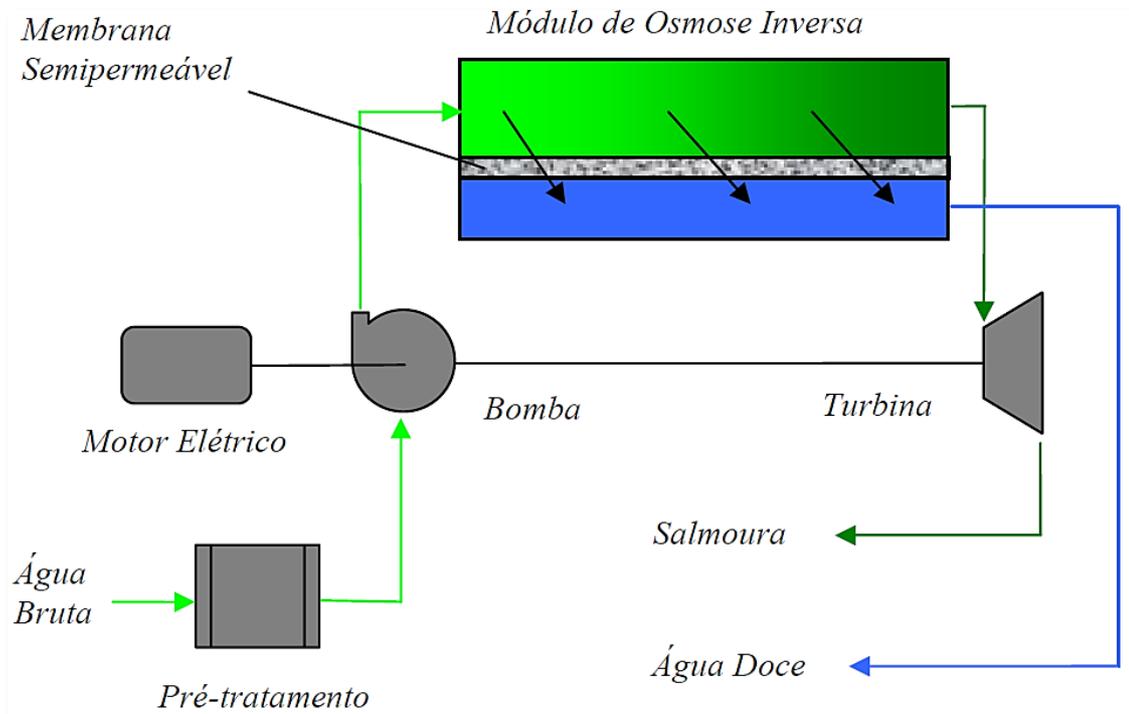
Esta tecnologia é a mais aplicada a nível mundial, sua utilização iniciou-se em 1972 e sua utilização para tratamento da água do mar (*seawater reverse osmosis*) 8 anos depois. A RO é um processo que para sua execução utiliza somente a energia elétrica, esta utilização se dá majoritariamente pela bomba de alta pressão devido as altas pressões exigidas sobre grandes volumes de água.

Simplificadamente, o processo ocorre em temperatura ambiente e se resume em aplicar uma pressão (utilizando a bomba de alta pressão, o que explica o consumo elétrico do processo) maior que do que a pressão osmótica da água bruta sobre uma membrana semipermeável. Assim somente a água doce atravessa e os íons de sal ficam retidos.

Para que o processo seja mais eficiente este processo requer um pré-tratamento da água bruta por meio de filtração e desinfecção, assim evitando a presença de organismos e elementos em suspensão no momento do tratamento (esta ação auxilia no controle de entupimento das membranas osmóticas, preservando o funcionamento e a duração destas).

A unidade de dessalinização por osmose inversa é composta de 5 subsistemas (Fluxograma 4), o sistema de membranas é a parte principal do processo e é onde ocorre a dessalinização propriamente dita. Elas podem ser classificadas em três maneiras: plantas, tubulares e capilares.

Fluxograma 4 - Subsistemas do processo de osmose inversa.



Fonte: Santos, 2005.

Neste processo somente a água pura passa através da membrana. Porém ela escoar em paralelo a membrana e não perpendicularmente. Assim a osmose inversa não é considerada um processo de filtração. Este sentido de escoamento resulta em somente uma parcela da água pura contida na água salobra atravessando a membrana e o sal é arrastado pela salmoura.

2.1.3.2 Comparação Entre Tecnologias de Dessalinização

Para uma comparação entre processos deve-se primeiramente observar o uso do produto do processo e também as disponibilidades de energia nos aspectos de cada projeto. Os aspectos mais relevantes para esta análise são: salinidade da água bruta e da água doce, capacidade de produção por unidade, indicadores de performance, temperatura e pressão de operação, fontes de energia e consumo de energia.

O maior impedimento para a ampliação da produção de água doce a partir da água bruta é o consumo elevado de energia quando comparado ao volume produzido. Em países como o Brasil, onde a matriz energética é predominantemente hidrelétrica o processo mais aplicado é o da osmose inversa (aporte de energia elétrica). Já em países com uma matriz termelétrica os processos com aporte térmico são predominantes. Porém atualmente são estudadas várias alternativas para o fornecimento de energia ao processo de dessalinização como por exemplo concentradores solares e queima de biomassa.

Nos processos térmicos também deve ser levado em consideração o consumo específico de vapor (para esta avaliação é utilizado o indicador GOR [*Gain output ratio*] que demonstra a razão entre água produzida e o respectivo consumo de vapor). A tabela a seguir apresenta a comparação entre 4 tecnologias levando-se em consideração os parâmetros citados.

Tabela 3 - Comparação entre tecnologias de dessalinização.

Parâmetro	RO	MVC	MSF	MED
Tipo de Energia Predominante	Elétrica	Elétrica	Térmica	Elétrica
Consumo Elétrico (kWh/m ³)	3-12	8-14	3-6	1-2,5
Consumo Térmico Entálpico (kWh/m ³)	-	-	55-120	25-120
GOR (kg _{produto} /kg _{vapor})	-	-	8-121	6-21
Salinidade da Água Doce (ppm)	<500	<50	<50	<50
Capacidade de Produção por Unidade (m ³ /dia)	<10.000	10-2.500	2.400-75.000	100-20.000
Custo de Instalação	Médio	Alto	Alto	Alto-médio

Fonte: Adaptado de: Santos, 2005.

2.2 Energia

Nesta seção, expõem-se informações essenciais sobre os insumos energéticos considerados no estudo.

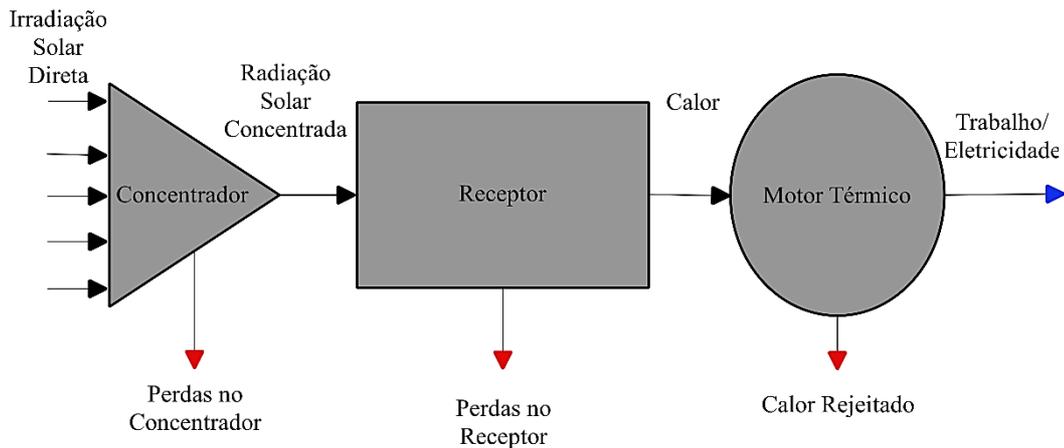
2.2.1 Energia Solar

A maior fonte de energia no nosso planeta é a solar, anualmente o Sol fornece para a nossa atmosfera cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia (cerca de quatro vezes o consumo mundial anual). A produção de eletricidade através da energia solar, assim como a dessalinização é tema de estudo a muito tempo, os primeiros registros destes são do ano de 1839 na França. Vale lembrar que a maioria das fontes de energia (exemplo: biomassa, eólica e os combustíveis fósseis) são advindas indiretamente da energia solar.

Um dos pontos a serem levados em consideração é o fato de que a energia solar tem distribuição temporal e espacial irregular, além de esta estar disponível somente durante o dia, sendo necessária avaliação prévia do local em que os sistemas serão implantados. Existem três maneiras para se gerar eletricidade a partir da radiação solar, a fotovoltaica, energia solar térmica concentrada e a energia heliotérmica.

- I. **Fotovoltaica:** As células fotovoltaicas são feitas de um material semicondutor (silício) onde são adicionados *dopantes* que tornam o meio adequado para a conversão de potência associada a energia solar (captando a luz) em potência elétrica por meio do efeito fotovoltaico.
- II. **Energia solar térmica concentrada/Heliotérmica:** Nestes dois métodos a energia solar é utilizada para o aquecimento de fluidos, assim gerando potência mecânica ou elétrica. No caso da heliotérmica o vapor gerado com o aquecimento é utilizado para mover as turbinas. Este processo se resume em utilizar concentradores que focam a radiação em um receptor, este aquece um fluido (de transferência) que no módulo de potência gera a eletricidade.

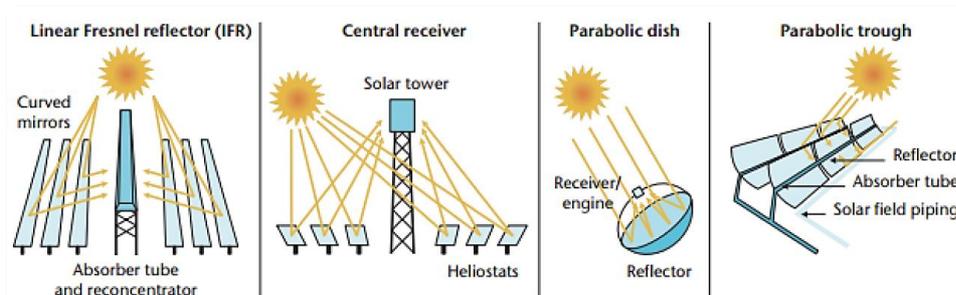
Figura 5 - Representação de um sistema de energia solar térmica concentrada.



Fonte: Adaptado de: IEA, 2017.

Existem 4 tipos de sistemas de concentração solar, são eles: cilindro parabólico, linear Fresnel, torre de receptor central e prato parabólico. Normalmente estes sistemas são utilizados de maneira híbrida (com o auxílio de combustível fóssil, oferecendo maior estabilidade a geração de energia).

Figura 6 - Tecnologias de concentração solar.



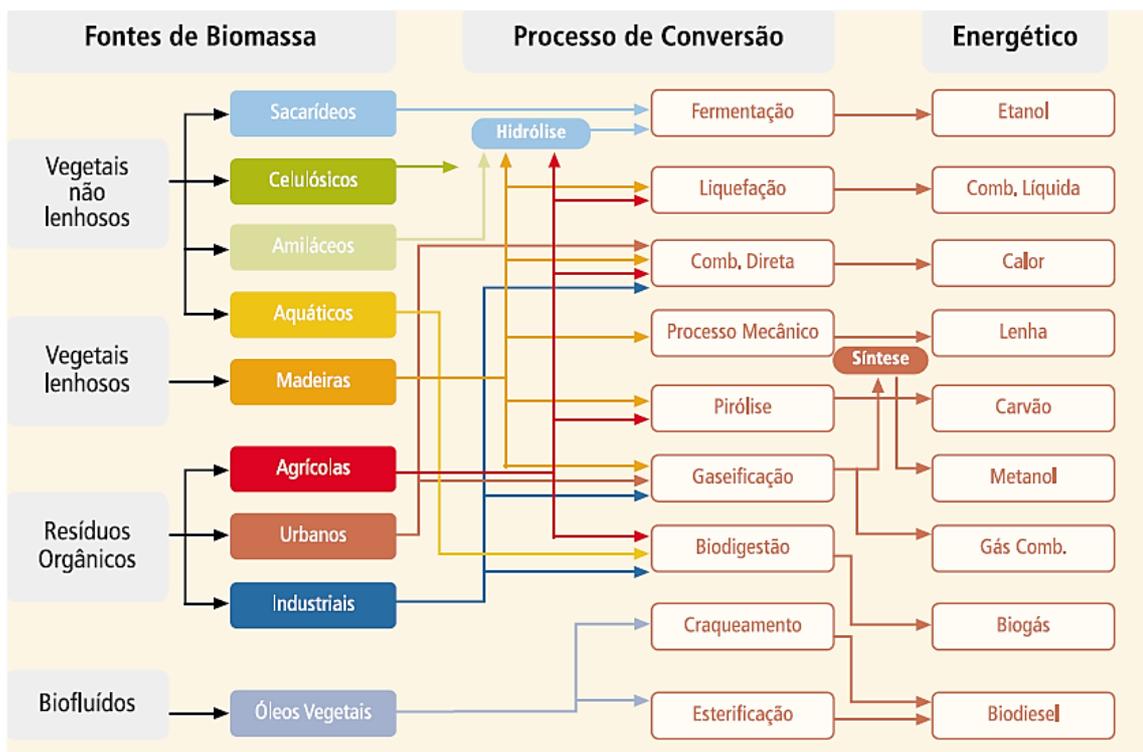
Fonte: IEA. 2017.

2.2.2 Energia de Biomassa

No âmbito da energia o termo biomassa faz referência ao material biológico advindo dos seres vivos, com os quais é possível, por meio de manipulação a sua conversão em energia. Para a Agência Nacional de Energia Elétrica a biomassa é definida como qualquer matéria orgânica que tem potencial para ser convertida em energia mecânica, térmica ou elétrica. Também segundo a ANEEL, o volume de biomassa existente no planeta é da ordem de trilhões de toneladas.

Existem diversas tecnologias para esta conversão de energia através da biomassa, alguns exemplos são gaseificação, métodos de produção de calor e eletricidade (cogeração), recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos e gases de aterros sanitários. A biomassa energética é dividida em dois grandes grupos, a biomassa tradicional (lenha e outros resíduos naturais) e biomassa moderna (biomassa produzida com tecnologias adequadas). E as fontes de biomassa são classificadas como: vegetais lenhosos, resíduos orgânicos e biofluidos (exemplo biodiesel utilizado para abastecimento de automóveis). Atualmente a energia de biomassa é proveniente predominantemente de recursos não renováveis o que pode ocasionar a exaustão das fontes destes recursos e pressões no meio ambiente.

Fluxograma 5 – Processos e rotas para conversão de biomassa em energia.



Fonte: ANEEL, 2005.

Um dos aspectos a serem levados em consideração é o de que no processo de combustão nunca é completo (acarretando o lançamento de poluentes na atmosfera), por isso toda queima deve ser realizada de maneira controlada. Uma das formas mais utilizadas para utilizar biomassa é compactando os materiais e transformando-os em briquetes.

Tabela 4 - Propriedades relevantes para uso da biomassa na geração de energia.

Propriedade	Condições Ótimas Para a Briquetagem	Fonte de Referência
Granulometria	Granulometria variada (facilita o adensamento proporcionando uma queima de maior qualidade). Partículas entre 5 a 10 mm	Gonçalves et al., 2010; Gentil et al., 2008; Morais et al., 2007
Teor de umidade	Teor de umidade recomendado 8 a 15%	Gonçalves et al., 2010; Gentil et al., 2008; Wilaipon et al., 2009
Teor de sólidos voláteis	Presença de altos teores de sólidos voláteis (auxiliam na ignição do processo)	Moers et al., 2011; Araújo et al., 2010
Teor de cinzas e carbono fixo	Valores reduzidos (este teor representa a parcela de matéria inerte da biomassa)	Gonçalves et al., 2010
Poder calorífico	Biomassa com valores elevados de poder calorífico	Fernandes et al., 2012
Propriedades térmicas	Variadas: avaliar como determinadas propriedades influenciam durante o aquecimento do material	Casteló et al., 2009

Fonte: Adaptado do texto de: Oliveira Maia, B. G, 2013.

Resíduos com uma composição física e química mais homogênea, menor quantidade de poluentes e cinzas, armazenados e manuseados de maneira correta e com menor demanda de ar para combustão auxiliam no aumento da eficiência dos processos de conversão de energia.

2.2.2.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Os resíduos sólidos urbanos são resultado de um uso incorreto e não sustentável dos recursos naturais pelo ser humano assim gerando passivos ambientais e deterioração das reservas de recursos naturais. Comumente referidos como lixo, os resíduos sólidos urbanos são constituídos de diversos materiais como restos de comida, restos de móveis e roupas, embalagens de produtos, entre outros. Resíduos da construção civil, industriais e hospitalares neste âmbito não são considerados RSU.

Figura 7 - Aterro controlado do Jóquei, conhecido como lixão da Estrutural, Brasília/DF



Fonte: Agência Brasília, 2017.

No Brasil foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no ano de 2018 (ABRELPE, 2019) e estes quase que em sua totalidade são destinados a aterros ou lixões. No país está porcentagem se decorre do baixo custo destas alternativas.

Tabela 5 - Quantificação por tipologia de tratamento/destinação por região do Brasil.

Condição	Brasil	Sul	Sudeste	Centro Oeste	Norte	Nordeste
Aterro sanitário municipal em seu território	613	146	352	29	9	77
Aterro sanitário municipal em outro município	149	14	33	16	2	84
Aterro sanitário privado em seu território	127	43	52	6	7	19
Aterro sanitário privado em outro município	1.634	768	647	51	26	142
Aterro sanitário de consórcio em seu território	30	15	9	3	1	2
Aterro sanitário de consórcio em outro município	242	105	69	19	14	35
Aterro controlado municipal em seu território	137	79	0	1	12	45
Aterro controlado municipal em outro município	4	2	0	0	1	1
Lixão em seu território	2.475	19	356	341	378	1.381
Lixão em outro município	11	0	2	1	0	8
Incineração em seu território	0	0	0	0	0	0
Incineração em outro município	0	0	0	0	0	0
Usina de triagem e compostagem em seu território	95	0	95	0	0	0
Usina de triagem e compostagem em outro município	3	0	3	0	0	0
Aterro em vala em seu território	49	0	49	0	0	0
Aterro em vala em outro município	1	0	1	0	0	0
Número de municípios	5.770	1.191	1.688	467	450	1.794

Fonte: Adaptado de: Atlas da Destinação Final de Resíduos – Brasil, 2020.

A porcentagem de alternativas como incineração ainda é inexpressiva. A seguir é apresentada uma classificação simplificada dos RSU:

Tabela 6 - Composição dos RSU a nível global.

Componente	Fração (%)
Orgânico	46
Metálico	4
Plástico	10
Papel	17
Outros	18

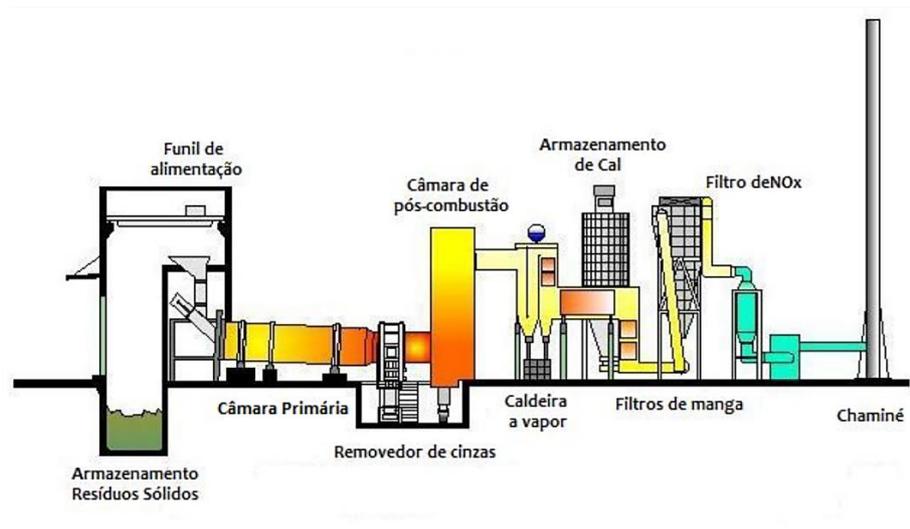
Fonte: Adaptado de Palácio J.C; Santos, 2018.

Para a seleção da tecnologia para a conversão de energia a caracterização do resíduo é de extrema importância, tendo em vista a grande gama de componentes presentes nos RSU. Uma planta que otimiza seus processos e realiza uma pré-seleção e pré-tratamento dos resíduos pode recuperar duas ou três vezes mais eletricidade e calor quando comparada a outra que utiliza resíduos na sua forma bruta e sem os cuidados necessários (Massarutto, A et al., 2015).

- I. Rota de Conversão Bioquímica para RSU:** neste contexto esta rota é relativa à digestão anaeróbia (decomposição controlada da matéria orgânica por microrganismos). É possível a geração de Metano (combustível para a geração elétrica), vapor e calor. Possui uma alta eficiência para materiais com alto teor de umidade e matéria orgânica. E é uma das vias mais econômicas e ambientalmente seguras para o tratamento de resíduos sólidos urbanos. As desvantagens para esta rota são o grande trabalho requerido para a sua separação.
- II. Rota de Conversão Termoquímica para RSU:** Aqui tanto a matéria biodegradável quanto a não biodegradável contribuem no processo. Assim os volumes e massas dos rejeitos são reduzidos. Nesta rota também são destruídos poluentes orgânicos e há a redução da emissão de gases de efeito estufa. Ambientalmente é mais saudável utilizar resíduos como combustível do que outras fontes convencionais. Os processos mais comuns são a pirólise, incineração e gaseificação.
 - **Incineração:** Primeiramente os resíduos devem receber um pré-tratamento devido aos fatores citados na Tabela 4, muitas metodologias são aplicadas

nesta etapa. Porém todas visam deixar o combustível nas melhores condições para a recuperação energética, algumas delas são: baixo teor de umidade, componentes indesejados removidos e tamanho ótimo para operação dos componentes. A incineração é um processo que envolve a combustão das substâncias orgânicas dos RSU. O volume é significativamente reduzido e os produtos do processo são as cinzas, calor e os gases de combustão (com a evolução dos métodos e pré-tratamento estas emissões respeitam os padrões previstos por legislação).

Figura 8 - Exemplo de planta de incineração (tipo: Rotary Klin).



Fonte: Dias Santos, G. G, 2011.

2.3 Planta Dual: Cogeração e Dessalinização Híbrida

É possível se produzir simultaneamente trabalho e calor útil, Plantas Duais agregam a geração de eletricidade e água dessalinizada. O intuito básico é utilizar o calor residual dos processos termelétricos para processos de dessalinização com mudança de fase. Esta aplicação auxilia por duas frentes, em uma aproveitando a energia (térmica) que não seria utilizada após a geração de energia elétrica e em outra evita-se a queima de combustíveis para alimentar as necessidades e padrões de pressão necessários em sistemas de dessalinização térmica, como por exemplo a MSF.

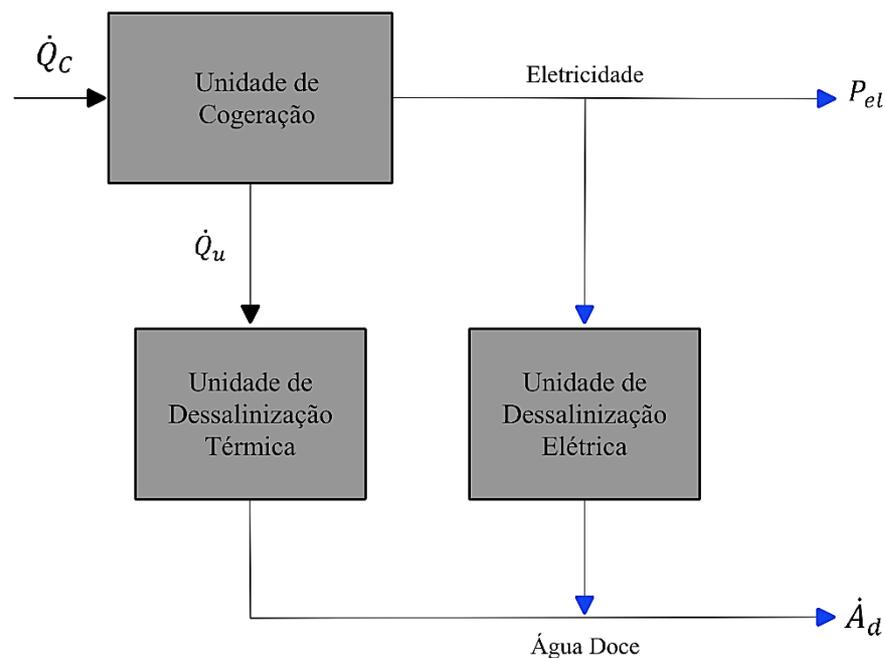
As configurações mais comuns neste âmbito incluem a combinação de turbinas a gás com a destilação MSF e geralmente são da categoria *topping*, onde se utiliza a energia termomecânica antes da utilização do calor no processo de tratamento da água. A seguir serão

listadas as quatro configurações mais comuns para cogeração (incluindo a utilizando turbina a gás já citada).

- I. Cogeração com turbina a vapor;
- II. Cogeração com motor alternativo de combustão interna;
- III. Cogeração com turbina a gás;
- IV. Cogeração com ciclo combinado.

Ainda a depender das demandas locais do local onde será instalada a planta pode-se utilizar um sistema de dessalinização híbrido. Nestas plantas uma fração da eletricidade cogorada pode ser utilizada para processos de dessalinização elétricos a osmose inversa.

Fluxograma 6 - Fluxos básicos para uma Planta Dual com Sistema Híbrido.



Fonte: Adaptado de: Santos, 2005.

Onde:

- \dot{Q}_C : Fluxo de calor (combustível) [kW];
- \dot{Q}_u : Fluxo de calor (útil) [kW];
- \dot{A}_d : Produção de água dessalinizada [m³/h];
- P_{el} : Potência Elétrica líquida [kW].

Sistemas de cogeração geralmente apresentam uma alta eficiência energética global (em torno de 70%).

2.4 Fundamentos de Termoeconomia

A Termoeconomia utiliza-se da Segunda Lei para realizar aproximações teóricas, nestes é a exergia (e não a energia) representa o valor dos produtos e subprodutos dos processos de cunho energético. Além dos aspectos termodinâmicos, para se ter uma alocação apropriada de custos devem ser levados também em consideração fatores econômicos que reflitam a realidade, por isto o termo Termoeconomia. Em resumo, a termoeconomia baseada em conceitos de termodinâmica e economia visa a atribuição de custos em sistemas energéticos

Em plantas duais, um dos principais tópicos de discussão é a alocação de custos. Como atribuir o valor da geração de eletricidade ou da água dessalinizada é o foco de inúmeros estudos, atualmente existem vários métodos para esta alocação de custos nestas plantas. Mais uma vez esta alocação depende muito das características locais de onde será instalada a planta, alguns métodos atribuem maior valor a energia elétrica, em contrapartida outros valoram mais a água dessalinizada.

Do ponto de vista da segunda lei da termodinâmica, diferentes formas de energia possuem qualidades distintas. As energias elétrica e mecânica são tratadas pela segunda lei como de igual qualidade, uma vez que possível transformá-las integralmente por meio de processos reversíveis. Já a energia interna e o calor não podem ser tratadas como equivalentes termodinamicamente. Assim é necessário a definição de uma propriedade para os sistemas termodinâmicos e fluxos de matéria e energia, esta deve conseguir expressar qualquer dos elementos do processo em função de outro e o contrário deve ser possível, desta demanda surgiu o Princípio da Equivalência termodinâmica.

Para a otimização dos sistemas energéticos, deve-se analisar a eficiência do processo. O desafio, como já citado, encontra-se em expressar a comparação entre diferentes elementos em

unidades equivalentes. Com o intuito de descrever o processo de alocação de custos é a apresentada a Teoria do Custo Exergético (Lozano e Valero, 1993), os princípios básicos desta teoria são a utilização da Segunda Lei da Termodinâmica sistematicamente juntamente com o conceito de exergia bem como o conceito de *fuel-product*. A neguentropia aplica o conceito de redução de entropia na análise termoeconômica em sistemas aonde condensadores e caldeiras de recuperação.

Alguns ramos para a modelagem termoeconômica, são:

- Modelo E: Focado na exergia total do fluído de trabalho;
- Modelo E&S: utiliza fluxos de exergia total e a neguentropia.

O custo exergético nada mais é do que a eficiência energética da cadeia produtiva.

2.4.1 Termodinâmica

Antes de entrar em conceitos mais específicos e elaborados acerca do âmbito do presente estudo, os conceitos termodinâmicos básicos serão apresentados pois estes auxiliarão no desenvolvimento de teorias e cálculos que serão apresentados posteriormente. Os princípios serão aplicados na modelagem da planta proposta.

Os conceitos mais básicos da termodinâmica são o de sistema, que pode ser determinado como um dispositivo (ou vários) que possui uma massa que está a ser estudada. Já o volume de controle engloba este dispositivo a matéria, e tudo externo a ele é chamado de vizinhança. A superfície de controle (pode ser móvel ou fixa) delimita este volume, e podemos assumir que este sistema é aberto ou fechado a depender das interações com o ambiente. Ainda com relação ao sistema este pode ser isolado ou não.

A matéria possui propriedades termodinâmicas. Estas definem o estado de uma substância. As propriedades podem ser classificadas como intensivas e extensivas. Quando pelo menos uma propriedade de um sistema termodinâmico é alterada é tido que haver a mudança de estado e um processo ocorreu, um ciclo é quando as propriedades são alteradas para um ou mais estados e ao fim deste retornam as condições iniciais.

Outro princípio básico é a Lei Zero da Termodinâmica, a qual diz que se dois corpos têm temperaturas iguais a de um terceiro corpo, a temperatura destes dois corpos também deve ser a mesma.

Calor (transferência de energia devido a diferença de temperatura que pode ser representada por trabalho mecânico) e trabalho (transferência de energia mecânica, elétrica ou química [função do processo]) no contexto termodinâmico são as formas de transferência de energia de um sistema ou volume de controle para outro ou para sua vizinhança.

O balanço de massa relaciona os fluxos de massa que entram e saem do volume de controle. E a eficiência pode ser definida como a relação entre a energia consumida e a energia efetivamente utilizada.

I. Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica, em resumo, é a aplicação do princípio da conservação da energia aplicado a sistemas onde há a transferência de energia através da superfície de controle por meio de trabalho ou calor. Em um volume de controle a Primeira Lei da Termodinâmica pode ser representada como:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_{tot,e} - \sum \dot{m}_s h_{tot,s} \quad (1)$$

Onde:

- \dot{Q} : taxa líquida de transferência de energia por calor através da fronteira em t;
- \dot{W} : taxa líquida de transferência de energia por trabalho através da fronteira em t;
- \dot{m} : vazão mássica;
- h_{tot} : entalpia total (soma da energia interna, cinética, potencial e trabalho de fluxo);

Esta lei estabelece a conservação de energia em qualquer processo sem reações químicas. No contexto da primeira lei é definida uma importante propriedade termodinâmica, a entalpia, que é igual a transferência de calor em um processo a pressão constante, que ocorre em quase equilíbrio. Abrange tanto a variação da energia interna, quanto o trabalho deste processo em particular.

$$H \equiv U + PV \quad (2)$$

Onde:

- H: entalpia;
- U: energia interna;
- P: pressão;
- V: volume.

II. Segunda Lei da Termodinâmica

Na natureza existem uma direção espontânea de processos. A entropia (S) é uma propriedade termodinâmica e sua variação em um sistema fechado durante um processo, é igual à soma da entropia líquida transferida através da fronteira do sistema pela transferência de calor com a entropia gerada dentro da fronteira do sistema. O balanço de entropia para um volume de controle para regime permanente pode ser descrito por:

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{VC}}{T} + \dot{S}_{ger} \quad (3)$$

Onde:

- \dot{m} : vazão mássica;
- s : entropia específica;
- \dot{Q}_{VC} : taxa de transferência de calor no volume de controle;
- \dot{S}_{ger} : taxa de geração de entropia;
- T : Temperatura.

$$\dot{S}_{ger} \geq 0 \quad (4)$$

III. Exergia (B)

A energia pode ser associada a substâncias e seu estado termodinâmico, esta é chamada de energia interna, existem também as energias potenciais (forças externas atuando na massa) e cinéticas (movimento). A energia interna ainda pode ser subdividida em potencial, onde são levadas as forças intermoleculares, a energia de rotação molecular, energia de vibração e atômica.

Existe a possibilidade de se realizar trabalho quando dois sistemas quaisquer (em estados diferentes) são colocados em contato. Este fato se deve as interações que ocorrem até que o equilíbrio seja atingido. Um dos estados pode ser tomado como estado de referência para a exergia, assim esta pode ser definida teoricamente como o máximo trabalho que pode ser obtido por meio da interação destes dois sistemas até o atingimento do equilíbrio (para tal definição é uma exigência que o estado de referência seja definido). Por meio da análise exergética, é possível a visualização de ineficiência e perdas, tornando a de extrema importância para estudos termodinâmicos práticos.

O estado morto é de suma importância para a compreensão do conceito de exergia, conforme o equilíbrio se aproxima através de mudanças sucessivas de estados a possibilidade de se realizar trabalho diminui, até que chegue a zero (no equilíbrio), quando isto ocorre temos o estado morto do sistema. Com o balanço de exergia de um sistema fechado podemos observar sua transferência e também a destruição de exergia. Assim como a entropia a exergia não se conserva, a produção de entropia se reflete em uma destruição de exergia.

Kotas (1995) coloca que a análise exergética tem como base a Segunda Lei da Termodinâmica e que a exergia de um fluxo contínuo de matéria é a quantidade máxima de trabalho obtida para se sair do estado inicial e chegar ao estado morto por meio de processos termodinâmicos.

Na ausência de efeitos de ordem magnética, tensão de superfície, elétrica e nuclear podemos discriminar a exergia total de um sistema em quatro tipos:

- Exergia cinética: é uma forma de energia mecânica e pode ser totalmente convertida em trabalho;
- Exergia potencial: forma de energia mecânica, que também pode ser convertida completamente em trabalho;
- Exergia física: é definida como o máximo trabalho a ser realizado por um fluxo de substância quando trazida ao estado de equilíbrio termomecânico com o entorno (através de processo reversíveis);
- Exergia química: é o trabalho (teórico) mínimo para a formação de uma certa quantidade de matéria a partir das substâncias presentes no ambiente (através de processos reversíveis);

As equações para a exergia serão apresentadas a seguir:

$$\psi = [h_{tot} - T_0s] - [h_{tot0} - T_0s_0] \quad (5)$$

Onde:

- ψ : exergia de fluxo;
- h_{tot} : entalpia total (soma da energia interna, cinética, potencial e trabalho de fluxo);
- h_{tot0} : entalpia total do estado morto (soma da energia interna, cinética, potencial e trabalho de fluxo);
- T_0 : temperatura do estado morto;
- s : entropia específica;
- h_0 : entalpia do estado morto;
- s_0 : entropia do estado morto;

O balanço de exergia é dado pela Equação 6 que leva em consideração a transferência de calor em T, a transferência por trabalho de fronteira, transferência pelo fluxo e também a destruição de exergia.

$$\frac{d\Phi}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + P_0 \frac{dV}{dt} + \sum \dot{m}_e \psi_e - \sum \dot{m}_s \psi_s - T_0 \dot{S}_{ger} \quad (6)$$

Onde:

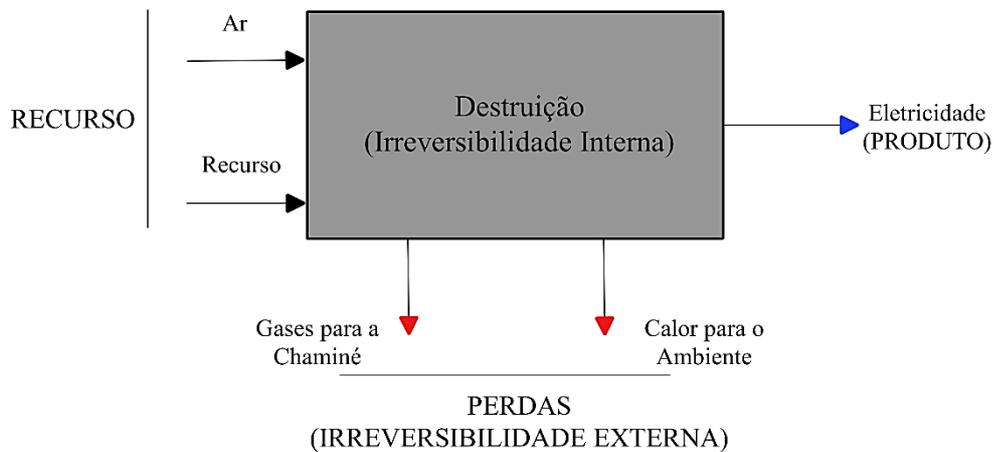
- ψ : exergia de fluxo;
- h_{tot} : entalpia total (soma da energia interna, cinética, potencial e trabalho de fluxo);
- T_0 : temperatura do estado morto;
- P_0 : pressão do estado morto
- s : entropia específica;
- h_0 : entalpia do estado morto;
- s_0 : entropia do estado morto;
- \dot{m} : vazão mássica;
- \dot{Q}_{vc} : taxa de transferência de calor no volume de controle;
- \dot{S}_{ger} : taxa de geração de entropia;
- $\frac{dV}{dt}$: variação do volume em t;

- \dot{W}_{VC} : taxa líquida de transferência de energia por trabalho através da fronteira em t.

2.4.1.1 Fundamentos da Termoeconomia

Para a aplicação do método deve-se observar o sistema com tal nível de agregação no qual seja possível identificar um único produto.

Fluxograma 7 - Central térmica exemplo em seu nível máximo de agregação.



Fonte: Adaptado de: Lozano e Valero, 1993.

Assim o balanço de exergia do sistema exemplo do Fluxograma 7 pode ser modelado da seguinte maneira:

$$Produto (P) = Recurso (F) - Perdas (P) - Destruição (D) \quad (7)$$

Já a eficiência termodinâmica (η_b)(rendimento exergético do processo) se dá pela equação (8), da análise desta é possível observar que como os termos P , F , D e L a eficiência termodinâmica definida cumpre a condição $0 \leq \eta_b \leq 1$ (com $\eta_b = 0$ quando o produto é nulo e $\eta_b = 1$ quando não existem irreversibilidades, o que ocorre somente em processos ideais).

$$\eta_b = \frac{Produto (P)}{Recurso (F)} = 1 - \frac{Perdas (L) + Destruição (D)}{Recurso (F)} \quad (8)$$

O inverso da eficiência definida acima (também citada anteriormente no tópico acerca da Segunda Lei da Termodinâmica) representação do custo exergético unitário do produto (k). Assim para o caso exemplo:

$$k = \frac{1}{\eta_b} = \frac{\text{Combustível } (F)}{\text{Produto } (P)} = 1 + \frac{\text{Perdas } (L) + \text{Destruição } (D)}{\text{Produto } (P)} \quad (9)$$

Após a determinação (conceitual) da relação entre a Segunda Lei da Termodinâmica, custo exergético e eficiência a aplicação da Teoria do Custo Exergético permite:

- I. Analisar a irreversibilidade (ou ineficiência) do sistema;
- II. Analisar o impacto no consumo de recurso causado pelas perdas;
- III. Calcular os custos exergéticos dos fluxos internos e dos produtos finais, possibilitando o controle destes custos.

A análise final do sistema como um todo, deve ser realizada em termos monetários. Para tanto todos os combustíveis introduzidos nos fluxos internos e produtos devem ser incorporados. O fator econômico deve ser considerado, porém com mais esta variável inserida na análise mais dois fatores tornam-se relevantes, são eles: os preços de mercado e os custos de aquisição (depreciação e manutenção). Então em sistemas reais devem ser considerados dois ambientes: o físico (composto pelos recursos envolvidos, fluxos de massa e fluxos de energia) e o econômico.

2.4.2 Formulação

Com relação ao citado no tópico anterior, o TCE visa obter o custo físico do sistema, este deve ter seus limites definidos e um nível de agregação com o qual seja possível identificar todos os elementos nele presentes. A apresentação da Teoria do Custo Exergético foi inicialmente proposta por Valero e Lozano em 1989.

2.4.2.1 Estrutura Física

A estrutura física da planta nada mais é do que um esquema simplificado desta, utilizando da divisão dela em unidades e da relação de fluxos materiais e energéticos entres as unidades e também com o ambiente (Santos, 2005).

Um sistema pode ser decomposto e dividido em subsistemas e as correntes que os interconectam. Este sistema também se liga ao meio externo por meio de fluxos de massa, calor e trabalho. Para tal deve ser levado em consideração as especificidades de cada sistema em particular. Assim para a análise termodinâmica da planta o conjunto de equipamentos e subsistemas deve ser definido de tal maneira que estes representem está em sua totalidade. Também como citados os fluxos são importantes e devem relacionar (do ponto de vista mássico e energético) os equipamentos entre si e o entorno (ambiente externo).

A matriz de incidência ($A[n \times m]$) correlaciona os subsistemas e fluxos. Onde n é o número de subsistemas e m o número de fluxos presentes. Tomando-se a operação do sistema em regime permanente pode-se descrever os balanços (massa [M], energia [E] e exergia [B]), estes são vetores coluna da matriz de incidência, para o cumprimento das Leis da Termodinâmica temos que:

$$A \times M = 0 \quad (10)$$

$$A \times E = 0 \quad (11)$$

$$A \times B = D \quad (12)$$

Onde:

- M : vetor coluna de dimensão m que representa a massa dos fluxos;
- E : vetor coluna de dimensão m que representa a energia dos fluxos;
- B : vetor coluna de dimensão m que representa a exergia dos fluxos;
- D : vetor coluna de dimensão n que representa a exergia destruída;
- \times : representa a operação de multiplicação de uma matriz com um vetor coluna (será utilizado o mesmo símbolo para as operações posteriores nesta seção).

Neste ponto é válida a observação de que a notação adotada por Valero é ligeiramente da tradicional. Com um maior detalhamento da matriz de incidência (e por consequência da planta em si) maior a capacidade de avaliação dos processos e ineficiências. Tomando um elemento genérico j dos vetores de massa, energia e exergia este corresponde a um fluxo de massa, m_j representa a massa propriamente dita, E_j a energia e B_j a exergia deste fluxo. Já D_j do vetor

coluna D expressa a exergia destruída devido as irreversibilidades internas. A formulação se dá pelas seguintes relações:

$$E_J = m_j(h_j - h_{j,0}) \quad (13)$$

$$B_J = m_j[h_j - h_{j,0} - T_0(s_j - s_{j,0})] \quad (14)$$

Em fluxos de calor a fórmula a ser aplicada é:

$$B_J = Q_j[1 - T_0/T_j] \quad (15)$$

Para fluxos de trabalho B_J é dado por:

$$B_J = W_j \quad (16)$$

2.4.2.2 Estrutura Produtiva (F-P-L)

Para uma boa análise devem estar bem determinados quais são os fluxos que representam os produtos, recursos consumidos e perdas para cada subsistema. Para tal devem ser analisadas as especificidades de cada um em separado. A definição da estrutura produtiva deve seguir:

- I. Todos os fluxos que entram ou deixam os subsistemas devem estar contidos no F-P-L e aparecer apenas uma vez:
- II. Todos os subsistemas devem apresentar os valores de combustíveis, produtos e perdas positivos ou nulos.

2.4.2.3 Custo Exergético

Na análise de formação de custos de fluxo internos e produtos do sistema, levando em consideração somente aspectos físicos a variável relevante é o custo exergético (B^*), a qual reflete a real quantidade de exergia para a produção dos produtos.

Para um problema genérico de planta térmica, com a exergia dos fluxos conhecida o balanço de equações dos fluxos exergéticos dos subsistemas fornecerão ao sistema o respectivo número de equações, conforme a Equação (17), onde \times representa a operação de multiplicação de uma matriz com um vetor coluna (esta mesma operação será utilizada nas equações 18, 19, 20 e 21).

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = \mathbf{0} \quad (17)$$

O número de fluxos é geralmente maior que o de componentes, assim haverá a necessidade de $m - n$ equações auxiliares para se determinar os custos exergéticos dos fluxos. Faz-se necessário a definição da matriz produtiva (α) e do vetor coluna ω que dirá as equações auxiliares necessárias.

$$\alpha \times \mathbf{B}^* = \omega \quad (18)$$

Assim a formulação para o cálculo se dá por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \alpha \end{bmatrix} \times \mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (19)$$

Se definirmos \mathbb{A} e \mathbb{Y}^* como:

$$\mathbb{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \alpha \end{bmatrix} \text{ e } \mathbb{Y}^* = \begin{bmatrix} -\mathbf{Y}^* \\ \omega \end{bmatrix} \quad (20)$$

O sistema em sua forma mais compacta será:

$$\mathbb{A} \times \mathbf{B}^* = \mathbb{Y}^* \quad (21)$$

Segundo Lozano e Valero (1993) o procedimento para determinação dos custos se dá através das proposições apresentadas a seguir:

- **P1:** O custo exerético é uma propriedade conservativa;
- **P2:** No caso de um fluxo de saída de um subsistema ser parte do recurso deste subsistema, este terá seu custo exerético unitário igual ao do fluxo de entrada do qual este é advindo.
- **P3:** Se o subsistema possui um produto que é composto por vários fluxos o mesmo custo exerético unitário será adotado para todos estes fluxos. Dentro do mesmo subsistema os processos de formação destes fluxos são inseparáveis para o nível de agregação considerado;
- **P4:** Os custos do processo produtivo devem ser levados em conta no custo dos produtos finais, na falta de informações externas o valor atribuído para os custos das perdas da planta deve ser zero.
- **P5:** Sem informações externas a exerergia é igual aos custos energéticos que entram na planta:

$$B_j^* = B_j \quad (22)$$

3 ESTUDO DE CASO – PARANAGUÁ, LITORAL PARANAENSE

3.1 Município de Paranaguá/PR

O município de Paranaguá situa-se no estado do Paraná, mais especificamente na região litorânea do estado este tópico é dedicado à uma breve descrição da cidade levando em conta alguns fatores relevantes para o presente estudo. O Mapa 1, a seguir dá uma ideia geral, em especial dos limites do município, hidrografia, tipologias de ecossistemas e onde encontra-se o centro urbano. É possível observar as dificuldades para fornecimento dos serviços básicos no município em decorrência de grandes áreas de mangue, comunidades isoladas e vias de acesso. Além deste e de outros mapas que serão apresentados nesta seção do texto, outros mapas que descrevem características menos relevantes para um estudo inicial como este encontram-se no Apêndice: Mapas Relevantes Para Caracterização Local (Plano diretor do Município de Paranaguá).

724742.987E

737238.556E

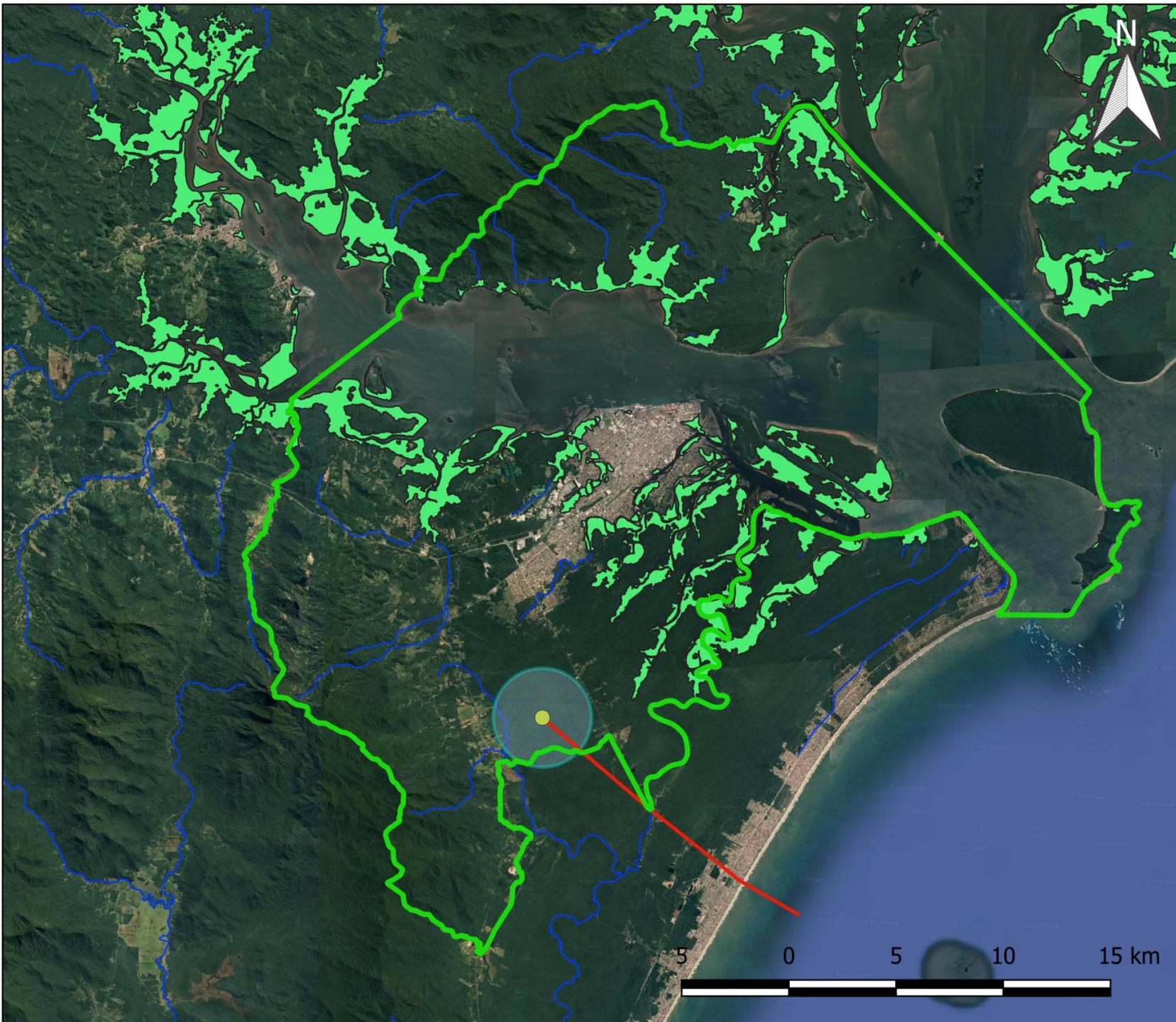
749734.124E

762229.693E

7184952.025N

7172456.456N

7159960.888N



Localção da Planta

- Planta
- Buffer 2,3 Km
- Liminites Município - Paranaguá
- Manguezais
- Aterro
- Rios Principais
- Adutora

Comprimento Aproximado da Adutora - 14,5 Km



SISTEMA DE COORDENADAS E
PROJEÇÃO UNIVERSAL
SIRGAS 2000 / UTM ZONE 22S - EPSG:
31982

Bases Cartográficas: IBGE, Prefeitura de
Paranaguá, IAT, Google Earth e acervo
próprio



3.2 Clima

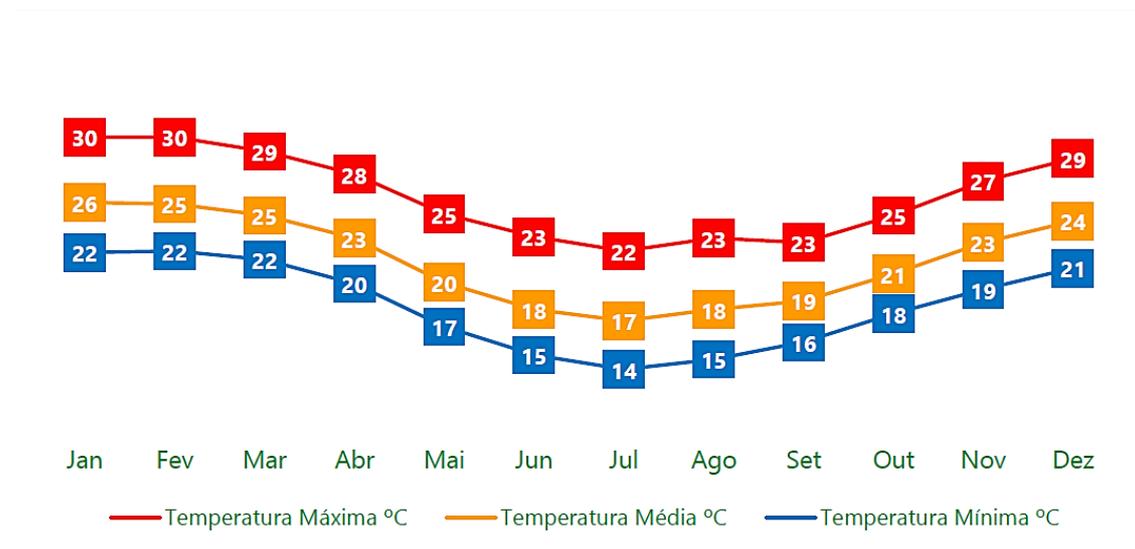
O município encontra-se em uma região onde o clima é caracterizado como tropical superúmido. Segundo dados do plano diretor a temperatura média anual varia de 19°C a 21°C, a precipitação média anual é de 2.100 mm e a umidade relativa média 85%.

Tabela 7 - Acumulados de precipitação para o município (1925-2019).

Maiores acumulados de precipitação em 24 horas registrados em Paranaguá por meses (INMET)					
Mês	Acumulado	Data	Mês	Acumulado	Data
Janeiro	295,8 mm	25/01/2004	Julho	88,4 mm	08/07/1995
Fevereiro	213,4 mm	12/02/1993	Agosto	83,1 mm	01/08/2011
Março	212 mm	06/03/2017	Setembro	102,6 mm	20/09/1998
Abril	157,8 mm	01/04/1954	Outubro	137,0 mm	22/10/1997
Mai	88,2 mm	25/05/1982	Novembro	152, mm	07/11/1984
Junho	119,6 mm	21/06/2013	Dezembro	148,6 mm	05/12/2020

Fonte: INMET.

Gráfico 1 - Temperaturas médias anuais em Paranaguá.



Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

3.3 Cobertura Vegetal

O Plano Diretor do Município de Paranaguá apresenta uma caracterização da cobertura vegetal de acordo com a classificação do IBGE conforme mostrado a seguir:

Tabela 8 - Classificação da Vegetação no Município de Paranaguá.

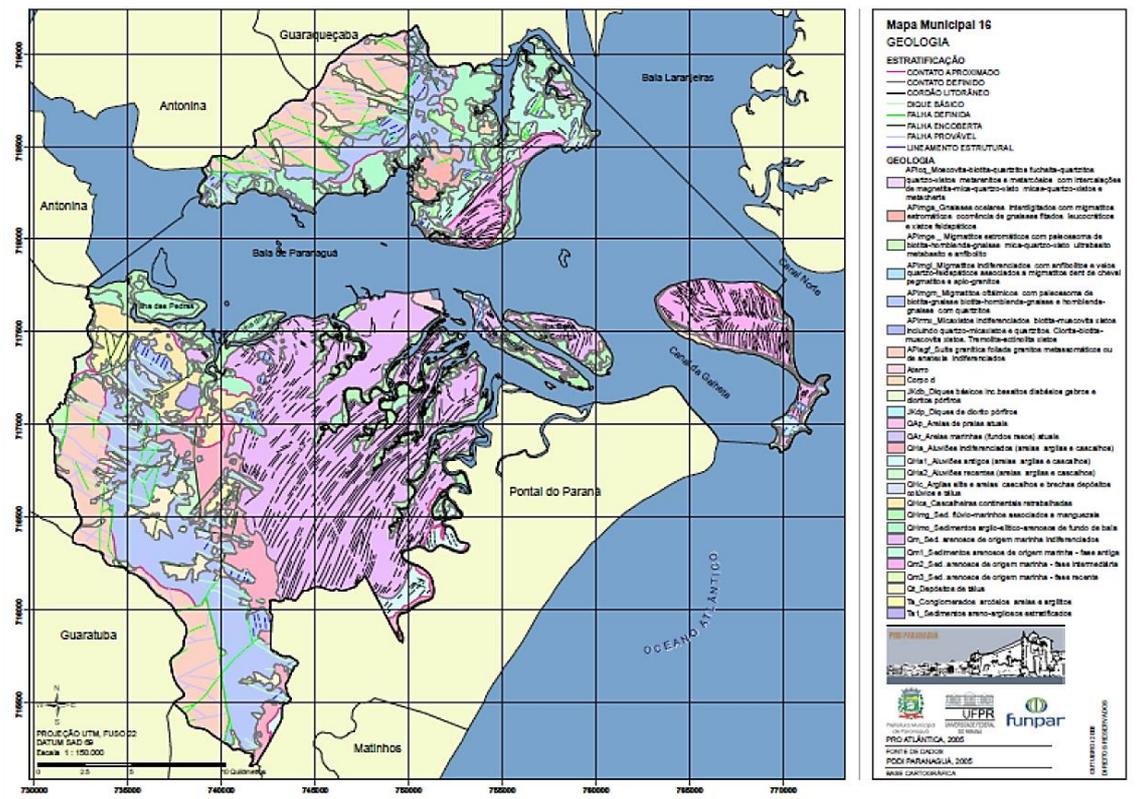
Unidade Serra do Mar		Unidade Planície Litorânea	
Floresta Atlântica do Início das Encostas	Floresta Ombrófila Densa Submontana	Floresta Atlântica de Planície Litorânea Sobre Solos Mal Drenados	Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas Sobre Solos Hidromórficos
Floresta Atlântica do Meio das Encostas	Floresta Ombrófila Densa Montana	Floresta Atlântica de Planície Litorânea Sobre Solos Moderadamente a Bem Drenados	Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas Sobre Solos Semi-Hidromórficos e Não-Hidromórficos
Floresta Atlântica do Alto das Encostas	Floresta Ombrófila Densa Altomontana	Restinga Herbáceo-Arbustiva	Áreas de Formações Pioneiras com Influência Marinha Herbáceo-Arbustiva
Campos de Altitude e vegetação Rupestre (acima de 1.400 m)	Áreas de Refúgios Vegetacionais Altomontanos		

Fonte: Adaptado de: Plano Diretor do Município de Paranaguá.

3.4 Relevo

A geologia é em resumo constituída basicamente por formações sedimentares da era Cenozoica (período quaternário, holoceno) e também por rochas do período Pré-Cambriano (Arqueano e Proterozóico Inferior). Uma pequena parcela é sustentada por fragmentos isolados de rocha intrusiva.

Mapa 2 - Geologia no município de Paranaguá.



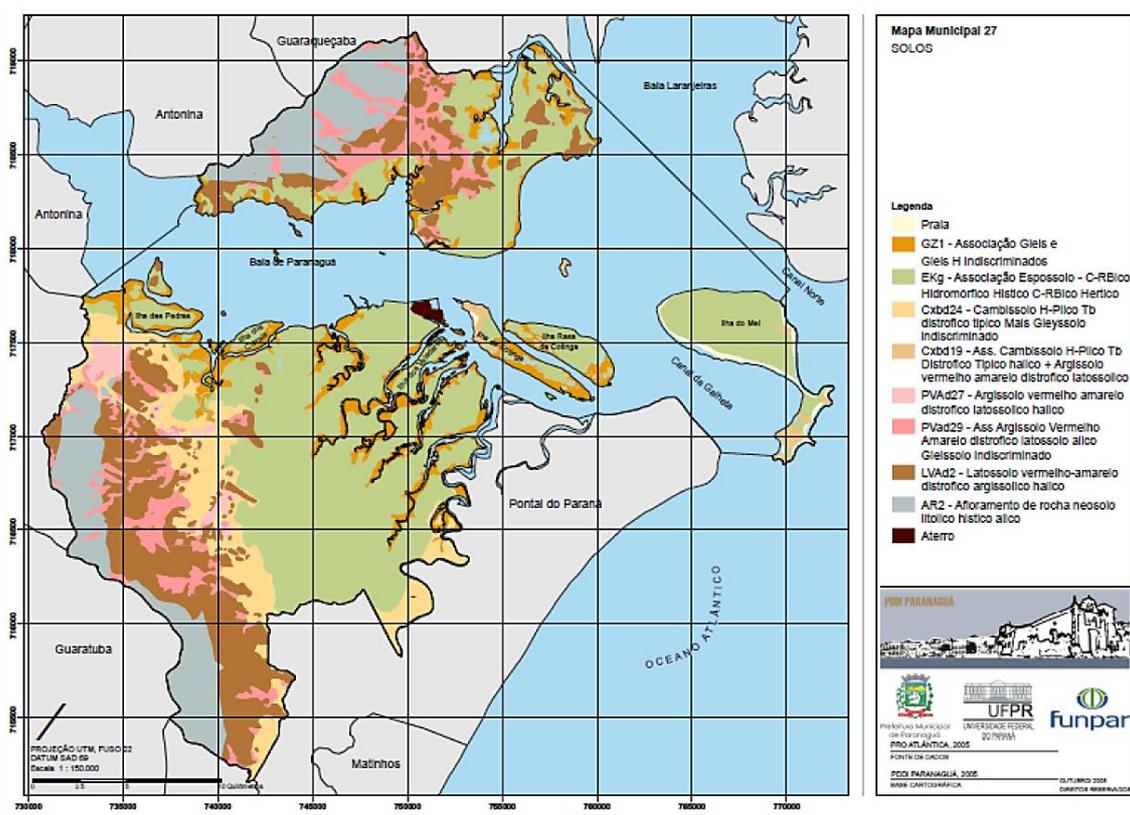
Fonte: Plano Diretor do Município de Paranaguá.

3.5 Solos

Como já demonstrado em parte no Mapa 1 - Município de Paranaguá/PR. as classes de solo presentes no município segundo a EMBRAPA são: Mangue; Organossolos; Neossolos; Qantzarênicos; Espodossolos; Solos Aluviais; Gleissolos.

Nas cadeias de elevações as classes são: Podzólicos e Cambiossolos.

Mapa 3 - Tipificação dos solos.



Fonte: Plano Diretor do Município de Paranaguá.

3.6 Hidrografia

Para a bacia hidrográfica em qual o município se enquadra foi elaborado o PHBL (Plano da Bacia Hidrográfica Litorânea) no ano de 2019, este divide a bacia em Áreas Estratégicas de Gestão (AEG's), no território pertencente ao município encontram-se duas destas AEG's a do Rio Faisqueira e a do Rio Guaraguaçu.

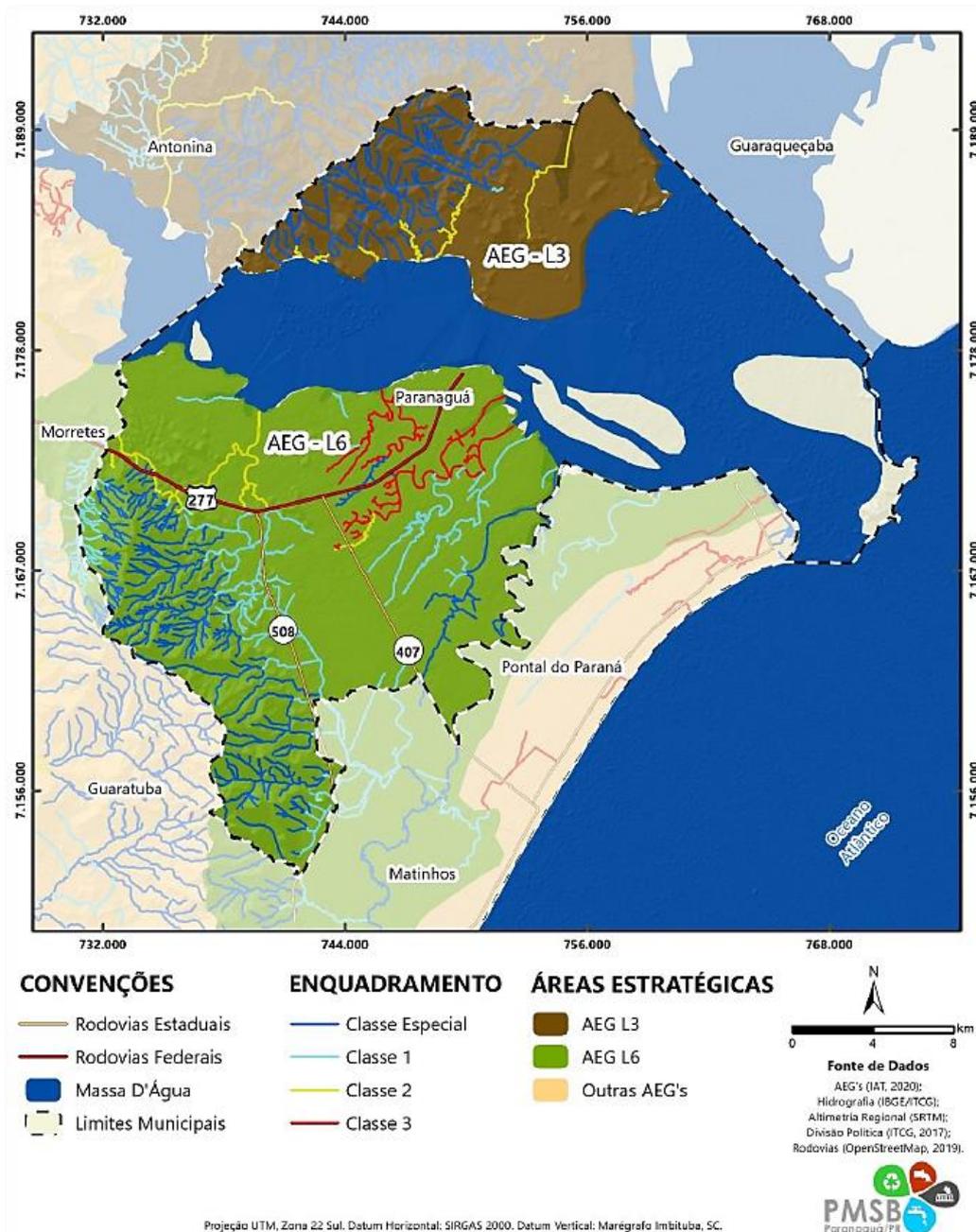
Tabela 9 - Caracterização das AEG's presentes no município de Paranaguá.

Características	AEG-L3 (Faisqueira)	AEG-L6 (Guaraguaçu)
Área (km ²)	507,960	585,960
Disponibilidade Hídrica Superficial (L/s)	11.391,270	10.158,340
Carga Remanescente DBO (kg/d)	145,650	5.222,270
Balanco Hídrico Superficial (Captada)	0,002	0,191
Balanco Hídrico Superficial (Consumida)	0,001	0,049
Balanco Hídrico Superficial (Apropriada)	0,002	0,242
Disponibilidade Hídrica Subterrânea (L/s)	634,560	698,730
Balanco Hídrico Subterrâneo (Captada)	0,007	0,399
Balanco Hídrico Subterrâneo (Consumida)	0,001	0,080

Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

O PBHL também estabeleceu um enquadramento dos corpos hídricos (a ser atingido até 2035) conforme mostrado no Mapa 4 a seguir:

Mapa 4 - Enquadramento proposto para as AEG's.



Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

O Plano da Bacia identifica que a AEG do Rio Guaraguaçu, na qual os cursos d'água desaguam na porção sul da baía de Paranaguá e tem em seus limites a própria área urbana de Paranaguá, apresenta os maiores níveis de risco do estado. Em especial fora do período chuvoso, aonde a disponibilidade hídrica é menor. Porém o plano também ressalta que se deve ter atenção mesmo no período chuvoso, pois neste a população flutuante do município aumenta consideravelmente devido ao fato de ser a alta temporada turística.

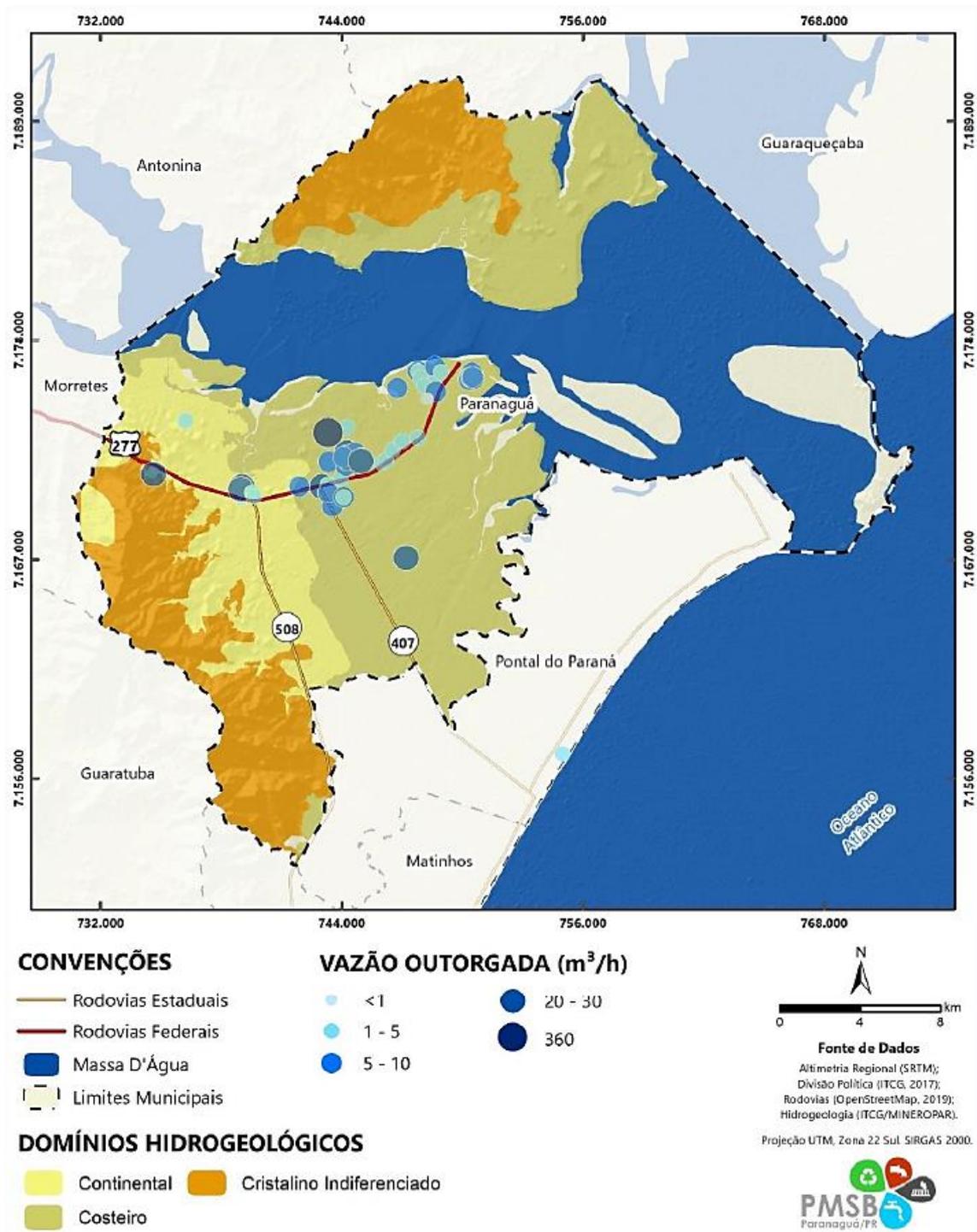
Tabela 10 - Demanda hídrica atual calculada para Paranaguá.

Usos	Superficial		Subterrânea		Total	
	L/s	%	L/s	%	L/s	%
Abastecimento Público	556,44	69,35	111,67	41,59	668,11	62,39
Industrial	31,25	3,89	145,27	54,10	176,52	16,48
Agricultura	149,81	18,67	1,58	0,59	151,39	14,14
Pecuária	34,17	4,26	1,81	0,67	35,98	3,36
Mineração	5,00	0,62	2,22	0,83	7,22	0,67
Pesca e Aquicultura	25,69	3,20	5,97	2,22	31,66	2,96
Total	802,36	74,93	268,52	25,07	1.070,88	100,00

Fonte: Adaptado de: PBHL, 2019.

Os domínios hidro geológicos, bem como as vazões outorgadas são demonstradas no Mapa 5 - Domínios hidrogeológicos e poços outorgados..

Mapa 5 - Domínios hidrogeológicos e poços outorgados.

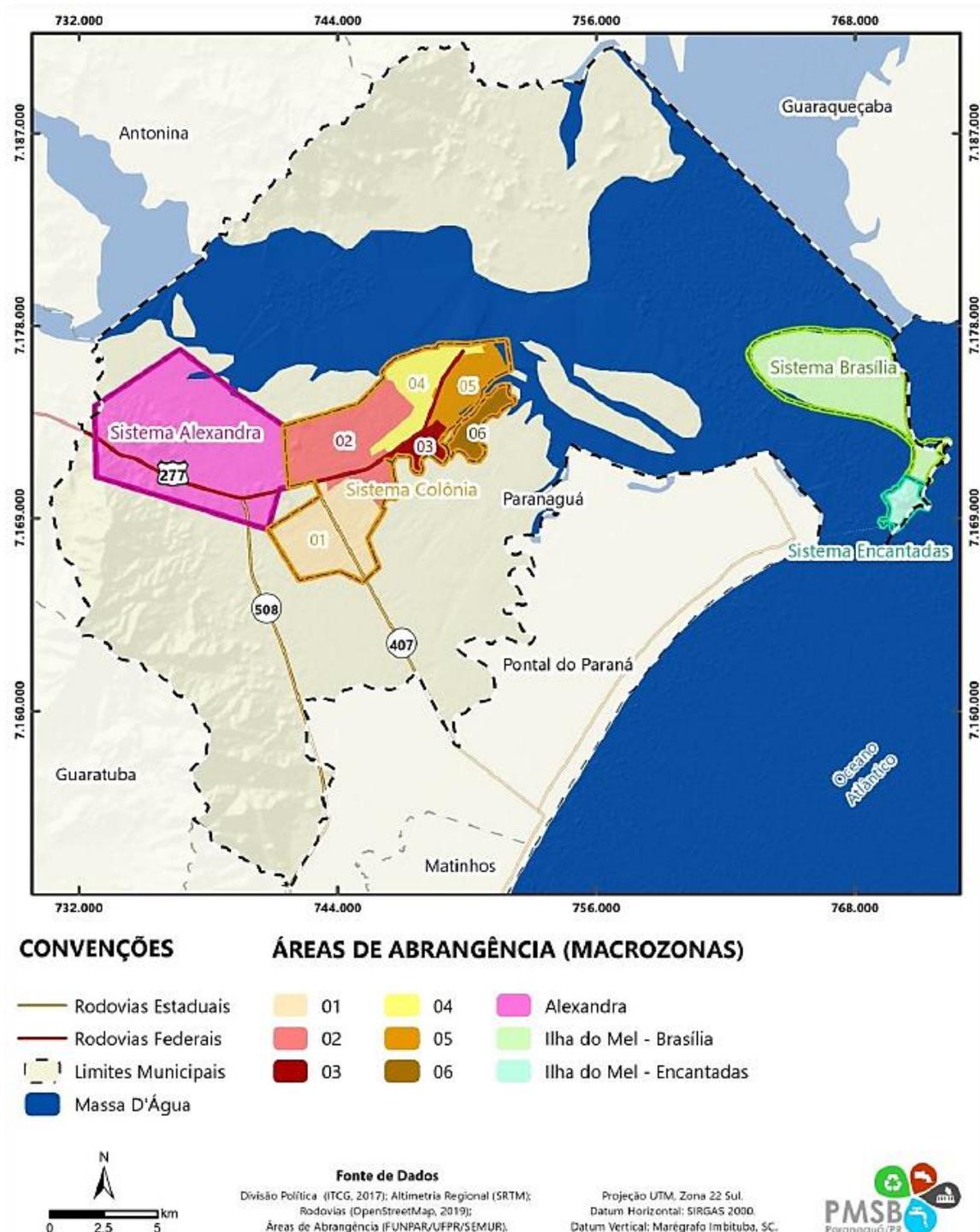


Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

3.7 Sistema de Abastecimento de Água Potável

Para o município, em sua área urbana, existem quatro sistemas de abastecimento de água potável. A Paranaguá Saneamento S.A. (PSSA) opera estas unidades, são elas: Colônia; Alexandra; Brasília; Encantadas.

Mapa 6 - Sistemas de abastecimento de água potável em Paranaguá e sua área de abrangência.



Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

Segundo Plano Municipal de Saneamento do município aproximadamente 45,92% da água produzida é perdida nos sistemas de distribuição.

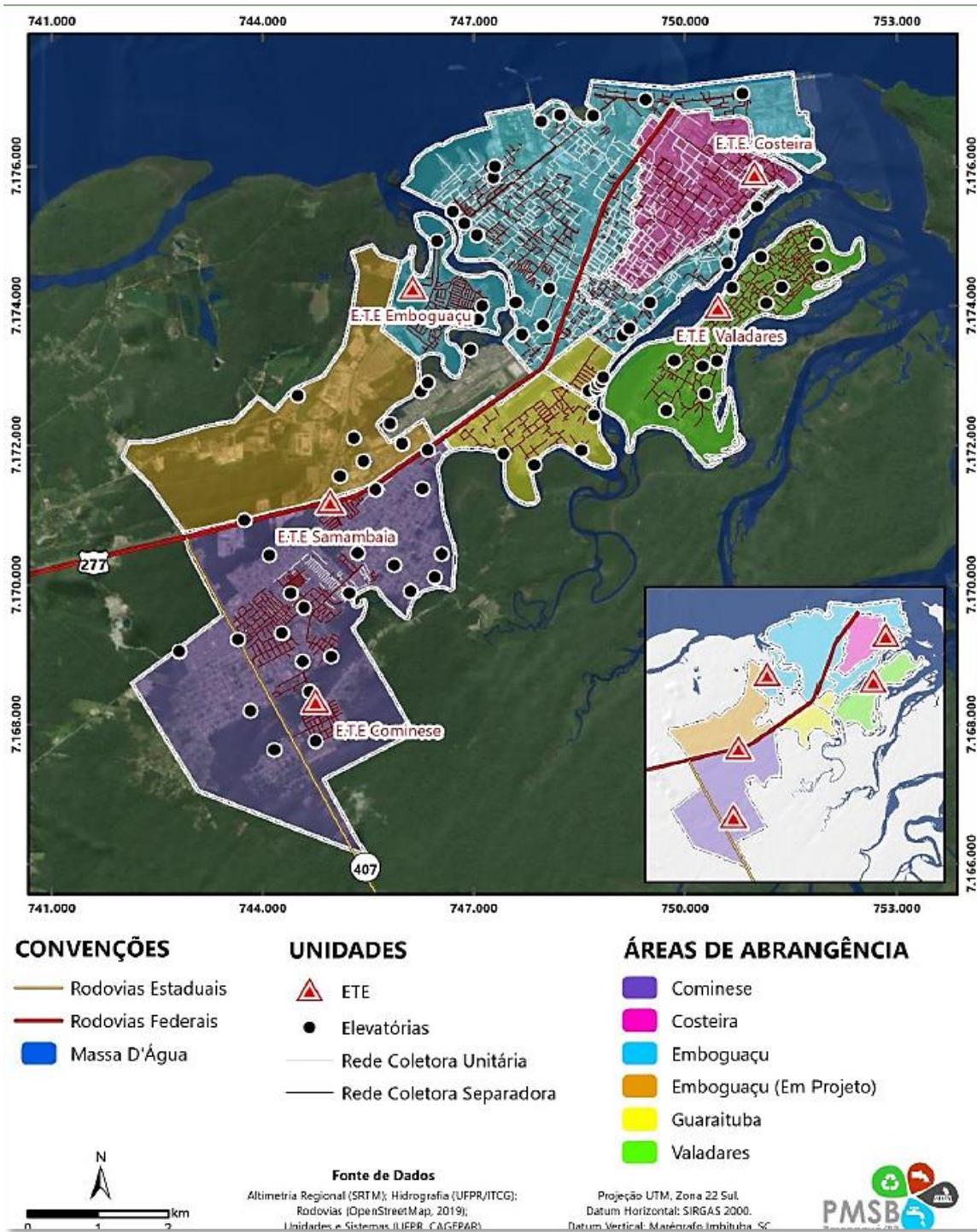
Devido a configuração do município (com áreas rurais e ilhas) somente as unidades descritas acima não são o suficiente para o atendimento da população. Para isto existem sete sistemas com soluções alternativas para o abastecimento, além destes existem também soluções individuais utilizando poços com captação de água subterrânea.

Atualmente as maiores fragilidades do sistema concentram-se nos locais carentes, vulneráveis, muitas áreas encontram-se em situação irregular e não possuem nenhum atendimento. Além destas, o sistema de abastecimento não possui dimensão para atender a demanda futura e encontra dificuldades para o monitoramento da qualidade da água nas captações subterrâneas individuais.

3.8 Descrição do Sistema de Esgotamento Sanitário

Em resumo o sistema no município se divide nas situações: Sistema de drenagem com soluções individuais de esgotamento sanitário; ausência de infraestrutura sanitária; sistema unitário/misto com tratamento; sistema unitário/misto sem tratamento e sistema separador absoluto com tratamento (PMSB, 2021).

Mapa 7 - Sistema de esgotamento sanitário de Paranaguá.

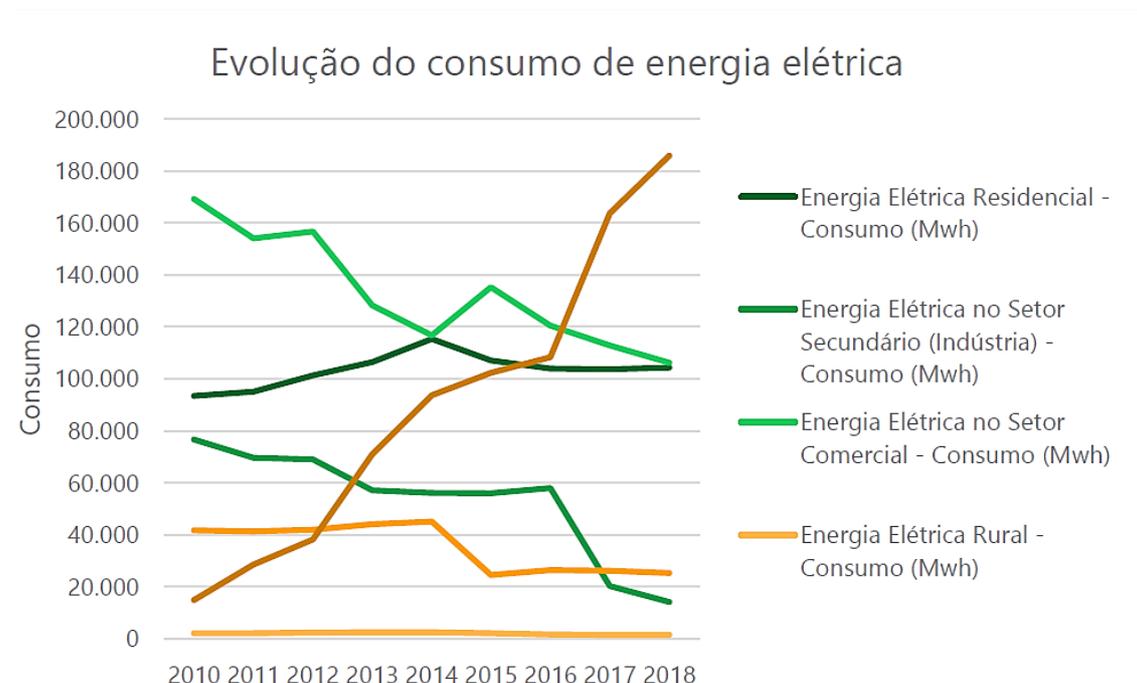


Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

3.9 Caracterização Elétrica

O fornecimento de energia elétrica do município é feito pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia). Segundo dados da própria empresa o aumento da demanda de energia elétrica é constante ano a ano.

Gráfico 2 - Evolução do consumo de energia elétrica em Paranaguá (2010-2018).



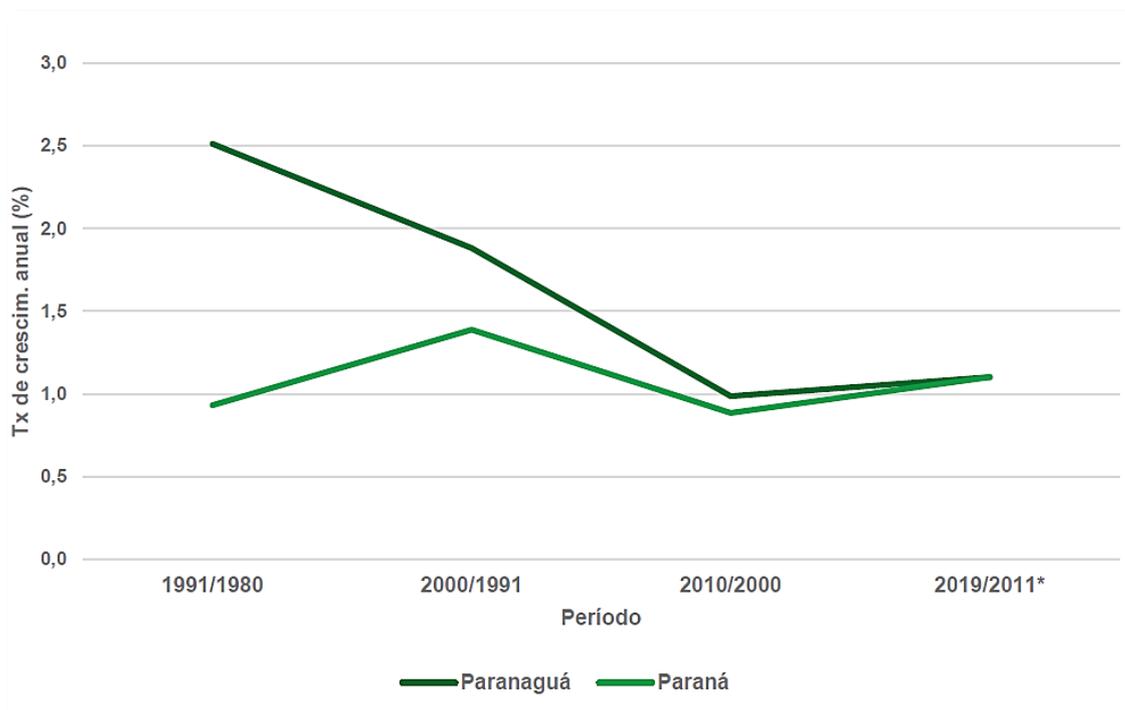
Fonte: COPEL, 2021.

Os menores níveis de consumo são no setor rural, em contrapartida o setor comercial apresentou aumento no período de referência, e o consumo residencial apresentou incremento até a metade do período e posterior redução na segunda metade são os que apresentam maiores índices de consumo.

3.10 Caracterização Sócio Econômica

Segundo o IBGE o IDH do município é de 0,782, colocando o estado no 58º lugar dentro do estado, e a sua população estimada para o ano de 2021 é de 157.043 pessoas.

Gráfico 3 - Taxa de crescimento anual da população residente total- Paranaguá e Paraná - 1991-1980 - 2019/2011.



Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

Conforme estudos para o Plano diretor do município, existe uma relação entre a ruralidade e a taxa de pobreza nos municípios do litoral paranaense. O município “mais rural” do litoral é Guaraqueçaba, o qual apresenta maior taxa de pobreza, já Paranaguá tem 19,1% de sua população nesta situação.

Tabela 11 - Índice de desenvolvimento Humano e taxa de pobreza por município do litoral paranaense.

Município	1991	2000	Ranking Estadual 2000	Taxa de Pobreza
Antonina	0,687	0,770	90	33,9
Guaraqueçaba	0,584	0,659	393	49,1
Guaratuba	0,678	0,764	107	21,9
Matinhos	0,726	0,793	33	18,5
Morretes	0,667	0,755	141	23,8
Paranaguá	0,718	0,782	60	19,1
Pontal do Paraná	0,670	0,788	43	20,2
Metrop. De Curitiba	-	-	-	14,1
Paraná	0,760	0,787	-	20,9

Fonte: Adaptado de: PNUD; IPARDES.

Outros índices que demonstram o perfil socioeconômico do município são demonstrados na tabela a seguir:

Tabela 12 - Indicadores socioeconômicos do município de Paranaguá.

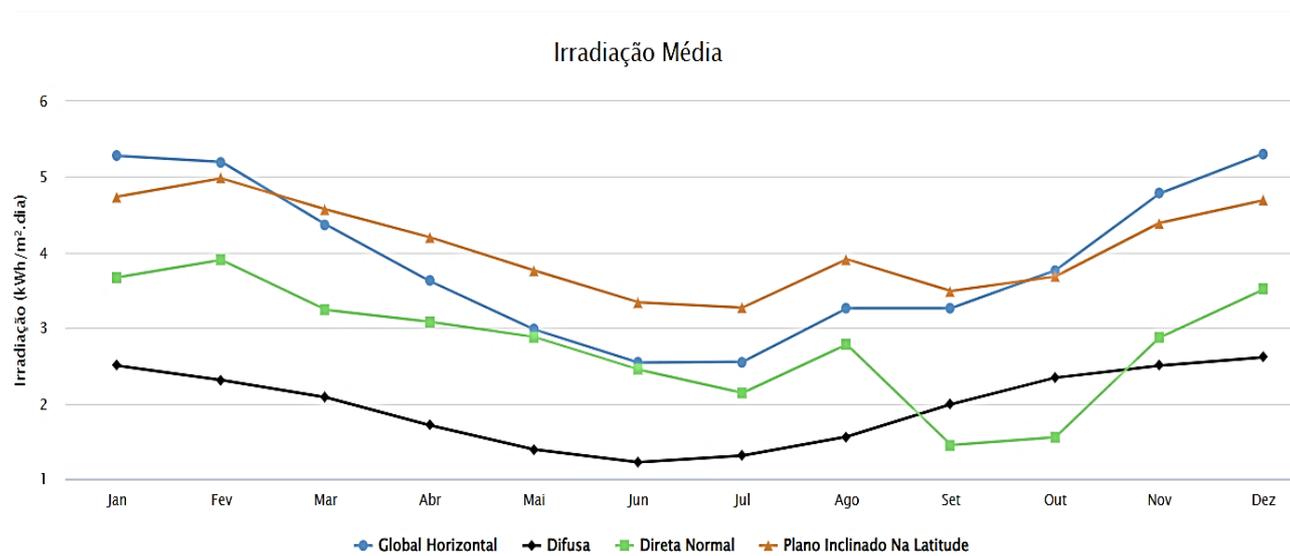
Educação								
Taxa de Frequência Escolar por Grupos Etários								
0 a 3 anos		4 a 6 anos	7 a 14 anos	15 a 17 anos	18 a 22 anos	Mais de 22 anos		
6,03		43,28	95,57	72,38	31,95	4,96		
Saúde								
Coeficiente de Mortalidade Infantil		Número de Hospitais	Total de Leitos Hospitalares (Incluindo UTI)		Leitos Hospitalares por mil habitantes			
22,7		2	140		1,1			
Habitação								
Média de Moradores por Domicílio		Domicíli. Part. Permanentes	Déficit Habita. (%)	Inadequação Habitacional Por Infraestrutura				
Urbana	Rural	34.541	8,02	Carência	Deficiência	Por Adensamento Excessivo		
3,62	3,73			4.993	3.416	3.36		
Emprego e Renda								
População Com Idade Ativa	População Economicamente Ativa	Ocupados	Taxa de Atividade (%)	Taxa de Desemprego (%)	Distribuição dos Ocupados (%)			
					Agropecuária	Indústria	Comércio	Serviços
100.237	52.762	45.058	52,6	14,6	3,3	18,1	21,4	39,5

Fonte: Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado de Paranaguá.

3.11 Radiação Solar

Segundo o Atlas de Energia Solar do Paraná a irradiação média do município de Paranaguá é maior nos meses de verão e após o fim da estação esta decai e começa crescer somente no mês de agosto. A média anual de produtividade diária fica na faixa entre 3,0 e 3,5 kWh/kwp.dia.

Gráfico 4 - Irradiação média para o município de Paranaguá.

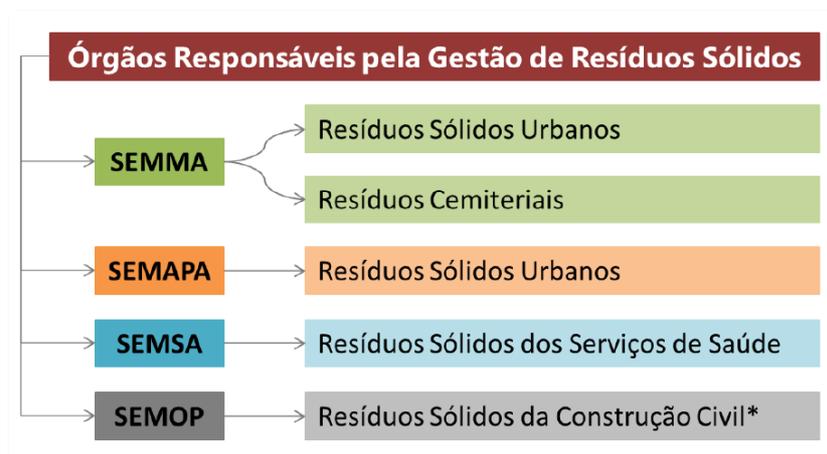


Fonte: Atlas de Energia Solar do Paraná, 2021.

3.12 Resíduos Sólidos Urbanos

Os órgãos da Prefeitura Municipal de Paranaguá que atuam na gestão dos resíduos sólidos são os demonstrados na Figura 9.

Figura 9 - Órgãos da Prefeitura Municipal de Paranaguá responsáveis pela gestão de Resíduos sólidos no município de Paranaguá.



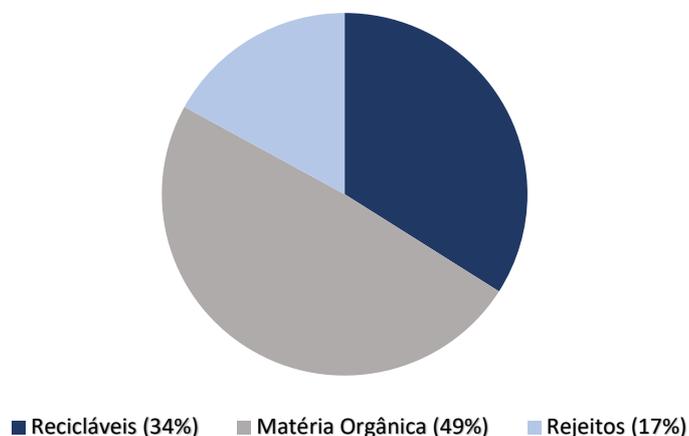
Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

A PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos) estabelece que os resíduos sólidos urbanos (RSU) são compostos por resíduos domiciliares e de limpeza pública. O Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS/PR) estimou as taxas de composição dos RSU e no

Plano Municipal de Saneamento Básico do Município são estimadas as quantidades de geração de resíduos sólidos urbanos.

Gráfico 5 - Composição dos resíduos sólidos urbanos no Estado do Paraná.

Composição dos RSU



Fonte: Adaptado de: PERS/PR, 2018

Tabela 13 - Composição e geração de RSU estimadas no município de Paranaguá conforme as taxas do PERS/PR e a população estimada pelo IBGE para 2020.

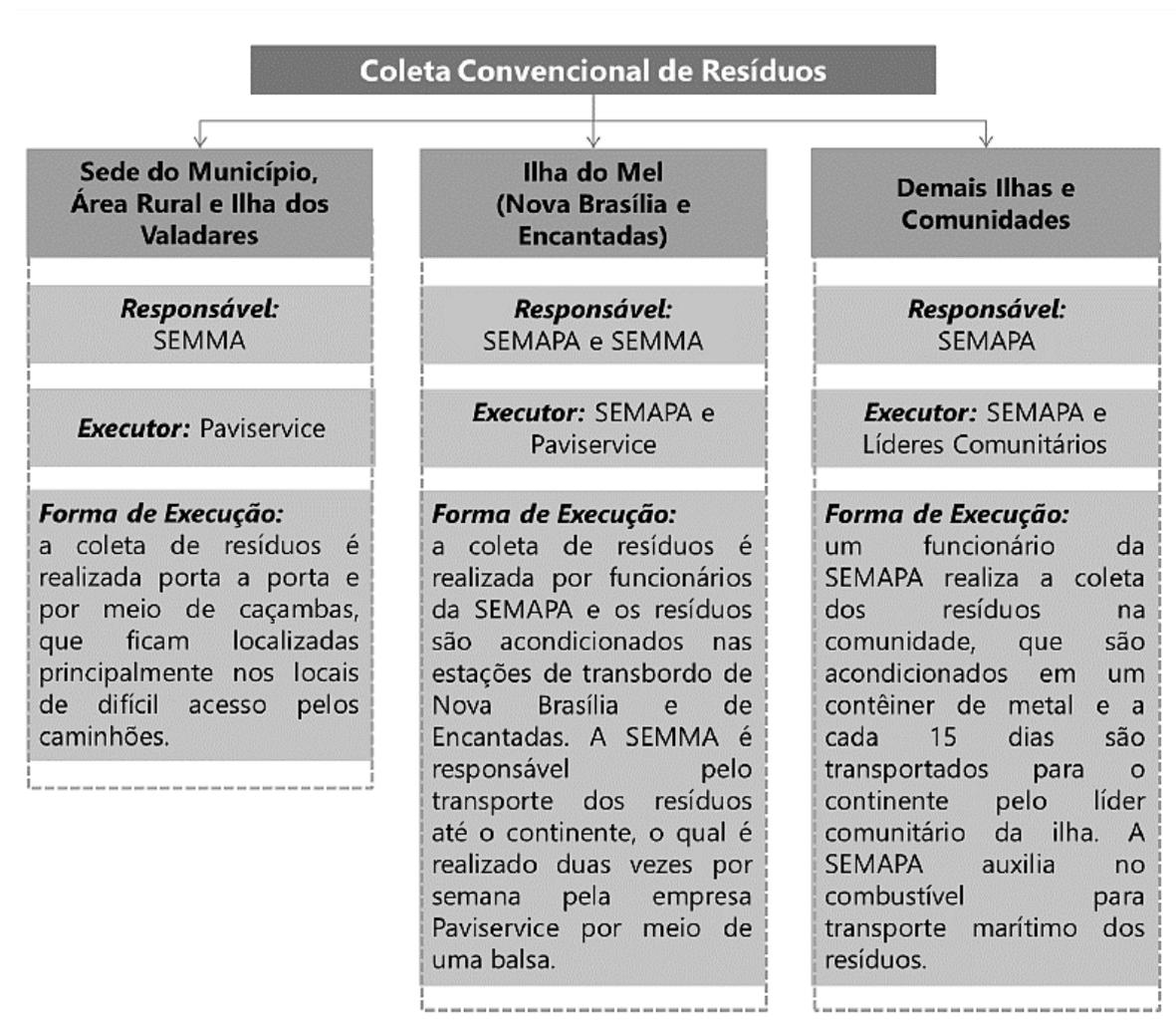
Recicláveis (t/ano)	Matéria Orgânica (t/ano)	Rejeitos (t/ano)	Total (t/ano)
15.504,95	22.345,38	7.752,48	45.602,81

Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

3.12.1 Coleta Convencional

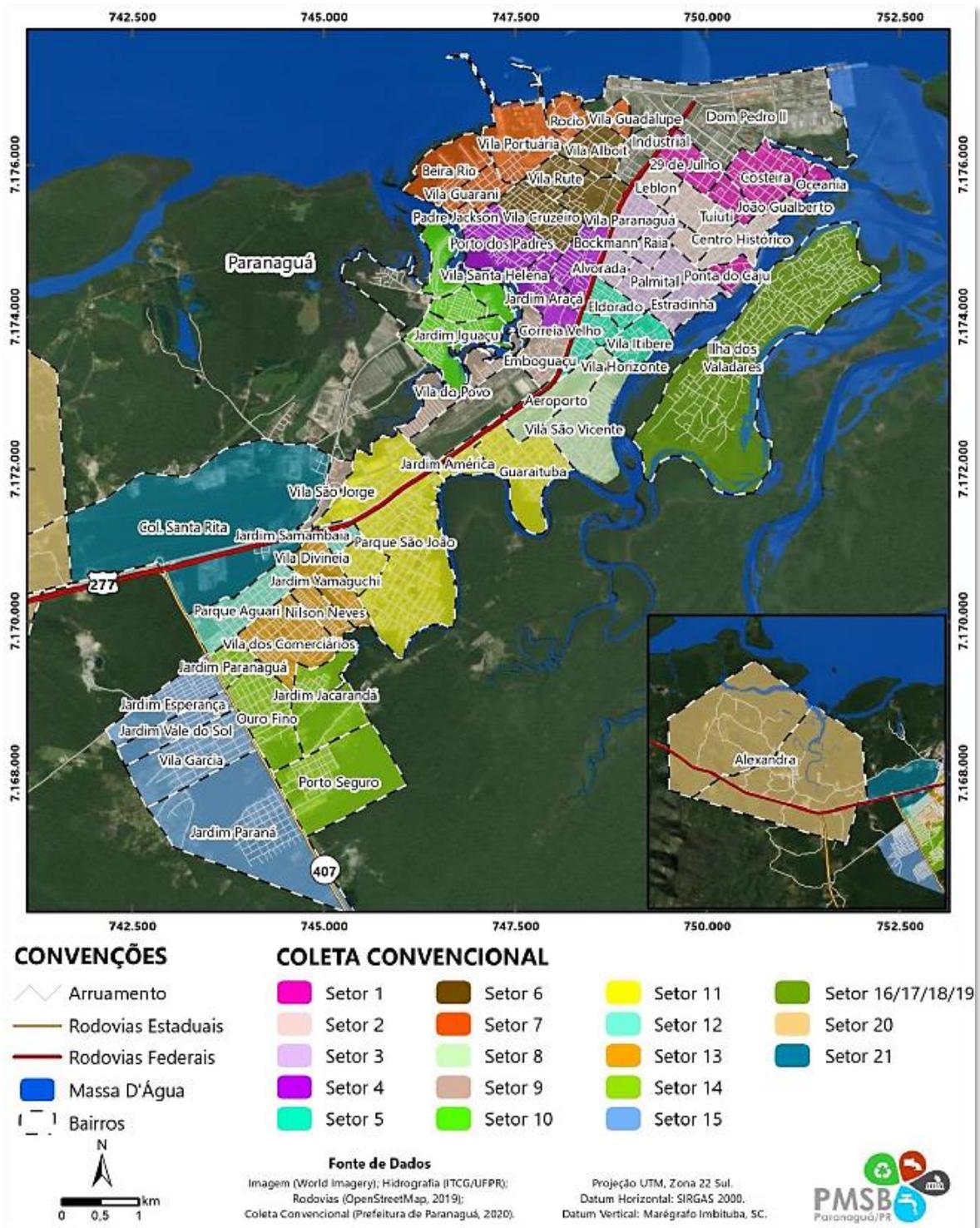
Os agentes responsáveis, executores e formas de execução dos serviços de coleta são apresentados no Fluxograma 8, conforme dados da SEMA (Secretaria Municipal de Meio Ambiente) 99% da população do município é atendida pela coleta.

Fluxograma 8 - Execução de coleta convencional de RSU no município de Paranaguá.



Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

Mapa 8 - Setores de coleta convencional no município de Paranaguá.



Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

3.12.2 Limpeza Pública

A seguir serão apresentados dados acerca da execução dos serviços de limpeza pública.

Fluxograma 9 - Execução dos serviços de limpeza pública no município de Paranaguá.



Fonte: PMSB de Paranaguá, 2021.

3.12.3 Destino Final dos Resíduos Sólidos Urbanos em Paranaguá

Para o descarte dos resíduos sólidos urbanos o município se utiliza de aterro sanitário, este é operado por uma empresa privada (JM Tratamento de Resíduos) e encontra-se no próprio município. Este possui licença ambiental de operação para receber 50t/dia de resíduos classe II, porém segundo dados da própria empresa que faz a gestão do aterro este recebe 230 toneladas/dia (este valor recebe contribuições de Morretes e Antonina, cerca de 17,3% do total). A estimativa de vida útil do aterro é de 11 anos, porém está em processo expansão da área licenciada pelo Instituto Água e Terra (IAT).

Mesmo com a licença ambiental o aterro gera degradação ambiental no entorno, afetando além do meio ambiente a qualidade de vida da população, existem no mistério público ações movidas contra a empresa que opera o aterro.

Mapa 9 - Unidades de destinação final de resíduos no município de Paranaguá.

Fonte:
PMSB

de



Paranaguá, 2021.

4 METODOLOGIA

Após a apresentação dos referenciais teóricos, o presente estudo realizou a Avaliação Exergética da Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada (utilizando água marinha) a partir da Queima de Resíduos Sólidos Urbanos (estimativa de utilização de cerca de 30 mil toneladas por ano) Energia Solar (cerca de 2 kWh/m²dia, [média anual de irradiação direta normal) no Município de Paranaguá/PR.

O suprimento de energia considerado foi advindo da energia solar durante o período de insolação e para que a produção seja constante o nos períodos sem irradiação solar o aporte foi da energia que provém da queima de RSU. Foi considerada uma média de 8 horas de luz solar útil por dia.

Em resumo a planta proposta é composta de um sistema de incineração de resíduos sólidos urbanos, sistema de concentração solar e unidades de dessalinização por osmose inversa e por MSF.

Para a quantificação dos resultados são aplicados conceitos e equações apresentados na revisão bibliográfica sobre termodinâmica (balanços de primeira e segunda lei), análise exergética e Teoria do Custo Exergético (TCE) adaptada.

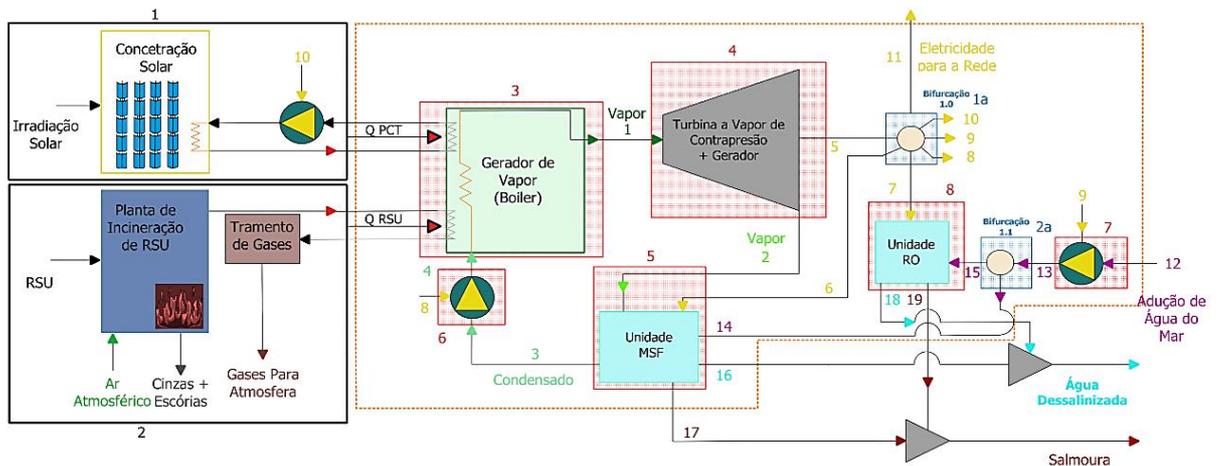
Os dados de processo foram obtidos da literatura e os resultados são comparados com as referências.

4.1 Planta Proposta

A planta dual híbrida proposta (Figura 10) utiliza o fluxo de calor provido pelos recursos (energia solar e queima de biomassa) nas unidades de concentração solar para ciclo a vapor (utilizando a tecnologia Parabolic Trough, Figura 6) e de incineração de resíduos sólidos urbanos. Estas duas unidades provem o aporte de calor para geração de vapor. O vapor produzido serve como recurso para a turbina de contrapressão e gerador, a extração da turbina é direcionada para a unidade MSF, a qual devolve condensado para o ciclo a vapor. A energia elétrica gerada é utilizada na unidade de dessalinização RO, como aporte para a unidade MSF, motores e bombas. Por fim os produtos são a energia elétrica e a água dessalinizada e o rejeito principal do processo é a salmoura. Com o intuito de realizar um estudo para uma planta que funcione por 24 horas por dia os cálculos dos custos exergéticos são divididos em duas partes: uma operando por 8 *h/dia*

(horas solares úteis no município de Paranaguá) com aporte da energia solar e 16 h/dia com aporte da incineração de RSU.

Figura 10 - Diagrama simplificado para produção de energia elétrica e água dessalinizada utilizando sistema híbrido a partir da incineração de RSU utilizando aporte de energia solar.



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Dados de Entrada para a Modelagem

Nesta seção são elencadas as fontes e ajustes para os estados termodinâmicos dos fluxos (demonstrados na Tabela 16 - Correntes da planta proposta e seus respectivos estados.) da planta proposta, bem como para as eficiências das unidades componentes.

A análise será resumida aos volumes de controle de 3 a 8 e as junções de água pura e salmoura, considerando somente o calor fornecido pelas plantas de incineração e concentração solar.

Os volumes de controle abordado neste estudo são:

- Volume de controle 03 – Gerador de vapor (boiler);
- Volume de controle 04 – Turbina a vapor de contrapressão + gerador;
- Volume de controle 05 – Unidade de dessalinização térmica MSF;
- Volume de controle 06 – Bomba + motor de condensado;
- Volume de controle 07 – Bomba + motor para adução da água do mar e alimentação da planta, esta terá seu aporte de potência não somente para levar a corrente 12 para o estado da corrente 13 mas também será

considerada a energia necessária para realizar a adução do ponto de captação até a localização da planta;

- Volume de controle 08 – Unidade de dessalinização elétrica Ro;
- Junção de água pura proveniente das unidades MSF e RO;
- Junção de salmoura proveniente das unidades MSF e RO.

Os valores para a entalpia e entropia foram obtidos por meio do *software Interactive Thermodynamics Versão 3.1*, para a água bruta e salmoura os valores foram ajustados conforme sua salinidade como será demonstrado nas seções posteriores e para as correntes que atravessam volumes de controle onde será aplicada conceitos da termomecânica as entalpias foram calculadas conforme também será demonstrado no decorrer do texto. Como a salmoura será considerada como uma perda do processo como um todo suas propriedades termodinâmicas na corrente 21 não foram calculados.

4.2.1 Simplificações

Para a realização dos cálculos serão consideradas as seguintes simplificações, estas foram adotadas com base na bibliografia:

- I. Equipamentos e sistemas adiabáticos;
- II. Irradiação solar constante durante o período útil;
- III. Efeitos de umidade desprezíveis para todas as análises realizadas;
- IV. Perdas de pressão nas tubulações internas da planta são desprezíveis;
- V. RSU é suficientemente misturado e apresenta valor de aquecimento uniforme
- VI. Nenhum trabalho de fronteira realizado;
- VII. As capacidades térmicas, entalpia específica e propriedades físicas para água do mar e salmoura são funções de temperatura e salinidade;
- VIII. Demanda total de potência da bomba = Demanda de Potência no V6 + Demanda de Potência para Adução;
- IX. Variações na energia potencial gravitacional e cinética foram desconsideradas;
- X. As exergias químicas das correntes foram desconsideradas;
- XI. As perdas (L) para a aplicação da termoeconomia foram desconsideradas em todos os volumes de controle.

4.2.2 Condição Ambiente

Serão definidas as propriedades do ar atmosférico (Temperatura [T_{amb}], Pressão [p_{atm}] e Umidade relativa [UR]) e da água a ser captada (Temperatura [T_{amb}], Pressão [p_{atm}] e Salinidade [TDS]).

Segundo dados do SIMEPAR e INMET os valores para o ar atmosférico e água do mar são os mostrados a seguir:

Tabela 14 - Parâmetros do Ar Atmosférico e Água do Mar em Paranaguá.

Propriedades	Ar Atmosférico	Água do Mar
Temperatura (T_{amb})	25 ° C	22,85 ° C
Pressão (p_{atm})	1 bar	1 bar
Umidade Relativa (UR)	85,4%	-
Salinidade (TDS)	-	35.000 ppm

4.2.3 Propriedades Termodinâmicas

As entalpias e entropias dos estados foram obtidas através do *software Interactive Thermodynamics 3.1* (Em anexo: Códigos *Interactive Thermodynamics V3.1* para os Volumes de Controle), para a água bruta e salmoura os valores das propriedades foram ajustados pela salinidade conforme equações apresentadas por H., Mosatafa 2010 - Propriedades termofísicas da água do mar: uma revisão das correlações e dados, as equações utiliza

I. Densidade

$$\rho_{sw} = (a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3 + a_5t^4) + (b_1S + b_2St + b_3St^2 + b_4St^3 + b_5S^2t^2) \quad (23)$$

Onde:

- ρ_{sw} é a densidade da água com presença de sal;
- $a_1 = 9,999 \times 10^2$;
- $a_2 = 2,034 \times 10^{-2}$;

- $a_3 = -6,162 \times 10^{-3}$;
- $a_4 = 2,261 \times 10^{-5}$;
- $a_5 = -4,657 \times 10^{-8}$;
- $b_1 = 8,020 \times 10^2$;
- $b_2 = -2,001$;
- $b_3 = 1,677 \times 10^{-2}$;
- $b_4 = -3,060 \times 10^{-5}$;
- $b_5 = -1,613 \times 10^{-5}$;
- S é a salinidade da água;
- t é a temperatura da água em °C.

II. Entalpia

$$h_{sw} = h_w - S(a_1 + a_2S + a_3S^2 + a_4S^3 + a_5t + a_6t^2 + a_7t^3 + a_8St + a_9S^2t + a_{10}St^2) \quad (24)$$

Onde:

- h_{sw} é a entalpia da água com presença de sal;
- h_w é a entalpia da água pura;
- $a_1 = -2,348 \times 10^4$;
- $a_2 = 3,152 \times 10^5$;
- $a_3 = 2,803 \times 10^6$;
- $a_4 = -1,446 \times 10^7$;
- $a_5 = 7,826 \times 10^3$;
- $a_6 = -4,417 \times 10^1$;
- $a_7 = 2,139 \times 10^{-1}$;
- $a_8 = -1,991 \times 10^4$;
- $a_9 = 2,778 \times 10^4$;
- $a_{10} = 9,728 \times 10^1$;
- S é a salinidade da água;
- t é a temperatura da água em °C.

III. Entropia

$$s_{sw} = s_w - S(a_1 + a_2S + a_3S^2 + a_4S^3 + a_5t + a_6t^2 + a_7t^3 + a_8St + a_9S^2t + a_{10}St^2) \quad (25)$$

Onde:

- s_{sw} é a entropia da água com presença de sal;
- s_w é a entropia da água pura;
- $a_1 = -4,231 \times 10^2$;
- $a_2 = 1,463 \times 10^4$;
- $a_3 = -9,880 \times 10^4$;
- $a_4 = 3,095 \times 10^5$;
- $a_5 = 2,562 \times 10^1$;
- $a_6 = -1,443 \times 10^{-1}$;
- $a_7 = 5,879 \times 10^{-4}$;
- $a_8 = -6,111 \times 10^1$;
- $a_9 = 8,041 \times 10^1$;
- $a_{10} = 3,035 \times 10^{-1}$;
- S é a salinidade da água;
- t é a temperatura da água em °C.

4.2.4 Estado Morto

A tabela a seguir apresenta os valores para o estado morto utilizado para o cálculo da Exergia dos fluxos:

Tabela 15 - Propriedades de estado morto utilizadas no estudo.

Estado Morto - Água Vapor	
Temperatura T0 (K)	296
Pressão p0 (kPa)	100
Entalpia Específica h0 (kJ/kg)	94,86
Entropia Específica s0 (kJ/kgK)	0,3334
Estado Morto - Água Bruta	
Temperatura T0 (K)	296

Pressão p0 (kPa)	100
Entalpia Específica h0 (kJ/kg)	90,1241
Entropia Específica s0 (kJ/kgK)	0,3157
Estado Morto - Salmoura	
Temperatura T0 (K)	296
Pressão p0 (kPa)	100
Entalpia Específica h0 (kJ/kg)	80
Entropia Específica s0 (kJ/kgK)	0,3871

*Entalpia e entropia da água com a presença de sais dissolvidos variam de acordo com a concentração dos sais.

4.2.5 Estados e Correntes

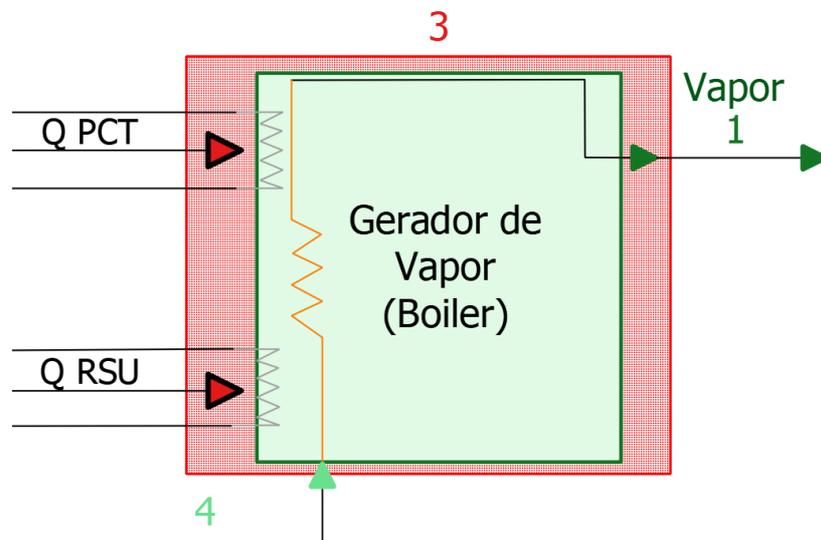
Tabela 16 - Correntes da planta proposta e seus respectivos estados.

Correntes	Nº c	m (kg/s)	p (kPa)	T (K)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Calor (Concentração Solar)	-	-	-	-	-	-	-
Calor (Resíduos)	-	1,4316	-	-	-	-	-
Vapor de Alta Pressão	1	4,2090	10.000	773,2000	500,0500	3.373,0000	6,5960
Vapor Superaquecido de Baixa Pressão	2	4,2090	260	420,1500	147,0000	2.757,0000	7,1340
Condensado (Água)	3	4,2090	224	388,1500	115,0000	482,6000	1,4730
Condensado (Água)	4	4,2090	10.000	388,2500	115,1000	492,9235	1,4750
Eletricidade	5	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	6	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	7	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	8	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	9	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	10	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	11	-	-	-	-	-	-
Água Bruta	12	516,0700	100,	296,0000	22,8500	90,1241	0,3157
Água Bruta	13	516,0700	101	296,0100	22,8600	90,1251	0,3159
Água Bruta	14	332,4900	101	296,0100	22,8600	90,1251	0,3159
Água Bruta	15	183,5800	101	296,0100	22,8600	90,1251	0,3159
Água Dessalinizada	16	42,0900	101	296,0100	22,8600	94,9800	0,3338
Salmoura	17	290,4000	101	305,2100	32,0600	121,5969	0,4641
Água Dessalinizada	18	61,1800	101	296,0100	22,8600	94,9800	0,3338
Salmoura	19	122,4000	101	296,0100	22,8800	85,8154	0,3473
Água Dessalinizada	20	103,2700	101	296,0100	22,8800	94,9800	0,3338-
Salmoura	21	412,8000	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria.

4.2.5.1 Estado 01 e Estado 04

Fluxograma 10 - Volume de Controle 03.

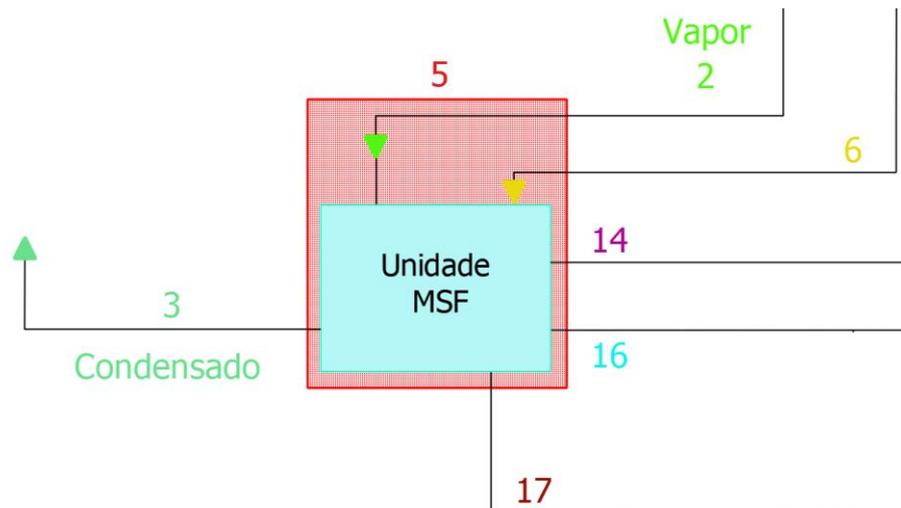


Fonte: Elaboração própria.

Para definição do estado do vapor de alimentação para a turbina a vapor de contrapressão foi realizada uma análise da bibliografia para plantas com configurações similares a planta proposta neste estudo. Os valores utilizados foram baseados no artigo produzido em 2019 por M. Sadi e A. Arabkoohsar – Análise Exergoeconômica de Uma Planta Elétrica Combinada Movida a Energia Solar e Queima de Resíduos Sólidos (*Exergoeconomic analysis of a combined solar-waste driven power plant*), tabela 2 – Dados Termoeconômicos da Planta. Também foi utilizado como referencial o artigo de 2018 produzido pelos mesmos autores citados acima, Modelagem e Análise de Uma Plant Elétrica Híbrida de Concentração Solar e Incineração de Resíduos (*Modelling and analysis of a hybrid solar concentrating-waste incineration power plant*), tabela 2 – Propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho em vários pontos do Ciclo de Rankine. Os dados também foram comparados com outros estudos a fim de validação.

4.2.5.2 Estado 02 e Estado 03

Fluxograma 11 - Volume de Controle 05.

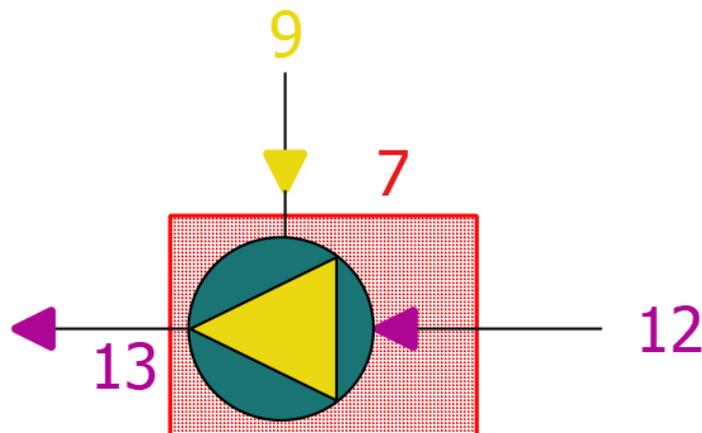


Fonte: Elaboração própria.

Este estado foi definido conforme parâmetros usuais de entrada e saída de unidades MSF descritos na bibliografia, o principal estudo de referência foi o desenvolvido por Willzon, P e Atkinson, G (2003), Dessalinização: Competição inspira flash de inovação em um mercado maduro. Sistemas Modernos de Energia, Volume 23 (*Desalination: Competition Inspires Flash of Innovation in a Mature Market. Modern Power Systems, Volume 23*). Estes estados também foram comparados com outros artigos e estudos citados nas referências bibliográficas.

4.2.5.3 Estado 12

Fluxograma 12 - Volume de Controle 07.



Fonte: Elaboração própria.

A água bruta trazida por adução até a planta possui pressão e temperatura ambientes no município de Paranaguá (Tabela 14 - Parâmetros do Ar Atmosférico e Água do Mar em Paranaguá.).

4.2.5.4 Estado 13 ao Estado 19

Estes estados foram definidos conforme parâmetros usuais de entrada e saída de unidades MSF e RO descritos na bibliografia.

Para os parâmetros de entrada e saída da unidade MSF a referência foi o estudo apresentado por Kahraman, N. e Cengel, Y *Análise Exergética de uma Planta de Dessalinização MSF (2004) (Exergy Analysis of a MSF distillation plant)*, em que o estado de entrada da água bruta é muito próximo ao estado ambiente (Tabela 14 - Parâmetros do Ar Atmosférico e Água do Mar em Paranaguá.) da água do mar e a pressão e temperatura do produto também são muito próximas às propriedades do estado ambiente. A salmoura proveniente da unidade (corrente 17) é rejeitada com pressão próxima a ambiente e com uma temperatura de 9,21 °C maior que a temperatura ambiente.

Na unidade RO os estados foram baseados no estudo de uma planta no Jordão realizado por Aljundi, I. H. (2007) – *Análise de uma planta de osmose inversa no Jordão (Second-law analysis of a reverse osmosis plant in Jordan)*, no qual a pressão da água bruta, produto e salmoura tem suas propriedades próximas as propriedades do ambiente. Foram utilizados como base também os estudos de Cerci, Y.(2001) *Análise Exergética de uma planta de dessalinização com osmose inversa na Califórnia (Exergy analysis of a reverse osmosis desalination plant in California)* e Fellaou, S., Ruiz-Garcia, A. e Gourich, B - *Análise exergética aprimorada de uma osmose inversa de água salobra em escala real usina de dessalinização (Enhanced exergy analysis of a full-scale brackish water reverse osmosis desalination plant)*.

A salinidade da salmoura para ambas as unidades utilizada foi de 65.000 ppm.

4.2.6 PTC

A planta de concentração solar foi dimensionada para que seu aporte energético (térmico) seja igual ao suprido pela planta de incineração de RSU. Assim não foram realizados cálculos específicos para o seu dimensionamento O fluido de trabalho considerado para o presente estudo é o Therminol VP-1, foi considerado um período de 8 horas solares úteis por dia e a temperatura máxima da superfície da tubulação aonde circula o fluido de trabalho considerada foi de 793 K.

4.2.7 Resíduos Sólidos Urbanos

Para uma caracterização mais detalhada acerca da composição e propriedades dos resíduos gerados no município de Paranaguá/PR, devido a insuficiência de estudos e informações acerca do tema na cidade utilizou-se como base os RSU de Curitiba/PR, dentre outras cidades pesquisadas tomou-se como critério a proximidade geográfica.

Para a estimativa da composição elementar dos resíduos sólidos urbanos (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre) usou-se como base a Tabela 17 (adaptada de Poletto Filho, 2008).

A determinação da composição dos RSU teve como base reação química entre o ar e a matéria orgânica que compõe os resíduos sólidos urbanos:

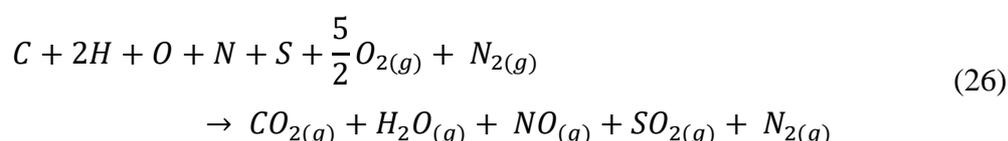


Tabela 17 - Porcentagem em Massa (RSU).

		Carbono		Hidrogênio		Oxigênio	
Componente	Água	seca	úmida	seca	úmida	seca	úmida
Res. Comida	70,0	48,0	14,4	6,4	1,9	37,6	11,3
Papel/Papelão	6,0	44,0	41,1	5,9	5,5	44,6	41,9
Plástico	2,0	60,0	58,8	7,2	7,1	22,8	22,3
Têxteis/Couro	10,0	55,0	49,5	6,6	5,9	31,2	28,1
Borracha	2,0	78,0	76,4	10,0	9,8	0	0
Madeira	20,0	47,0	38,2	6,0	4,8	38,0	3,4
		Nitrogênio		Enxofre		Cinzas	
Componente		seca	úmida	seca	úmida	seca	úmida
Res. Comida		2,6	0,8	0,4	0,1	5,0	1,5
Papel/Papelão		0,3	0,	0,2	0,2	5,0	4,7
Plástico		0	0	0	0	10,0	9,8
Têxteis/Couro		4,6	4,1	0,2	0,1	2,5	2,2
Borracha		0	2,0	2,0	0	0	9,8
Madeira		3,4	2,7	0,3	0,2	4,5	3,6

Fonte: Adaptado de: Poletto (2008).

A base seca dos resíduos, foi utilizada para a obtenção da média proporcional para cada um dos elementos, esta foi normalizada, assim obtendo a quantidade de mols de cada elemento (Berton Jaqueline, 2016).

Tabela 18 – Proporção de Elementos Químicos Presentes no RSU a Partir da Matéria Orgânica.

Componente	Média (%)	Massa Molar (g/mol)	Quantidade de Cada Componente (mol)	Quantidade de Cada Componente com Relação ao Enxofre (mol)	Massa Molecular (g/mol)
Carbono	55,4	12	4,924	286,13	3435,65
Hidrogênio	7,0	1	7,466	434,0	434,1
Oxigênio	29,03	16	1,935	113,0	1800,31
Nitrogênio	1,81	14	0,137	8,02	112,24
Enxofre	0,516	32	0,017	1,0	32
Total	93,756	-	-		5814,32

Fonte: Adaptado de: Poletto (2008) e Peruzzo e Canto (1999).

Como demonstrado na Tabela 13 em Paranaguá são geradas 22.345,38 toneladas por ano, está será a vazão mássica utilizada para o cálculo da vazão molar, juntamente com a massa molar do RSU demonstrada acima. Aplicando a Equação 27 (Berton Jaqueline, 2016).

$$n_{RSU} = \frac{708,57 \left(\frac{g}{s}\right)}{5.814,32 \left(\frac{g}{mol}\right)} = 0,0001219 \text{ kmol/s} \quad (27)$$

Assim baseando-se na relação estequiométrica que é necessária para a incineração entre o RSU e o oxigênio, a proporção molar que foi obtida através dos cálculos é de 343 mols, multiplicando este valor com o obtido pela Equação 26, obtemos $n_{O_2} = 0,0418117 \text{ kmol/s}$. Com este valor e levando em conta a massa molar do element oxigênio (32 g/mol) a vazão mínima determinada de oxigênio para a ocorrência da incineração foi de $m_{O_2, \min} = 1,3379744 \text{ kg/s}$. Será adotado um fator de 70% de excesso ($2,27455648 \text{ kg/s}$) para o oxigênio (Rigato, 2008).

Para o nitrogênio foi usada a proporção molar de 1.289 mols, obtemos $n_{O_2} = 0,1571 \text{ kmol/s}$. Com a multiplicação pela massa molar do nitrogênio (28 g/mol), temos a vazão mínima para o processo $m_{N_2, \min} = 4,3988 \text{ kg/s}$. Aplicando o mesmo fator para

utilização de nitrogênio em excesso o valor da vazão de nitrogênio para o processo resultante é de 7,4780 kg/s.

O oxigênio e nitrogênio em excesso estão presentes no ar que deverá entrar no incinerador, assim com a soma de ambas as vazões obtemos $m_{ar} = 9,7525 \text{ kg/s}$. As cinzas do processo têm uma vazão de 0,3101 kg/s. Somando-se a vazão do resíduos sólidos urbanos com a do ar entrando no incinerador, e diminuindo este valor a vazão das cinzas, temos a vazão mássica dos gases de combustão $m_{GC} = 10,15097 \text{ kg/s}$.

Tabela 19 - Valores para o Balanço de Energia na Incineração de RSU.

Componente	Vazão (kg/s)	PCI (kJ/kg)
RSU	0,70857	9998,08
Ar	9,7525	55,19
Gases de Combustão	10,15097	**
Cinzas + Escórias	0,3101	-

Fonte: Adaptado de: Berton Jaqueline, (2016).

Então a estimativa de aproveitamento energético dos RSU será realizada com a soma da geração dos RSU e do ar como mostrado a seguir:

$$E_T = 0,70857 \left(\frac{kg}{s}\right) \cdot 9998 \left(\frac{kJ}{kg}\right) + 9,7525 \left(\frac{kg}{s}\right) \cdot 55,19 \left(\frac{kJ}{kg}\right) = 7.644,51489 \text{ kJ/s} \quad (28)$$

A quantidade de cinzas e escórias geradas no processo corresponde a 42,5% da vazão mássica do RSU, correspondendo a 0,301142 kg/s, assim temos a vazão de gases de combustão com o valor de 10,558398 kg/s (Berton Jaqueline, 2016).

Após a apresentação da metodologia para a obtenção dos valores advindos do RSU, para fins de cálculo neste presente estudo serão utilizados os dados referentes às quantidades de RSU geradas no município de Paranaguá que corresponde a 1,4316 kg/s (este valor foi ajustado a operação em 16 h/dia, para funcionamento constante da planta que terá aporte de radiação solar no período de 8 h/dia, com base volume diário gerado no município). Como simplificações não serão levados em conta para os cálculos os valores de correspondentes ao ar, gases de combustão, cinzas e escórias, assim a energia térmica gerada no processo de incineração e que servirá de aporte para a planta é 14.313,2513 kJ/s. A temperatura da chama no incinerador é de 1088,7 K.

4.2.8 Turbina de Contrapressão e Gerador

Para a turbina de vapor de contrapressão o fluido de trabalho utilizado é o vapor/água e a eficiência isentrópica da turbina e gerador são respectivamente 85% e 95% assim a sua eficiência global é de 80,75%.

4.2.9 Motor e Bomba

Os motores e bomba utilizados no presente trabalho, assim como a turbina tem uma eficiência de 85%.

4.2.10 Unidade MSF

Para a unidade MSF foi utilizado um valor de GOR (kg produto/kg vapor) médio (Tabela 3 - Comparação entre tecnologias de dessalinização.) de 10 e um consumo elétrico total de 3 kWh/m^3 (com eficiência energética de 85%). O TBT (*top brine temperature*) da unidade é de 383,15 K com uma diferença de temperatura de 5 K por etapa de efeito flash.

4.2.11 Unidade RO

Na unidade RO foi utilizado o mesmo aporte elétrico (3 kWh/m^3) e eficiência elétrica (85%) com o intuito de exaltar as diferenças de custos exegéticos entre a unidade de dessalinização com aporte majoritário de energia térmica e elétrica. Sua temperatura de operação é de 296,10 K. A proporção entre a água bruta que entra e água tratada é de 77%, este valor foi retirado do estudo realizado por Cerci, Y em 2001 (citado na seção 4.2.5.4).

4.2.12 Captação de Água do Mar

A planta será alocada conforme o Mapa 10, a localização se baseou no Plano Diretor do Município de Paranaguá e nas condições impostas para licenciamento de indústrias impostas pelo IAT. Também foi levada em conta a distância do centro urbano e a distância e acesso aterros municipais mostrados no Mapa 9 - Unidades de destinação final de resíduos no município de Paranaguá., a impossibilidade de instalação em áreas de serra, reservas e mangues. Uma breve discussão sobre a localização da planta será apresentada na seção de recomendações para trabalhos futuros.

A energia necessária para suprir a bomba de recalque será contabilizada nos balanços (corrente 9 [aonde o aporte de energia para o conjunto motor + bomba será o necessário para levar a corrente 12 para o estado da corrente 13 somado a energia necessária para a adução]), assim aproveitando a geração da própria planta e será realizada a adução da água do mar como mostrado no Mapa 10.

724742.987E

737238.556E

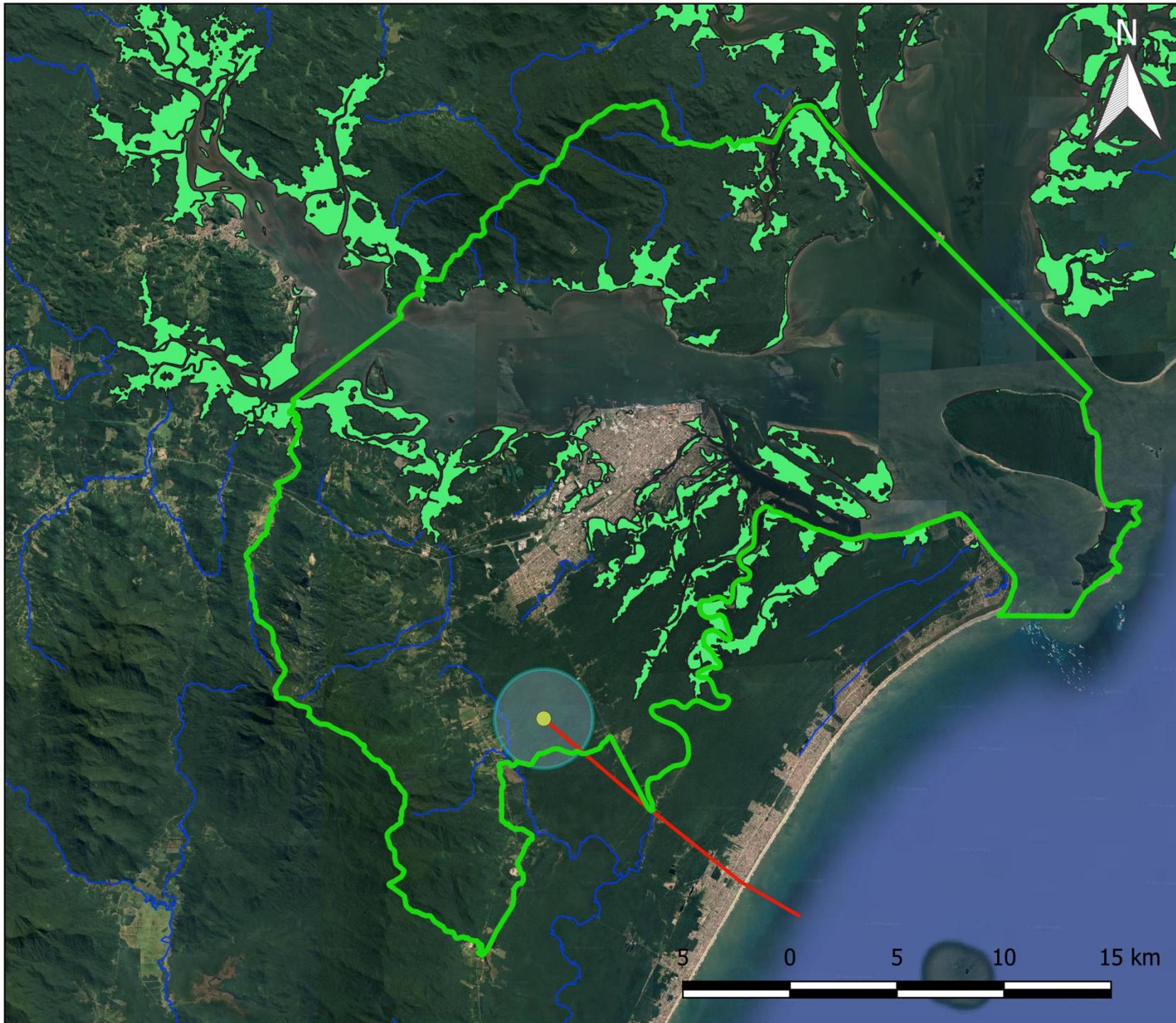
749734.124E

762229.693E

7184952.025N

7172456.456N

7159960.888N



Localção da Planta

- Planta
- Buffer 2,3 Km
- Liminites Município - Paranaguá
- Manguezais
- Aterro
- Rios Principais
- Adutora

Comprimento Aproximado da Adutora - 14,5 Km
Diferença de cota entre a planta e ponto de captação - 65 m



SISTEMA DE COORDENADAS E PROJEÇÃO UNIVERSAL
SIRGAS 2000 / UTM ZONE 22S - EPSG: 31982
Bases Cartográficas: IBGE, Prefeitura de Paranaguá, IAT, Google Earth e acervo próprio



4.2.12.1 Dimensionamento do Sistema de Adução de Água do Mar

Nesta seção será apresentada a metodologia para o cálculo da potência necessária para realizar a adução de água bruta. A distância da captação até a locação da planta é de 14,5 km e a diferença de cota entre o ponto de captação e a locação da planta foi estimada utilizando o *software Google Earth Pro* é de 23 m.

I. Diâmetro

Para o cálculo do diâmetro (este será considerado constante para todo o comprimento da tubulação) a ser utilizado na tubulação de adução foi utilizada a fórmula de Bresse (Equação 29):

$$D = K\sqrt{Q} \quad (29)$$

Onde:

- D é o diâmetro da tubulação em m ;
- K é o coeficiente de custo de investimento x custo operacional, para o presente estudo foi utilizado o valor de 0,9;
- Q é a vazão na tubulação em m^3/s .

II. Velocidade de Escoamento

O conduto a ser utilizado será circular e a velocidade será dada por:

$$V = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2} \quad (30)$$

Onde:

- D é o diâmetro da tubulação em m ;
- Q é a vazão na tubulação em m^3/s ;
- V é a velocidade média do escoamento em m/s .

III. Perda de Carga Localizada

A fim de simplificar os cálculos será considerado que a tubulação de adução tem como singularidades somente 3 curvas de 90° e a perda de carga relacionada a estas singularidades será calculada por:

$$h_f = K \frac{V^2}{2g} \quad (31)$$

Onde:

- h_f é a perda de carga localizada em m ;
- V é a velocidade média do escoamento em m/s ;
- g é a aceleração da gravidade em m/s^2 ;
- K é o coeficiente associado às singularidades nas curvas de 90° e será considerado neste estudo o valor de 0,40.

IV. Perda de Carga Distribuída

A perda de carga distribuída será calculada por meio da Equação de Hazen-Willians:

$$J = \frac{10,65 \times Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (32)$$

Onde:

- J é a perda de carga linear em m/m ;
- Q é a vazão a ser aduzida até a planta em m^3/s ;
- D é o diâmetro da tubulação em m ;
- C é o coeficiente de rugosidade, a tubulação será de aço galvanizado que possui o valor do coeficiente igual a 120 m^3/s (referência).

V. Perda de Carga Total

A perda de carga total será a soma das perdas localizadas e distribuída (esta se dá pela multiplicação da perda de carga linear pelo comprimento da tubulação).

VI. Altura Manométrica

Para o cálculo de $H_{manométrica}$ foi utilizada a equação 33, que se dá pelo somatório dos valores da equação a seguir:

$$H_{manométrica} = H_g + H_j \quad (33)$$

Onde:

- $H_{manométrica}$ é a altura manométrica em m ;
- H_g é o desnível geométrico total em m ;
- H_f é a perda total nas tubulações de sucção em m ;

VII. Potência da Bomba

Será considerada uma adução constante por $24 h/dia$. A equação utilizada para a demanda de potência será demonstrada a seguir:

$$Pot_{adução} = \frac{QH_{manométrica}\gamma}{1000} \quad (34)$$

Onde:

- $Pot_{adução}$ é a potência necessária para adução em kW ;
- Q é a vazão a ser aduzida até a planta em m^3/s ;
- $H_{manométrica}$ é a altura manométrica em m ;
- γ é o peso específico da água bruta considerado para este cálculo $9.760 N/m^3$ (ajustado com relação a salinidade da água e sua temperatura)

4.3 Modelagem

O modelo termodinâmico possibilita a obtenção dos parâmetros de operação da planta proposta e informações de composição, temperatura, pressão e vazão dos fluxos da estrutura física. Assim é possível se conhecer também as exergias dos fluxos e aplicar o modelo termo econômico TCE para determinação dos custos energéticos unitários da água, eletricidade e de outros fluxos da planta.

A modelagem para se obter as informações sobre os fluxos se deu a partir da estrutura física e simulada através das equações termodinâmicas (balanços de primeira lei, segunda lei e de exergia). Serão estimados os dados das condições de contorno, também serão avaliadas as propriedades dos recursos (energia solar e resíduos sólidos urbanos) e informações acerca de performance e capacidade dos equipamentos que compõe a planta (estas serão definidas respeitando referenciais teóricos e análises realizadas em equipamentos similares instalados em plantas de cogeração reais).

A partir dos dados obtidos nas simulações do modelo térmico foi definido o modelo econômico, assim permitindo o cálculo dos elementos externos para composição do vetor valorização externa dos sistemas matriciais apresentados na sessão 2.4.1.1. Os elementos não nulos deste vetor serão definidos como os custos para as unidades produtivas.

Os resultados serão interpretados com o auxílio de gráficos a serem elaborados, conceitos de termodinâmica.

4.3.1 Cálculo nas Correntes e Volumes de Controle

Para os volumes de controle demonstrado na Figura 10 será sempre aplicada a conservação da massa, os balanços de primeira lei, segunda lei e de Exergia.

Nos volumes de controle que consideram os conjuntos de bomba + motor, junções e bifurcações foi aplicado os conceitos da termomecânica (considerando o líquido incompressível e o processo isotérmico) utilizando as equações a seguir:

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}(h_i - h_{i-1}) \quad (35)$$

$$h_{i-1} \text{ obtido via tabelas termodinâmicas e } h_i = h_{i-1} + v_{i-1}(P_i - P_{i-1}) \quad (36)$$

$$ex_i = v_i(P_i - P_0) \quad (37)$$

Para os outros volumes de controle as exergias associadas as correntes foram calculadas por:

$$ex_i = [(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)]\dot{m}_i \quad (38)$$

Como foram desprezadas as variações nas energias potencial e cinética o fluxo de energia associado a cada corrente foi calculado conforme a Equação 39:

$$\dot{e}_i = h_i \times \dot{m}_i \quad (39)$$

Para as correntes puramente elétricas o fluxo de energia foi a sua própria energia associada.

Com o balanço de entropia foi possível determinar \dot{S}_{ger} e conseqüentemente as irreversibilidades realizando a multiplicação de \dot{S}_{ger} por T_0 .

No Volume de Controle 01, quando o aporte de calor a planta se dá pela concentração solar, não será realizado o cálculo dos balanços, somente foi levado em conta nos outros subsistemas a corrente 10 para a análise a influência de mais um aporte interno de potência elétrica nos resultados a serem obtidos.

4.3.2 Balanços Ciclo a Vapor

4.3.2.1 Volume de Controle 03

Neste volume foi aplicada a Primeira Lei da Termodinâmica com o intuito de determinar o fluxo de massa que é possível levar do estado de entrada no gerador de vapor até o estado de alimentação da turbina de contrapressão com extração de vapor para a unidade MSF, obtendo-se $\dot{m} = 4,2090 \text{ kg/s}$.

4.3.2.2 Volume de Controle 04

Com base no fluxo de massa e no estado de saída da turbina de contrapressão + gerador, foi determinada a potência elétrica total gerada pela planta.

4.3.3 Balanços Unidade de Dessalinização

4.3.3.1 Volume de Controle 05

Para a unidade MSF o fluxo de massa de água tratada será determinado com base em seu GOR (seção 4.2.10), assim também foi possível determinar por meio do balanço de energia o fluxo de massa de água bruta e salmoura atravessando o volume de controle.

4.3.3.2 Volume de Controle 08

Na unidade de dessalinização elétrica o fluxo de água tratada será calculado utilizando a porcentagem de conversão de água bruta em dessalinizada juntamente com o balanço de energia utilizando o aporte de trabalho citado na seção 4.2.11.

4.3.3.3 Volume de Controle 07

A soma dos fluxos de massa que entram nas unidades MSF e RO é igual ao fluxo a ser aduzido da captação, assim com a aplicação das equações apresentadas e fluxo de cálculo apresentado na seção Dimensionamento do Sistema de Adução de Água do Mar foi possível determinar a demanda total de potência para a bomba + gerador.

4.3.4 Matriz F – P – L

As tabelas a seguir demonstram os recursos e produtos para cada subsistema, as correntes de salmoura (correntes 17 e 19) serão consideradas perdas e não serão levadas em consideração na matriz F – P – L. As correntes de água entrando nas unidades de dessalinização (correntes 14 e 15) foram desconsideradas no balanço de exergia nos volumes de controle 05 e 08.

Tabela 20 - Recursos e produtos para os subsistemas da planta proposta, utilizando o aporte advindo da queima de RSU.

Subsistema	N° VC	Recurso	Produto
Planta de Incineração de RSU	2	-	Q rsu
Gerador de Vapor (Boiler)	3	Q (RSU ou PTC) (Y0)	(1-4)
Turbina a Vapor de Contrapressão + Gerador	4	(1-2)	5
Unidade MSF	5	(2-3) + 6	16
Motor + Bomba 1 (Condensado)	6	8	(4-3)
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	7	9	(13-12)
Unidade RO	8	7	18
Bifurcação 1.0	1a	5	(6+7+8+9+11)
Bifurcação 1.1	2a	13	(14+15)
Junção	3a	(18+16)	20

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21 - Recursos e produtos para os subsistemas da planta proposta, utilizando o aporte advindo da concentração solar.

Subsistema	N° VC	Recurso	Produto
Concentração Solar	1	10	Q ptc
Gerador de Vapor (Boiler)	3	Q (RSU ou PTC) (Y0)	(1-4)
Turbina a Vapor de Contrapressão + Gerador	4	(1-2)	5
Unidade MSF	5	(2-3) + 6	16
Motor + Bomba 1 (Condensado)	6	8	(4-3)
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	7	9	(13-12)
Unidade RO	8	7	18
Bifurcação 1.0	1a	5	(6+7+8+9+10+11)
Bifurcação 1.1	2a	13	(14+15)
Junção	3a	(18+16)	20

Fonte: Elaboração própria.

4.3.5 Custos Exergéticos Com Aporte da Incineração de RSU

A matriz de incidência para os subsistemas da planta nesta configuração será demonstrada a seguir, para a elaboração desta as correntes 14 e 15 foram levadas em conta nos volumes de controle das unidades de dessalinização devido ao custo energético e exergético associado à sua adução. Também foram levadas em contas as correntes de salmoura, porém estas terão seus custos exergéticos atribuídos como zero. A corrente 10 não será contabilizada pois esta representa um aporte de energia para a planta de concentração solar.

Tabela 22 - Matriz de incidência - aporte RSU.

Equipamento/Correte	Q (RSU ou PTC)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gerador de Vapor (Boiler)	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Turbina a Vapor de Contrapressão + Gerador	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unidade MSF	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	-1	0	0	0
Motor + Bomba 1 (Condensado)	0	0	0	1	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
Unidade RO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	-1	0
Bifurcação 1.0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bifurcação 1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0
Junção 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	1	0	1	0	-1

Fonte: Elaboração Própria.

As equações auxiliares para a obtenção dos custos exeréticos (B^*) e custos exeréticos unitários (k^*) são mostradas a seguir:

Tabela 23 - Equações auxiliares para o cálculo dos custos exeréticos das correntes da planta para aporte da incineração de RSU.

Equações Auxiliares F - P - L		
Proposição 01	Y=0	
Proposição 02	$B^*1/B1-B^*2/B2=0$	$B^*2/B2-B^*3/B3=0$
Proposição 03b	$B^*14/B14-B^*15/B15=0$	$B^*9/B9-B^*7/B7=0$
	$B^*8/B8-B^*9/B9=0$	$B^*6/B6-B^*8/B8=0$
	$B^*11/B11-B^*6/B6=0$	
Proposição 04	$B^*17=0$	$B^*19=0$
Proposição 05	$B^*12=B12=0$	
	$B^*q=Bq$	

Fonte: Elaboração Própria.

Assim a matriz aumentada para o cálculo é:

Tabela 24 - Matriz de incidência aumentada - aporte RSU.

Matriz de Incidência Aumentada (A20x20)																				B* (20x1)	Y (20x1)		
Equipamento/Correte	Q (RSU ou PTC)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
Gerador de Vapor (Boiler)	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*q	0	
Turbina a Vapor de Contrapressão + Gerador	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*1	0	
Unidade MSF	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	-1	0	0	0	B*2	0	
Motor + Bomba 1 (Condensado)	0	0	0	1	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*3	0	
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	B*4	0	
Unidade RO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	-1	0	B*5	0	
Bifurcação 1.0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*6	0	
Bifurcação 1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	B*7	0	
Junção 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	1	0	1	0	-1	B*8	0	
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*9	Bq	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	B*11	B12	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	B*12	0	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	B*13	0
14	0	0	0	0	0	0	(-1/B6)	0	0	0	(1/B11)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*14	0	
15	0	0	0	0	0	0	(1/B6)	0	(-1/B8)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*15	0	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	(1/B8)	(-1/B9)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*16	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	(-1/B7)	0	(1/B9)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*17	0	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(1/B14)	(-1/B15)	0	0	0	0	0	B*18	0	
19	0	0	(1/B2)	(-1/B3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*19	0	
20	0	(1/B1)	(-1/B2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*20	0	

Fonte: Elaboração Própria.

4.3.6 Custos Exergéticos Com Aporte da Incineração de RSU

A matriz de incidência para os subsistemas da planta nesta configuração será demonstrada a seguir, para a elaboração nesta foi considerada a corrente de aporte de eletricidade para a planta de concentração solar. Também foram levadas em consideração as correntes 14,15,17 e 19 pelas mesmas razões citadas na seção anterior.

Tabela 25 - Matriz de incidência - aporte PTC.

Equipamento/Correte	Q (RSU ou PTC)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gerador de Vapor (Boiler)	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Turbina a Vapor de Contrapressão + Gerador	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unidade MSF	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	-1	0	0	0
Motor + Bomba 1 (Condensado)	0	0	0	1	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
Unidade RO	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	-1	0	0
Bifurcação 1.0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bifurcação 1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0
Junção 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	1	0	1	0	0	-1

Fonte: Elaboração Própria.

As equações auxiliares para a obtenção dos custos exergéticos (B^*) e custos exergéticos unitários (k^*) são mostradas a seguir:

Tabela 26 - Equações auxiliares para o cálculo dos custos exergéticos das correntes da planta para aporte PTC.

Equações Auxiliares F - P - L		
Proposição 01	Y=0	
Proposição 02	$B^*1/B1-B^*2/B2=0$	$B^*2/B2-B^*3/B3=0$
Proposição 03b	$B^*14/B14-B^*15/B15=0$	$B^*9/B9-B^*7/B7=0$
	$B^*8/B8-B^*9/B9=0$	$B^*6/B6-B^*8/B8=0$
	$B^*11/B11-B^*6/B6=0$	$B^*10/B10-B^*11/B11=0$
Proposição 04	$B^*17=0$	$B^*19=0$
Proposição 05	$B^*12=B12=0$	
	$B^*q=Bq$	

Fonte: Elaboração Própria.

Assim a matriz aumentada para o cálculo é:

Tabela 27 - Matriz de incidência aumentada - aporte energia solar.

Matriz de Incidência (A9x21) - Matriz de Incidência Aumentada (A21x21)																					B* (21x1)	Y (21x1)	
Equipamento/Correte	Q (RSU ou PTC)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19			20
Gerador de Vapor (Boiler)	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*q	0
Turbina a Vapor de Contrapressão + Gerador	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*1	0
Unidade MSF	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	-1	0	0	0	B*2	0
Motor + Bomba 1 (Condensado)	0	0	0	1	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*3	0
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	B*4	0
Unidade RO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	-1	0	B*5	0
Bifurcação 1.0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*6	0
Bifurcação 1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	B*7	0
Junção 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	1	0	1	0	-1	B*8	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*9	Bq
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	B*10	B12
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	B*11	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	B*12	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(1/B10)	(-1/B11)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*13	0
14	0	0	0	0	0	0	(-1/B6)	0	0	0	0	(1/B11)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*14	0
15	0	0	0	0	0	0	(1/B6)	0	(-1/B8)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*15	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	(1/B8)	(-1/B9)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*16	0
17	0	0	0	0	0	0	0	(-1/B7)	0	(1/B9)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*17	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(1/B14)	(-1/B15)	0	0	0	0	0	B*18	0
19	0	0	(1/B2)	(-1/B3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*19	0
20	0	(1/B1)	(-1/B2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B*20	0

Fonte: Elaboração Própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas e gráficos a seguir demonstram os resultados para fluxos de energia, Exergia, custos exergéticos, custos exergéticos balanço de Exergia, rendimentos energéticos e exergéticos unitários, destruição de Exergia e irreversibilidades para aporte da planta de incineração de RSU e de concentração solar:

5.1 Aporte de RSU

Na Tabela 28 são demonstrados os valores obtidos a partir das formulações e hipóteses aplicadas considerando o aporte de calor proveniente da queima dos RSU. São demonstrados os valores obtidos de fluxo de energia, exergia da corrente, custo exergético e custo exergético unitário associados a cada corrente.

Tabela 28 - Fluxos de energia e exergia, custo exergético e custo exergético unitário para aporte de incineração de RSU.

Correntes	N° c	Fluxo de Energia (kW)	Exergia da Corrente (kW)	B*	k*
Calor (Resíduos)	-	14.313,2513	10.421,7088	10.421,7088	1,0000
Vapor de Alta Pressão	1	14.196,9570	5.995,3434	10.563,0322	1,7619
Vapor Superaquecido de Baixa Pressão	2	11.604,2130	2.732,3245	4.814,0082	1,7619
Condensado (Água)	3	2.031,2634	0,5511	0,9710	1,7619
Condensado (Água)	4	2.074,7148	44,0026	141,3235	3,2117
Eletricidade	5	2.093,8475	2.093,8475	5.749,0240	2,7457
Eletricidade	6	454,5720	454,5720	1.248,1068	2,7457
Eletricidade	7	454,5720	454,5720	1.248,1068	2,7457
Eletricidade	8	51,1176	51,1176	140,3524	2,7457
Eletricidade	9	189,4347	189,4347	520,1260	2,7457
Eletricidade	10	-	-	-	-
Eletricidade	11	944,1512	944,1512	2.592,3320	2,7457
Água Bruta	12	44.708,7556	0,0000	0,0000	0,0000
Água Bruta	13	44.709,2400	0,4204	520,1260	1.237,0705
Água Bruta	14	31.741,1451	0,2784	344,3792	1.237,0705
Água Bruta	15	12.968,0950	0,1421	175,7468	1.237,0705
Água Dessalinizada	16	3.997,7082	0,0673	6.405,5232	95.116,4644
Salmoura	17	37.707,1976	5.743,1525	0,0000	0,0000
Água Dessalinizada	18	10.523,7840	0,1773	1.423,8536	8.031,6653
Salmoura	19	2.839,8574	572,9533	0,0000	0,0000
Água Dessalinizada	20	14.521,4922	0,0016	7.829,3768	4.893.360,5059
Salmoura	-	-	-	-	-

Realizando o balanço entre o recurso e o produto para cada subsistema foi obtida a geração de entropia conforme demonstrado a seguir:

Tabela 29 - Balanço de exergia para os subsistemas da planta com aporte de RSU.

Subsistema	n VC	Recurso (kW)	Produto (kW)	Balanço (kW)
Gerador de Vapor (Boiler)	3	10421,70876	5951,340804	4470,367957
Turbina a Vapor de Contrapressão + Gerador	4	3263,018832	2093,8475	1169,171332
Unidade MSF	5	3186,345398	0,067344	3186,278054
Motor + Bomba 1 (Condensado)	6	51,11764706	43,4514263	7,666220755
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	7	189,4346804	0,42044977	189,0142307
Unidade RO	8	454,572	0,17728	454,39472
Bifurcação 1.0	1a	2093,8475	2093,8475	0
Bifurcação 1.1	2a	0,42044977	0,0016	0,41884977
Junção	3a	0,244624	0,0016	0,243024

A taxa de geração de entropia foi determinada utilizando a aplicação da segunda lei da termodinâmica para volumes de controle, a destruição de exergia conforme mostrado na tabela acima, a eficiência energética para as unidades de dessalinização não levou em conta a parte térmica. A eficiência exergetica se deu pela divisão do valor da exergia dos produtos pelo valor da exergia dos recursos. E para o cálculo das irreversibilidades foi considerada a temperatura ambiente (296 K).

Tabela 30 - Taxa de geração de entropia, destruição de exergia, irreversibilidades e eficiências para os subsistemas da planta com aporte de RSU.

VC	Sger (kW/K)	Destruição de Exergia (kW)	Eficiência Energética	Eficiência Exergetica	Irreversibilidades (kW)
Gerador de Vapor (Boiler)	8,4100	4.470,3680	0,8500	0,5711	2.489,3600
TVC + Gerador	2,2640	1.169,1713	0,8075	0,6417	670,1440
Unidade MSF	22,8800	3.186,2781	0,8500	0,0000	6.772,4800
Unidade RO	2,9970	454,3947	0,8500	0,0004	887,1120
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	0,1032	189,0142	0,8500	0,0022	30,5472
Motor + Bomba 1 (Condensado)	0,0046	7,6662	0,8500	0,8500	1,3512
Bifurcação 1.0	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
Bifurcação 1.1	0,0000	0,4188	1,0000	0,0038	0,0000
Junção 1.0	0,0000	0,2430	1,0000	0,0065	0,0000

5.2 Aporte PTC

A apresentação dos resultados para a planta nesta configuração se deu da mesma maneira apresentada na seção anterior, porém o aporte de calor para o gerador de vapor foi advindo da concentração solar, estes serão apresentados nas Tabelas 31, 32 e 33 a seguir. Também para esta configuração da planta foi considerado um aporte elétrico (corrente 10) para as bombas do PTC.

Tabela 31 - Fluxos de energia e exergia, custo exergético e custo exergético unitário para aporte da concentração solar.

Correntes	N° c	Fluxo de Energia (kW)	Exergia da Corrente (kW)	B*	k*
Calor (PCT)	-	14.313,2513	8.970,6001	8.970,6001	1,0000
Vapor de Alta Pressão	1	14.196,9570	5.995,3434	9.092,2459	1,52
Vapor Superaquecido de Baixa Pressão	2	11.604,2130	2.732,3245	4.143,7104	1,52
Condensado (Água)	3	2.031,2634	0,5511	0,8358	1,52
Condensado (Água)	4	2.074,7148	44,0026	121,6457	2,76
Eletricidade	5	2.093,8475	2.093,8475	4.948,5355	2,36
Eletricidade	6	454,5720	454,5720	1.074,3216	2,36
Eletricidade	7	454,5720	454,5720	1.074,3216	2,36
Eletricidade	8	51,1176	51,1176	120,8099	2,36
Eletricidade	9	189,4347	189,4347	447,7042	2,36
Eletricidade	10	60,0000	60,0000	141,8022	2,36
Eletricidade	11	884,1512	884,1512	2.089,5760	2,36
Água Bruta	12	44.708,7556	0,0000	0,0000	0,00
Água Bruta	13	44.709,2400	0,4204	447,7042	1.064,82
Água Bruta	14	31.741,1451	0,2784	296,4282	1.064,82
Água Bruta	15	12.968,0950	0,1421	151,2760	1.064,82
Água Dessalinizada	16	3.997,7082	0,0673	5.513,6243	81.872,54
Salmoura	17	37.707,1976	5.743,1525	0,0000	0,00
Água Dessalinizada	18	10.523,7840	0,1773	1.225,5976	6.913,34
Salmoura	19	2.839,8574	572,9533	0,0000	0,00
Água Dessalinizada	20	14.521,4922	0,0016	6.739,2220	4.212.013,73
Salmoura	-	-	-	-	-

Tabela 32 - Balanço de exergia para os subsistemas da planta com aporte da concentração solar.

Subsistema	n VC	Recurso (kW)	Produto (kW)	Balanço (kW)
Gerador de Vapor (Boiler)	3	8.970,6001	5.951,3408	3.019,2593
Turbina a Vapor de Contrapressão + Gerador	4	3.263,0188	2.093,8475	1.169,1713
Unidade MSF	5	3.186,3454	0,0673	3.186,2781
Motor + Bomba 1 (Condensado)	6	51,1176	43,4514	7,6662
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	7	189,4347	0,4204	189,0142
Unidade RO	8	454,5720	0,1773	454,3947
Bifurcação 1.0	1a	2.093,8475	2.093,8475	0,0000
Bifurcação 1.1	2a	0,4204	0,0016	0,4188
Junção	3a	0,2446	0,0016	0,2430

Tabela 33 - Taxa de geração de entropia, destruição de exergia, irreversibilidades e eficiências para os subsistemas da planta com aporte da concentração solar.

VC	Sger (kW/K)	Destruição de Exergia (kJ/s)	Eficiência Energética	Eficiência Exergética	Irreversibilidades (kW)
Gerador de Vapor (Boiler)	3,5080	3.019,2593	0,8500	0,6634	1.038,3680
TVC + Gerador	2,2640	1.169,1713	0,8075	0,6417	670,1440
Unidade MSF	22,8800	3.186,2781	0,8500	0,0000	6.772,4800
Unidade RO	2,9970	454,3947	0,8500	0,0004	887,1120
Motor + Bomba 3 (Adução de Água do Mar)	0,1032	189,0142	0,8500	0,0022	30,5472
Motor + Bomba 1 (Condensado)	0,0046	7,6662	0,8500	0,8500	1,3512
Bifurcação 1.0	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
Bifurcação 1.1	0,0000	0,4188	1,0000	0,0038	0,0000
Junção 1.0	0,0000	0,2430	1,0000	0,0065	0,0000

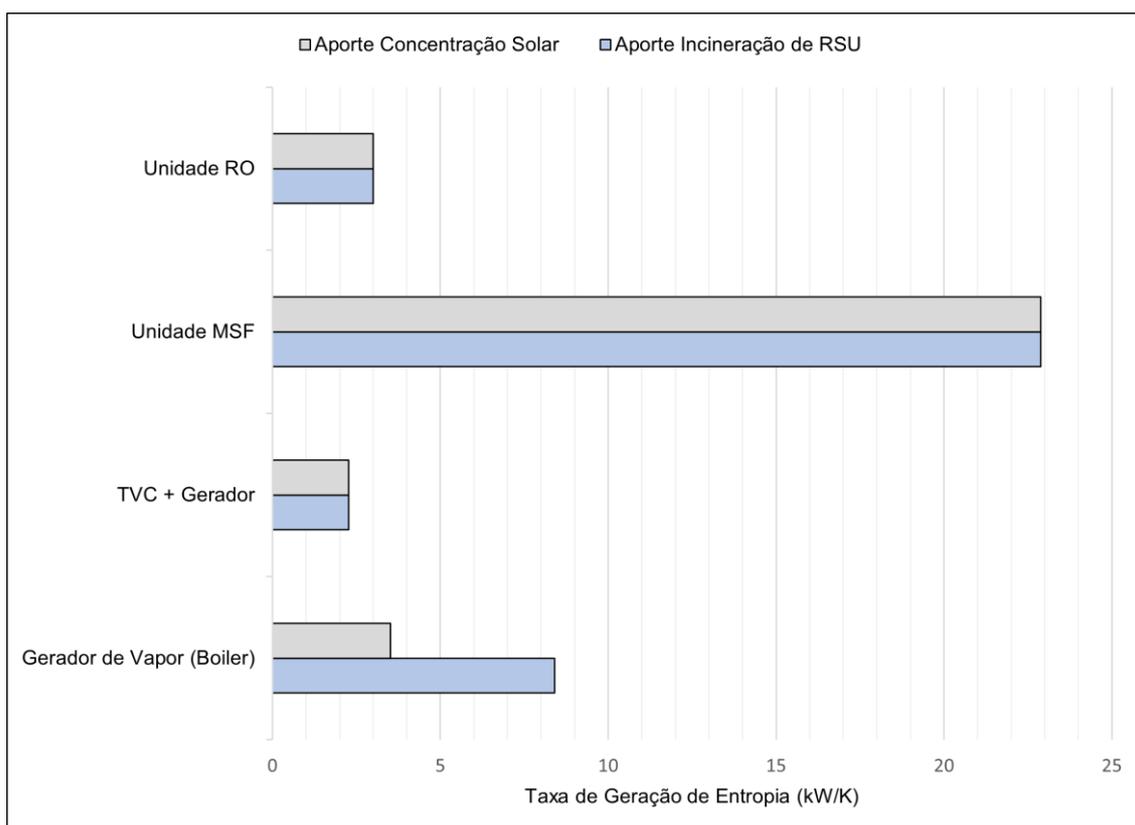
5.3 Capacidade de Geração de Energia Elétrica e Água Dessalinizada

A partir dos estados, balanços, eficiências, simplificações e configuração da planta utilizados foi possível estimar a capacidade de produção de água pura e \dot{P}_{el} . O volume de água tratada foi o mesmo para ambas as configurações da planta (aporte da incineração de RSU e concentração solar). A estimativa de produção na unidade de dessalinização térmica foi de aproximadamente $3.637 \text{ m}^3/\text{dia}$, na unidade de dessalinização elétrica este volume foi de $9.573 \text{ m}^3/\text{dia}$, totalizando para a planta a produção de $13.210 \text{ m}^3/\text{dia}$ ou $13.209.609 \text{ L}/\text{dia}$. Ou, utilizando a estimativa realizada pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), do consumo per capita de água por habitante em Paranaguá de $96,70 \text{ L}/\text{hab.dia}$ (SNIS, 2020), a capacidade de abastecer 136.604 habitantes, aproximadamente 87% da população total do município. A geração de eletricidade bruta em ambas as unidades foi a mesma, porém como para a concentração

solar foi considerado um aporte elétrico a energia destinada a rede teve o decréscimo do valor de energia deste aporte. A planta com o aporte de RSU tem a capacidade de gerar 944,15 *kW* (3,4 *MWh*) enquanto que para a concentração solar a energia suprida a rede é 884,15 *kW* (3,2 *MWh*).

A discussão acerca dos resultados obtidos será iniciada com a avaliação da taxa de geração de entropia em cada subsistema, os Gráficos 6 e 7 apresentam uma comparação entre a geração de entropia em cada subsistema.

Gráfico 6 - Taxa de geração de entropia para as unidades de dessalinização, turbina + gerador e gerador de vapor.

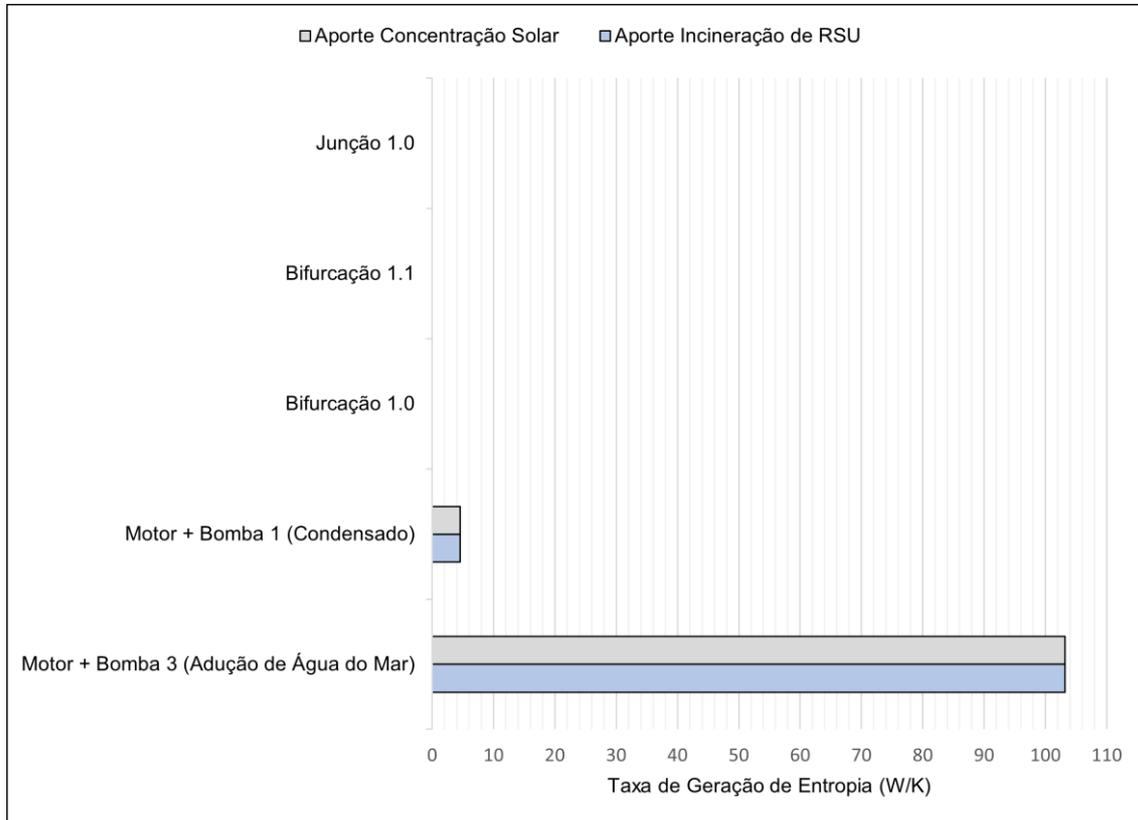


A geração de entropia na unidade MSF (22,88 kW), compreende as parcelas mecânica e térmica, tendo em vista que a unidade utiliza o aporte de energia elétrica para o funcionamento de seus equipamentos internos e também o aporte de calor da extração de vapor da turbina de contrapressão, razão pela qual este equipamento é o que mais gera entropia entre todos os analisados no presente estudo. Já a unidade RO utiliza somente o aporte de potência elétrica, assim, esta tem uma taxa de geração de entropia significativamente menor em comparação a unidade de dessalinização térmica.

O gerador de vapor absorve calor proveniente da queima de RSU ou da concentração solar e leva o fluido de trabalho ao estado necessário para a alimentação da turbina de contrapressão e possui valores diferentes para cada aporte, esta diferença é proveniente da diferença da temperatura da chama no incinerador e da temperatura máxima nas calhas

da planta de concentração solar. Os valores de \dot{S}_{ger} obtidos foram iguais para ambos os aportes na planta com exceção do volume de controle 03.

Gráfico 7 - Taxa de geração de entropia para motores + bombas, bifurcações e junção.



Optou-se por apresentar as taxas de geração de entropia em dois gráficos devido a diferença de grandeza destas, os 4 equipamentos analisados anteriormente possuem seus valores de \dot{S}_{ger} na escala de kW/K e no Gráfico 7, os dados são apresentados em W/K.

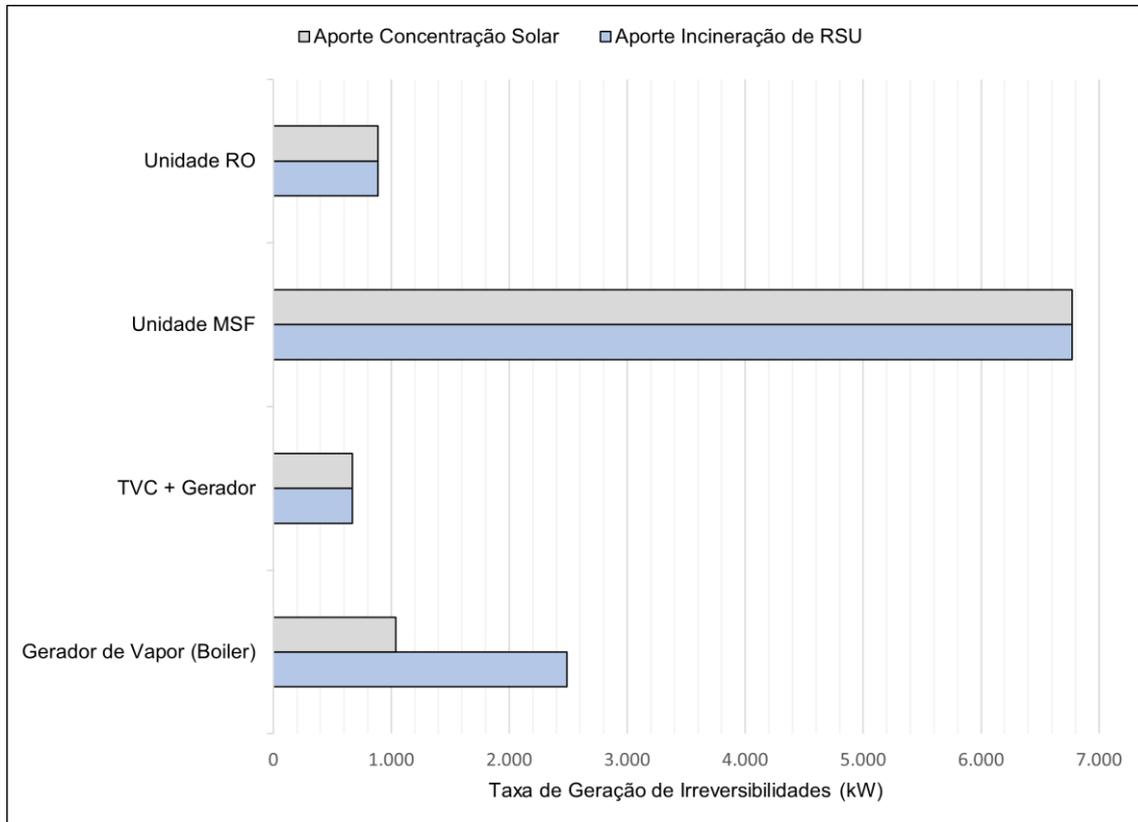
Nas bifurcações e na junção, devido as simplificações, a taxa de geração de entropia obtida foi muito próxima a zero.

Também em decorrência das simplificações as taxas para os conjuntos motor + bomba são relativamente baixos, é válido ressaltar que para o balanço de entropia no motor + bomba do volume de controle 07, não foi levada em conta a adutora. o maior valor obtido neste volume de controle ocorre em decorrência do fluxo de massa ser muito maior.

As irreversibilidades, função da temperatura ambiente e \dot{S}_{ger} seguem a mesma tendência, conforme será apresentado no Gráfico 8 (assim como para \dot{S}_{ger} serão

apresentadas em dois gráficos em decorrência da diferença de valores para os equipamentos).

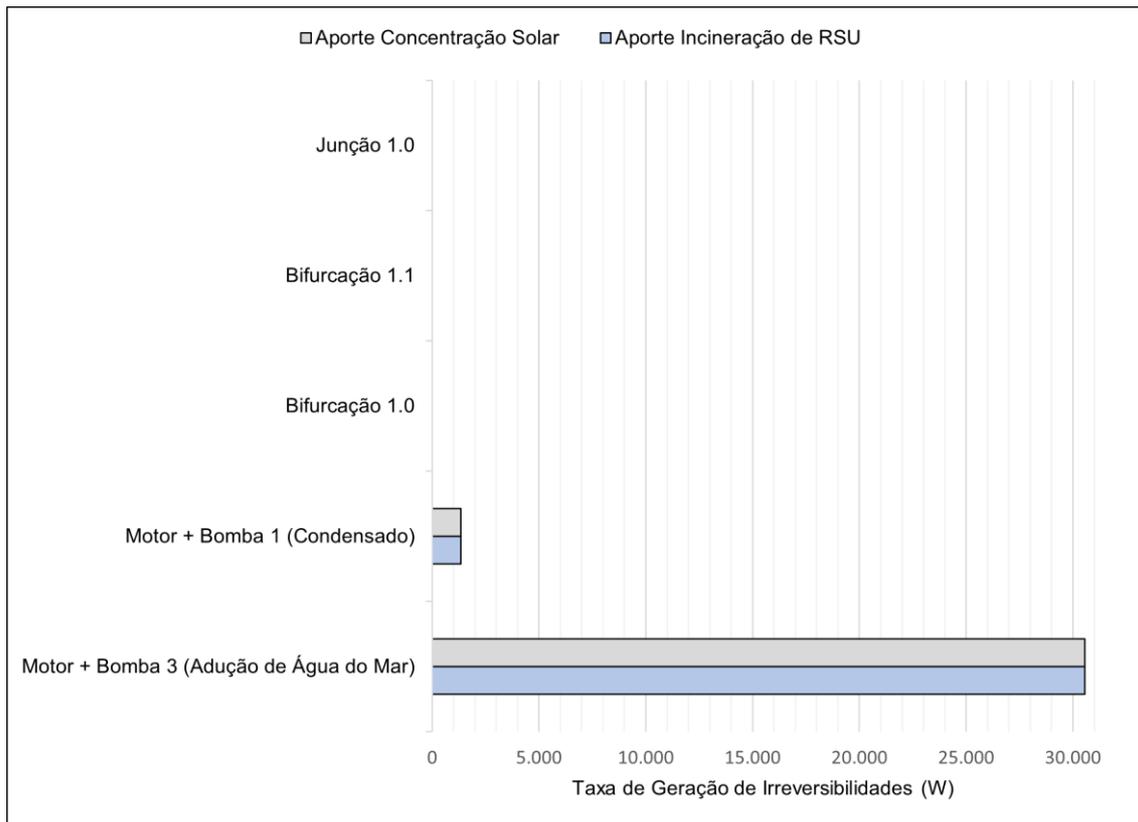
Gráfico 8 - Taxa de geração de irreversibilidades para as unidades de dessalinização, turbina + gerador e gerador de vapor.



Mais uma vez é possível observar os maiores valores obtidos para a unidade de dessalinização térmica e a diferença no gerador de vapor para cada um dos aportes de calor.

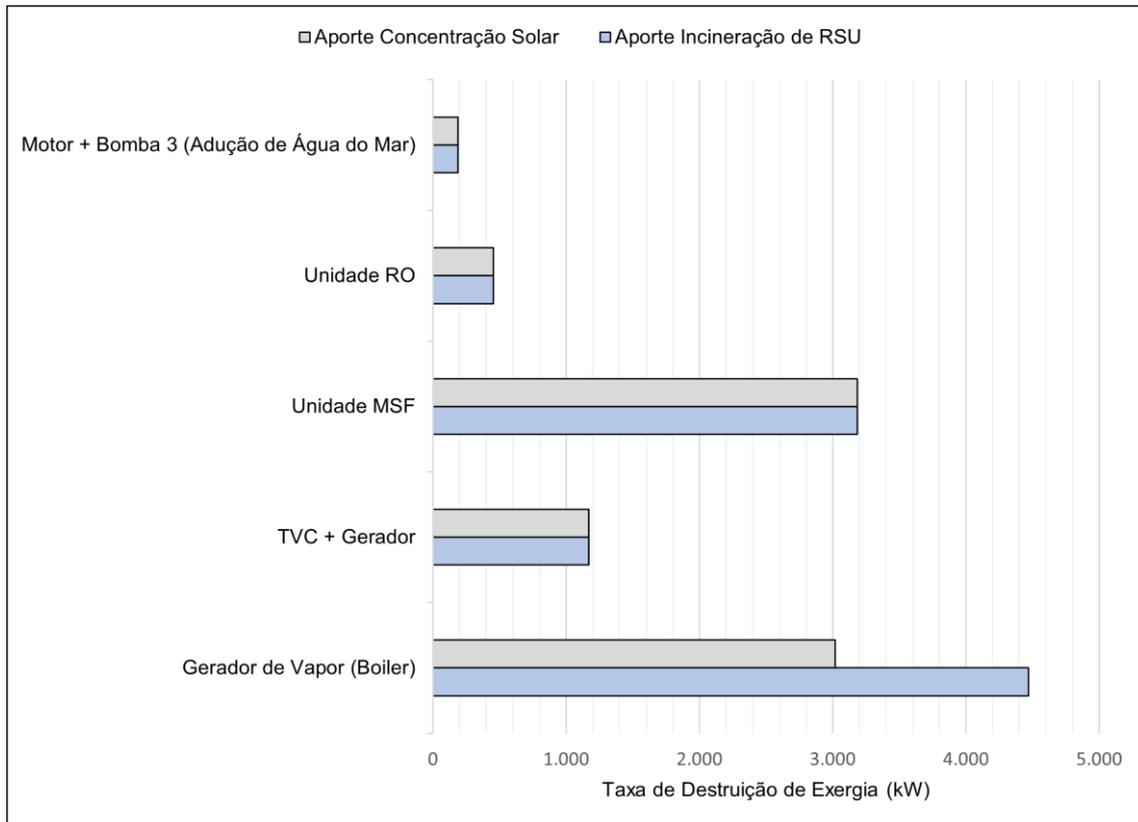
A taxa total de geração de irreversibilidades para o aporte da planta de incineração de RSU obtida foi 10.851 kW enquanto que, para o aporte de concentração solar o valor obtido para este total foi de 9.400 kW.

Gráfico 9 - Taxa de geração de irreversibilidades para motores + bombas, bifurcações e junção.



A taxa de destruição de exergia será apresentada conforme realizado até agora, em dois gráficos, porém com a diferença de que agora ambos os gráficos a seguir possuem as mesmas unidades e para o cálculo de D foi levada em conta a exergia destruída na adutora de água do mar, assim elevando a taxa no respectivo volume de controle.

Gráfico 10 - Taxa de destruição de exergia para as unidades de adução de água do mar, dessalinização, turbina + gerador e gerador de vapor.



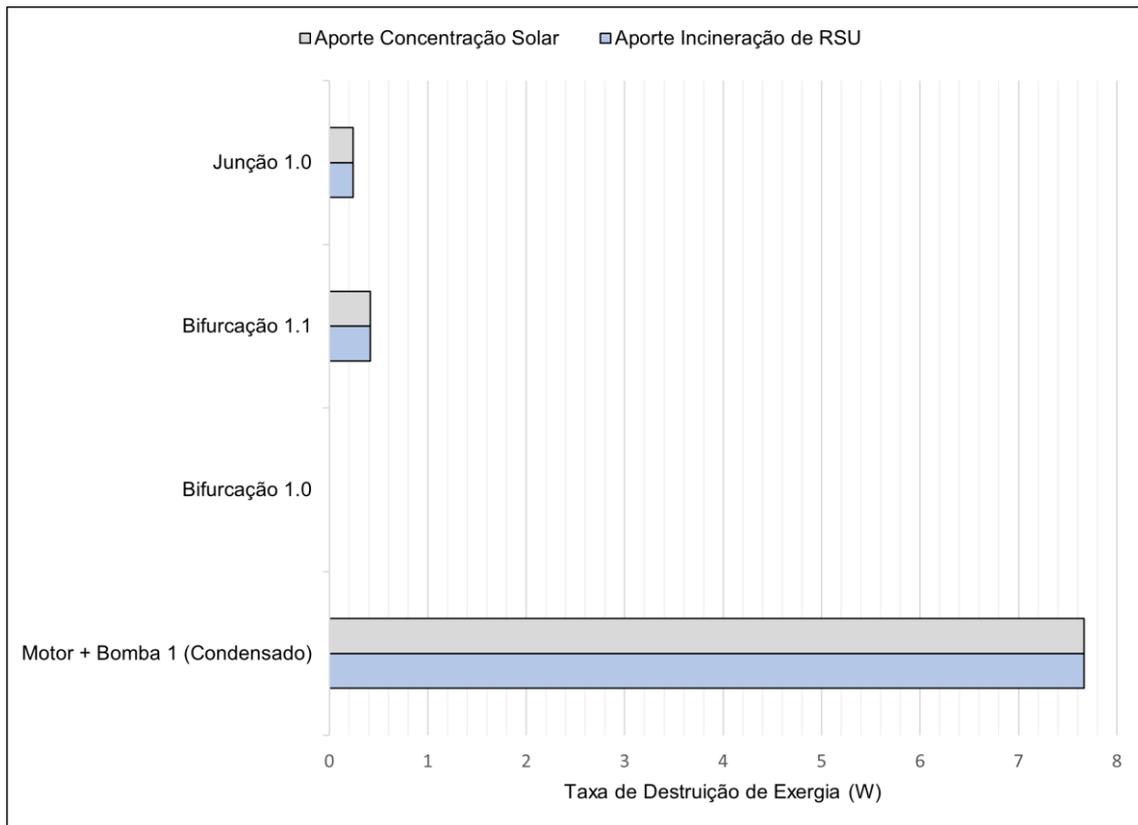
Os maiores valores obtidos para o gerador de vapor em comparação a unidade MSF neste indicador ocorrem em decorrência do fato de a exergia da água bruta e da salmoura (perdas) foram desconsideradas para o cálculo do balanço de exergia.

A diferença entre os aportes no gerador de vapor ocorre mais uma vez em decorrência da temperatura da chama no incinerador e da temperatura máxima nas calhas da planta de concentração solar.

A taxa total de destruição de exergia para o aporte de calor fornecido pela incineração de RSU foi de 9.478 kW, enquanto que, para o aporte da concentração solar este valor foi de 8.026 kW.

Foi possível observar através dos gráficos que a unidade MSF e o gerador de vapor são as unidades com maiores taxas de geração de irreversibilidades e também destruição de exergia.

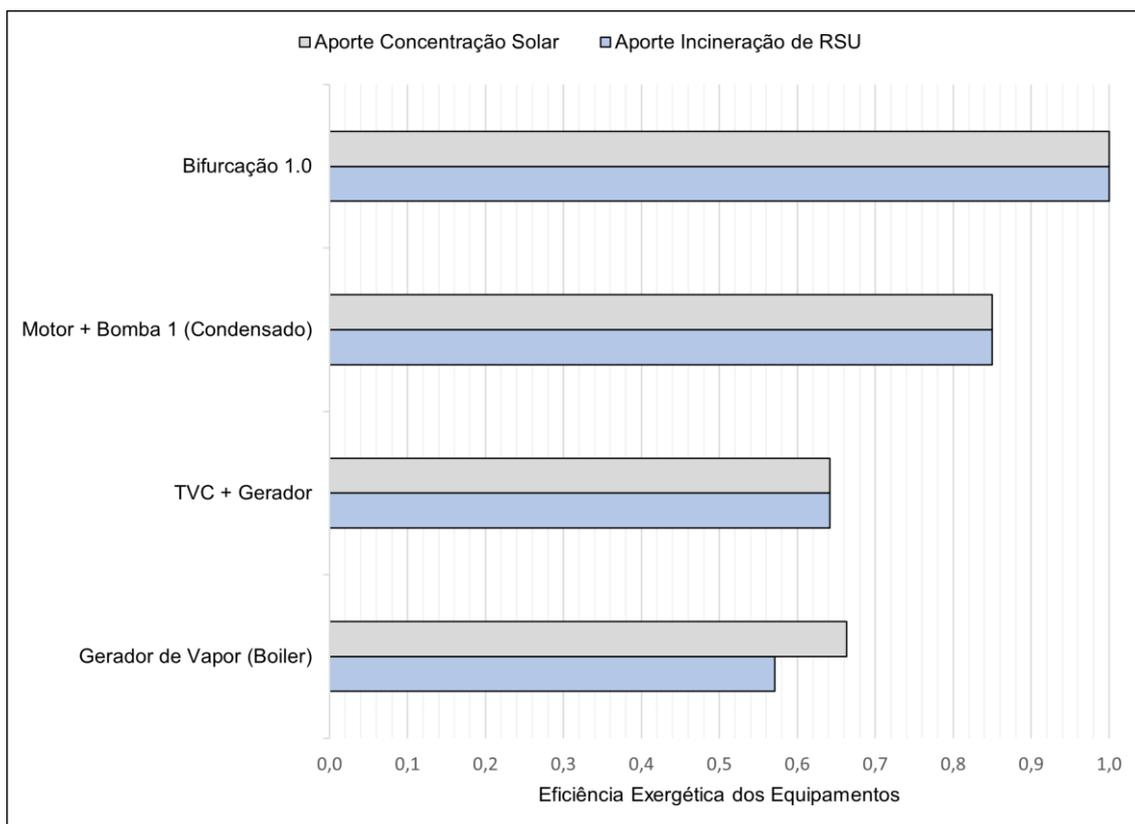
Gráfico 11 - Taxa de destruição de exergia para motore + bomba de condensado, bifurcações e junção.



As eficiências exergéticas dos equipamentos serão demonstradas a seguir e estas são um reflexo das análises apresentadas até agora, aonde a unidade MSF possui a menor eficiência exergética.

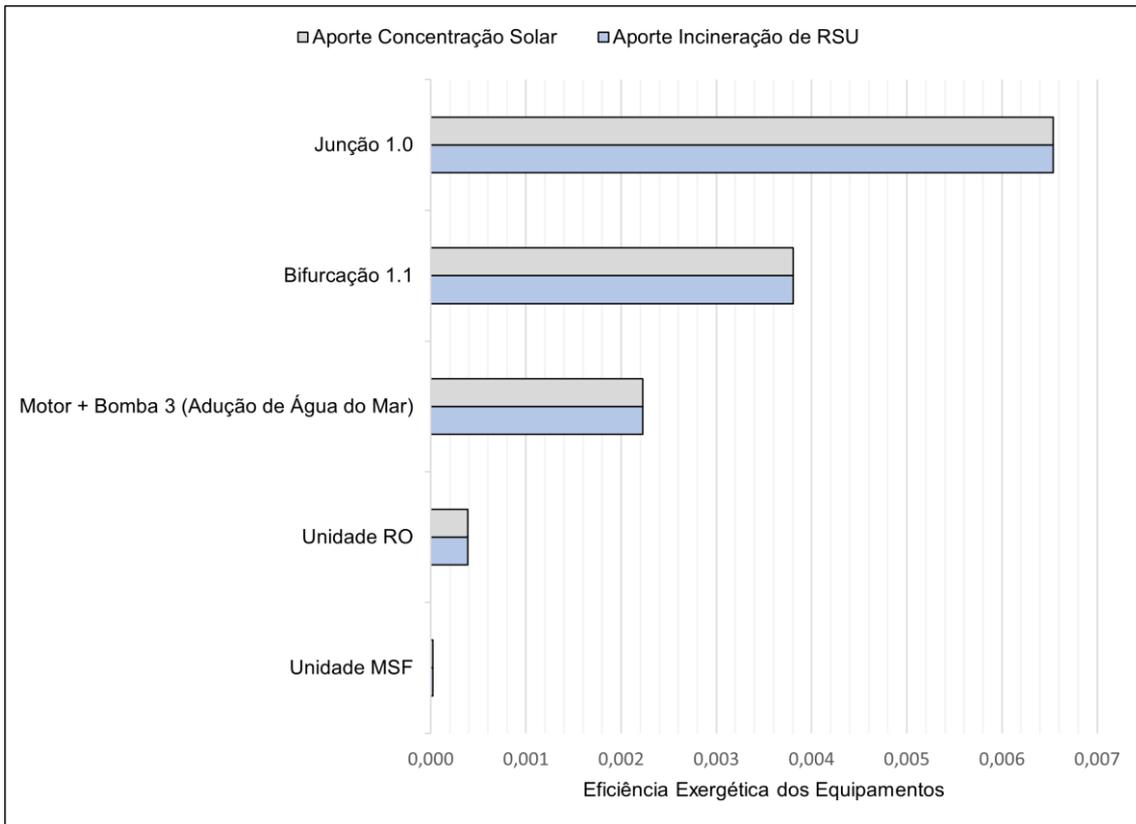
Na ramificação de distribuição de potência elétrica não houve a destruição de exergia e a eficiência exergética para o conjunto motor + bomba de condensado foi alta também em decorrência das simplificações realizadas.

Gráfico 12 – Eficiência exergética para bifurcação 1.0, motor + bomba 1, TVC + gerador e gerador de vapor.



A eficiência exergética na junção 1.0 e bifurcação 1.1 foram baixas em decorrência de as exergias químicas das correntes terem sido desprezadas. Na unidade MSF além desta simplificação também foram desconsideradas as correntes de água bruta e salmoura, assim justificando o valor de eficiência exergética muito baixo para este volume de controle.

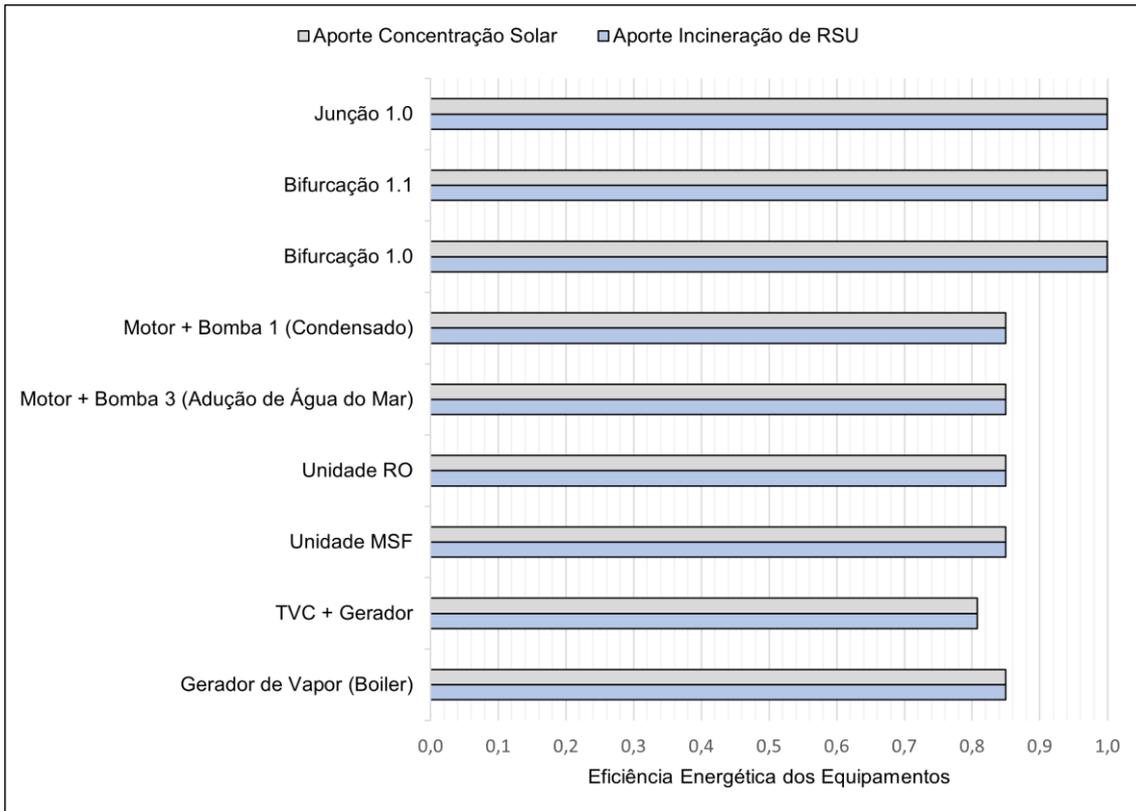
Gráfico 13 - Eficiência exergética para junção 1.0, bifurcação 1.1, motor + bomba 3, unidade Ro e unidade MSF.



As eficiências energéticas dos equipamentos serão apresentadas a seguir, nas unidades de dessalinização foi considerada nesta análise somente a eficiência energética relativa a potência fornecida a estes subsistemas.

Nas bifurcações e junção a eficiência foi considerada 100 % como uma simplificação de modo a facilitar os cálculos.

Gráfico 14 - Eficiência energética dos equipamentos.



5.4 Custos exergéticos e custos exergéticos unitários

Os valores obtidos para os custos exergéticos (B^*) e custos exergéticos unitários (k^*) (Tabela 28 e Tabela 31) são resultados da aplicação do Teorema do Custo Exergético

O custo exergético da corrente 1 é referente ao custo de se levar esta corrente ao estado de alimentação da turbina de contrapressão, a extração de vapor da turbina ainda mantém o custo exergético referente ao custo para levar o fluido de trabalho do estado ao estado 1.

As correntes 1, 2 e 3 tem os valores iguais para seus custos unitários, e estes são baseados no gasto de calor (fornecido pelo aporte de RSU ou de concentração solar) para o atendimento das condições de projeto da planta e nas equações de alocação de custos apresentadas. O custo exergético unitário da corrente 4 é maior aos 3 anteriores em decorrência do aporte de energia elétrica para o conjunto motor + bomba.

As correntes de 6 a 09 (10 no caso do aporte de concentração solar), possuem o mesmo (k^*) devido aos conceitos do Teorema do Custo Exergético, porém seus custos exergéticos (B^*) são proporcionais ao fluxo de energia em cada corrente.

Os elevadíssimos custos exergéticos e exergéticos unitários das correntes de água bruta (13,14 e 15) são decorrentes da demanda de potência elétrica para realizar a adução da captação até a planta (14,5 km).

Os valores de B^* e k^* ainda mais elevados obtidos para a corrente de água dessalinizada saindo da unidade RO são referentes ao custo de adução da água bruta e também ao custo da potência elétrica fornecida ao equipamento, bem como ocorrem em decorrência das eficiências energéticas e exergéticas apresentadas anteriormente.

Agora os valores de B^* e k^* , em uma ordem 10 vezes maior dos que os obtidos na unidade RO, levam em conta todos os fatores citados acima para a formação dos custos da unidade de dessalinização elétrica, mas também levam em consideração o custo da extração de vapor da turbina.

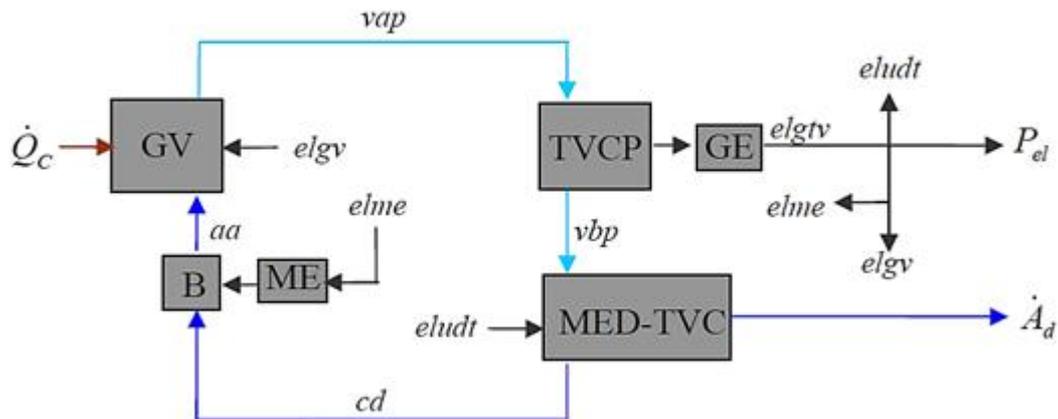
Em ambas as configurações os valores obtidos para os custos são proporcionais, variando mais uma vez somente com relação a temperatura da chama no incinerador e na superfície das calhas da planta PTC.

Outra forma de se apresentar os custos para a água dessalinizada é através do custo exergético para se produzir um m³ de água dessalinizada, assim para a unidade MSF com aporte da incineração de RSU para se produzir um litro de água tratada são necessários 152,2 kJ, já na unidade RO, com o mesmo aporte, para um litro de água tratada são necessários 12,9 kJ. No aporte advindo da concentração solar os custos são: MSF: 131,0 KJ/L e RO 11,1 kJ/L.

5.5 Comparação com a Bibliografia

O estudo utilizado para comparação foi Avaliação Exergoeconômica das Tecnologias para Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada (Santos, 2005). O qual, dentre outras, analisa uma planta do tipo CTV – MED (ciclo a vapor com turbina de contrapressão e destilação a múltiplos efeitos), a qual utiliza vapor para a produção de eletricidade e tem uma extração de vapor da turbina para a unidade de dessalinização térmica. Possuindo correntes similares às apresentadas no presente estudo.

Fluxograma 13 - Estrutura Física CTV - MED.



Fonte: Santos, 2005.

Neste os custos para as correntes de potência elétrica, assim como no presente estudo apresentam os mesmos valores, já o custo exergético unitário para a produção de água dessalinizada é o maior dentre todos os analisados, também em decorrência deste ser formado com base no custo da potência elétrica e do vapor. A menor eficiência exergética também é observada na unidade de dessalinização. Também é possível observar o menor custo da água dessalinizada produzida nas unidades RO, assim como no presente trabalho.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo apresentou um panorama da situação do município de Paranaguá – PR com relação às suas características físicas, econômicas e sociais. Em especial a situação das fontes de água doce para abastecimento da cidade e também das dificuldades para a implementação de um Plano Municipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos eficiente. Assim apresentando uma necessidade de melhora no sistema de abastecimento de água, fornecimento de energia elétrica e coleta e tratamento dos resíduos sólidos urbanos. Além da situação habitual do município, por se tratar de uma região litorânea e turística na época de temporada a demanda de infraestrutura torna-se ainda mais importante.

Tendo em vista o potencial de aproveitamento dos RSU e da energia solar na localização geográfica do município foi apresentada planta para aproveitamento energético dos resíduos e irradiação solar para a produção de energia e água dessalinizada. Esta simulada por meio das equações apresentadas na revisão bibliográfica apresentou uma estimativa das possibilidades para a melhoria do município.

Com base nos resultados obtidos é possível observar quais são os equipamentos da planta que tem maior geração de irreversibilidades e menores eficiências, assim possibilitando uma análise racional da planta. A unidade MSF (unidade de dessalinização térmica) apesar de ser uma tecnologia amplamente usada tem seu uso diminuído nos últimos anos em decorrência dos fatores apresentados e também tendo em vista a sua comparação com unidades de dessalinização elétrica como a osmose inversa.

O aporte RSU estimado foi de 123,552 toneladas por dia, capazes de gerar no incinerador 14,3 MJ/s em forma de calor para o gerador de vapor, este aporte de energia em forma de calor teve o mesmo valor para o suprimento oriundo da planta de concentração solar. Foram apresentadas também, considerações acerca dos equipamentos que compõe a planta, assim, foi possível a aplicação das leis e equações termodinâmicas apresentadas na revisão bibliográfica, e também os conceitos da termoeconomia. Os valores de fluxo de energia, fluxo de exergia, custo exergético e custo exergético unitário para cada corrente foram determinados e para os volumes de controle foi determinada a geração de entropia, geração de irreversibilidades, destruição de exergia, eficiência energética e eficiência exergética. A unidade MSF foi o equipamento onde houve a maior taxa de geração de entropia (22,88 kW/K), também foi o equipamento com menor eficiência exergética. Estes valores quando comparados com os obtidos para a tecnologia de

dessalinização elétrica (RO) (geração de entropia 2,99 kW/K) divergiram em decorrência do aporte térmico para a unidade MSF proveniente da extração de vapor da turbina de contrapressão. Os custos exergéticos unitários para a geração de eletricidade por meio da turbina a vapor de contrapressão foram formados com base no aporte de calor proveniente da queima de RSU e concentração solar, os quais para o aporte da concentração solar foram menores. Já os custos exergético e exergético unitário para a água dessalinizada foram elevados em decorrência de terem sido formados pela energia gasta na adução da água bruta (189,43 kW), geração de potência pelo ciclo a vapor para fornecimento de potência elétrica para as unidades (454,57 kW) e no caso da unidade MSF também pelo aporte de calor obtido por meio da extração da turbina a vapor de contrapressão. Aporte este que tornou o custo da água produzida por esta unidade muito mais elevado quando comparado com o custo obtido para a unidade de osmose inversa em ambas as configurações da planta. A taxa total de geração de irreversibilidades para o aporte da planta de incineração de RSU obtida foi 10.851 kW enquanto que, para o aporte de concentração solar o valor obtido para este total foi de 9.400 kW, diferença esta que ocorreu devido a diferença de temperatura da chama no incinerador e na temperatura máxima da superfície da tubulação aonde circula o fluido de trabalho para o PTC. Já a taxa de destruição de exergia para o aporte de calor fornecido pela incineração de RSU foi de 9.478 kW, enquanto que para o aporte da concentração solar este valor foi de 8.026 kW, mais uma vez diferença observada em decorrência da diferença de temperatura para o cálculo das exergias nas unidades que fornecem calor para a planta. A produção estimada de água dessalinizada foi de aproximadamente 3.637 m^3/dia (MSF) e 9.573 m^3/dia (RO), totalizando para a planta uma produção capaz de atender aproximadamente 87.423 habitantes, o que representa 87% da população total do município, assim a planta proposta demonstra um potencial real de solução do atual índice mínimo de segurança hídrica do município. Já a energia entregue para a rede foi de aproximadamente 3,4 MWh para o aporte da incineração de RSU, enquanto no aporte de calor advindo da concentração solar foi aproximadamente 3,2 MWh .

Apesar das simplificações realizadas é possível vislumbrar as potencialidades para a geração de energia elétrica e água dessalinizada utilizando-se o aporte de incineração de RSU e concentração solar.

6.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

6.1.1 Atribuição de Custos Monetários

Realizando uma atribuição de custos monetários, que envolvem operação, manutenção e outros fatores a análise termo econômica da planta é possível ter um panorama mais preciso acerca da viabilidade de instalação de uma planta como a proposta no presente estudo.

6.2 Alocação de CO_2

Além do custo monetário, podem ser alocados custos ambientais decorrentes das emissões de gases de efeito estufa na planta, sendo esta uma análise de extrema relevância tendo em vista o escopo e propósito da planta apresentada.

6.2.1 Variação no Aporte de Energia para as Unidades de Dessalinização

Um ponto a ser analisado, e que não foi abordado no presente estudo, seria a variação do aporte elétrico para as unidades de dessalinização, assim o volume de água tratada também iria variar, bem como o suprimento de energia elétrica da planta para a rede. Esta é uma análise válida em decorrência de variações sazonais de população no município, assim, a depender da época a demanda de energia elétrica pode ser maior ou menor do que a da água para a região objeto do estudo.

6.2.2 Tratamento do Rejeito – Salmoura

Outra possibilidade de análise futura que esta muito relacionada com o sistema apresentado é o tratamento da salmoura (rejeito do processo), que é um grande passivo ambiental. Para o seu lançamento no ambiente deve-se ser realizado um tratamento a fim de diminuir os impactos ambientais gerados pela atividade. Este tratamento demanda de custos para sua instalação, de operação e manutenção, assim deve ser levado em conta em um estudo mais aprofundado para a implantação de uma planta como a proposta no presente estudo.

6.2.3 Exergias Químicas das Correntes

As exergias químicas influenciam na análise de destruição de exergia, custos exergéticos e custos exergéticos unitários, assim influenciando também na análise da planta e seus subsistemas. Assim como citado anteriormente, os valores das exergias químicas das correntes devem ser levados em conta em um estudo mais aprofundado para a implantação de uma planta como a proposta no presente estudo.

6.3 Cenário Temporal

A planta do presente estudo foi dimensionada conforme o calor fornecido na incineração dos RSU, assim sendo modelada com relação ao cenário atual do município. Porém, com o crescimento da população, haverá também aumento na demanda de energia elétrica e de água para consumo, bem como o aumento da geração de RSU em Paranaguá – PR. Para um estudo mais aprofundado devem ser analisados cenários futuros e horizonte de projetos para que a implantação da planta seja relevante não só a curto prazo. Tendo em vista que os custos de instalação, operação e manutenção são elevados.

6.4 Análise de Equipamentos Reais

Atualmente, é possível a obtenção de informações acerca de equipamentos reais para modelagem de plantas. Assim, para um estudo real, devem ser realizadas análises e modelagens utilizando equipamentos reais, avaliando mais uma vez as capacidades de atendimento para o abastecimento de água potável e energia elétrica. Assim, sendo possível apresentar um estudo de caso relevante.

6.5 Locação da Planta

A alocação da planta no presente estudo foi realizada de forma simplificada, porém, como foi possível observar a distância de adução é relativamente grande. Assim demandando de muita potência elétrica e aumentando o valor dos custos exergéticos para a água dessalinizada. Além da distância de adução também deve ser levada em conta a porcentagem de água bruta utilizada somente para trocas térmicas na unidade MSF (esta

parcela retorna ao ambiente após as trocas) e também a distância para condução da salmoura. O ideal seria uma maior proximidade da planta com o ponto de captação.

O entorno da baía de Paranaguá poderia ser uma potencial locação, porém devido ao Porto de Paranaguá, a presença de contaminantes na água dificultaria o processo de obtenção de água potável, apesar da água da baía ser considerada salobra.

No município de Paranaguá, como foi possível observar pela breve caracterização apresentada, existem muitas áreas que logo em uma primeira análise podem ser descartadas. Como por exemplo áreas de mangue, de reservas ambientais e áreas de encosta. Porém devem ser analisados mais profundamente os critérios de licenciamento impostos pelo IAT, bem como logística de coleta e transporte de RSU, localização dos aterros, localização dos centros urbanos e rios.

6.6 Concentração Solar

A simplificação com maior impacto nos resultados do presente estudo foi a de se considerar a insolação constante na locação da planta para todo o período solar útil, porém como algumas outras fontes renováveis de energia a insolação não é constante. Esta varia de acordo com o tempo e o clima. Uma possível solução seria a aplicação de algoritmos com inteligência artificial para o aporte de calor suprido a planta, assim sendo possível modular este com base em uma produção constante e também com base em demandas específicas.

6.6.1 Outros Potenciais do Município

Vale citar que além da coleta pública em Paranaguá, existem empresas privadas que atendem grandes geradores que atendem, como por exemplo o Terminal de Contêineres de Paranaguá, assim abrindo a possibilidade o aumento do aporte de energia advindo da incineração dos RSU.

Outra potencial fonte de energia para aporte a planta poderia ser o aproveitamento de resíduos da construção civil (RCC), o ramo da construção civil gera 7 milhões de toneladas de resíduos sólidos no Brasil ao ano (Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010). Uma parcela representativa destes resíduos possui potencial para aproveitamento energético.

REFERÊNCIAS

ABETRE (Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes Atlas da Destinação Final de Resíduos – Brasil, 2020.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) – Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2021.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. ESA Working Paper n°. 12-03. Roma, Itália, FAO, 2012.

ALJUNDI, I. H. **Second-law Analysis of a Reverse Osmosis plant in Jordan**, 2009.

ALMEIDA, G. S.; FONTES FILHO, J. R.; MARTINS, H. **Identificando stakeholders para formulação de estratégias organizacionais**. In: Encontro Anual da Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Administração, EnANPAD, 24., 2000, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANPAD, 2000. Disponível em: <http://www.anpad.org.br/diversos/trabalhos/EnANPAD/enanpad_2000/ADE/2000_AD E1110.pdf>.

ALMEIDA, T.R. de; PICANÇO, J.; MESQUITA, M.J. M. de. **A mineração aurífera na região de Paranaguá (séculos XVII e XVIII) na toponímia contemporânea da folha Morretes (SG.22-X-D-II-3)**. Artigo (2 Instituto de Geociências) - Departamento de Geociências Aplicadas Ao Ensino. UNICAMP, São Paulo 2010.

AL-WESHAHI, M.; ANDERSON, A.; TIAN, G. A. **Exergy Efficiency Enhancement of MSF Desalination by Heat Recovery from Hot Distillate Water Stages**.

ANDRÉ, P.; B. ENSERINK; D. CONNOR; CROAL, P. **Public participation international best practice principles**. Special Publications Series no. 4. Fargo. USA: International Association for Impact Assessment, 2006.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020. EPE.

ARAGÃO, L. P. de. **A apropriação urbana de ecossistemas manguezais. Estudo de caso: canal do Anhaia, Paranaguá – PR**. Curitiba, 2014. (Trabalho apresentado como requisito à obtenção do título de Especialista em Análise Ambiental do Programa de Pós-Graduação - Lato Sensu, do Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná). Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/49541/R%20-%20E%20-%20LARISSA%20DE%20PINHO%20ARAGAO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

ARAGÃO, L.P. de. **Entre marés: uma análise integrada entre a pesca artesanal e os ecossistemas manguezais no município de Paranaguá (Paraná)**. Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geografia, no Curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015. Disponível em:

<<https://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/39103/R%20-%20D%20-%20LARISSA%20DE%20PINHO%20ARAGAO.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. Gheyi,

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 9. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 332 p.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Innovative and Low Cost Technologies Utilized in Sewerage**. Technical series n° 29. Environmental Health Program. Washington, D.C. 1992. Banco Mundial. Disponível em (<https://www.worldbank.org/pt/country/brazil>)

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2ª Edição Revisada. Porto Alegre: ABRH, 2005.

BARROS, F. G. N.; AMIN, M. M. **Água: um bem econômico de valor para o Brasil e o mundo**, 2008. Revista Brasileira De Gestão E Desenvolvimento Regional, 4(1). <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v4i1.116>

BARROS, R.T.V. et al. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios**. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 221 p.,1995.

BERLOFFA, V. O. de; LUCAS, M. A. O. F.; MACHADO, M. C. G. **Do ouro ao café: primeiros ciclos econômicos responsáveis pela ocupação do Estado do Paraná**. Seminário de Pesquisa do PPE. Universidade Estadual de Maringá, 12 a 14 de junho de 2013. Disponível em: < <http://www.ppe.uem.br/publicacoes/>

BERTON, J. - **Estudo de Caso da Cidade de Campo Largo para a valoração e aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**, 2016.

BIODIVERSIDADE. Dados Gerais das Unidades de Conservação. Brasília, 2020. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/servicos/geoprocessamento/51-menu-servicos/4004-mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-ucs.html>>.

BRASIL Agência Brasil, 2022.

BRASIL AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Sistema de Arrecadação**.

Disponível em:

<https://sistemas.anm.gov.br/arrecadacao/extra/relatorios/arrecadacao_cfem_substancia.aspx>.

BRASIL AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução da Diretoria Colegiada nº 306 de 07 de dezembro de 2004**. Dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde. Diário Oficial da União, 10 de dezembro de 2004.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Biblioteca. Catálogo. ID: 49486. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=449486&view=detalhes>>.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-demografico/demografico-2010/inicial>>.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Paranaguá** - Paraná – Biblioteca do IBGE. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/dtbs/parana/paranagua.pdf>>

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Paranaguá**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/paranagua/panorama>>.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Paranaguá. História & Fotos**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/paranagua/historico>>.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da Silvicultura e da Extração Vegetal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2018>>.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Pecuária Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2018>>.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Regiões de Influência das Cidades – REGIC 2007**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/PZEE/_arquivos/regic_28.pdf>.

BRASIL INSTITUTO HISTÓRICO E GEOGRÁFICO DE PARANAGUÁ – IHGP. **Hans Staden e o registro sobre a entrada de Paranaguá pelo mar**. Disponível em: <https://www.facebook.com/pg/museu.IHGP/photos/?tab=album&album_id=1098914740208496>.

BRASIL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET – Tabela de dados climatológicos.

BRASIL INSTITUTO TRATA BRASIL. **Conheça algumas doenças causadas pela falta de saneamento básico**. Publicado em 27 fev. 2018. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/blog/2018/02/27/doencas-falta-de-saneamento-basico/>>.

BRASIL IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf>

BRASIL IPEA, Texto para Discussão nº 939, Brasília. 2003.

BRASIL Lei Federal nº 11.445 de 05 de janeiro e 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978 (Redação pela Lei nº 14.026, de 2020).

BRASIL Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL Lei Federal nº 14.026 de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados.

BRASIL Ministério da Saúde, Portaria nº 518 de 25 de março de 2004- Procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, 2004.

BRASIL Ministério de Minas e Energia. Disponível em (<http://www.mme.gov.br/documents/>)Moderna, 1999. 351 p.

BRASIL Ministério do Meio Ambiente - MMA. Impactos da Mudança do Clima na Mata Atlântica. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2019.

BRASIL PNUD; Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. 2018.

BRASIL Política Nacional de Segurança Hídrica (PNHS), ANA, 2022.

BRASIL SNIS/Ministério das Cidades, 2020.

BRASÍLIA AGÊNCIA BRASÍLIA. Fechamento do lixão da Estrutural: aberta seleção para cooperativas de catadores <
<https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2017/>>.

BRITTEZ, R. M.; PRESTES, M.; MACHADO, M. A. Mapeamento da vegetação no litoral do Paraná. Anais do VIII CBUC - Trabalhos Técnicos 2015. Congresso Brasileiro de Unidades de Conservação. Curitiba, 2015.

BUARQUE, S. Metodologia e Técnicas de Construção de Cenários Globais e Regionais. IPEA, Texto para Discussão nº 939, Brasília. 2003.

CANEPARO, S. C. Análise da dinâmica espacial da ocupação antrópica em Paranaguá (1952 – 1996), Através do Uso de Sistema de Informações Geográficas. R. RA'EGA, Curitiba, n. 4, p. 111-130. 2000. Editora da UFPR.

CANEPARO, S. C.; BRANDALIZE, M. C. B. **Aspectos socioambientais das ocupações irregulares no município de Paranaguá – Estado do Paraná.** 7º Colóquio de Transformações Territoriais, Curitiba, UFPR, 10 a 13 de setembro de 2008.

Disponível em: <

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjv->

[HFpdfpAhWtG7kGHfP1AbQQFjAAegQIAhAB&url=http%3A%2F%2Fwww.augm-cadr.org.ar/2Farchivos/2F7mo-](https://www.augm-cadr.org.ar/2Farchivos/2F7mo-)

[colouquio%2Fmesa_1%2F20080380.pdf&usg=AOvVaw20BLD4AzF1sOiem5mmNH9v](https://www.augm-cadr.org.ar/2F7mo-colouquio%2Fmesa_1%2F20080380.pdf&usg=AOvVaw20BLD4AzF1sOiem5mmNH9v)>. CAPACIDADE OPERACIONAL. 2008. Disponível em: <<https://goo.gl/9i86G5>>.

CARMO, M. C. do. **Território como estratégias de sobrevivência na comunidade de Amparo no município de Paranaguá – PR.** Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Desenvolvimento Territorial Sustentável, no Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial Sustentável, da Universidade Federal do Paraná - Setor Litoral. Matinhos, 2018. Disponível em:

<<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/56952/R%20-%20D%20-%20MARCIO%20ROSARIO%20DO%20CARMO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

CARVALHO, M - **Alocação em Sistemas Energéticos Multiproduto: Revisão e Proposta de Métodos,** 2020. LALCA- Revista LatinoAmericana em Avaliação do Ciclo de Vida 4:e44660.

CASTELLS, M. **A sociedade em rede.** Paz e Terra, São Paulo, 1999.

CELLI, R. **Modelos de Dessalinização e Sua Eficiência: Comparativo Entre Tecnologias.** Revista Gestão, Tecnologia e Inovação, Vol. 01, 2017, Artigo 3.

CEMITÉRIO JARDIM ETERNO. Site oficial. Disponível em:

<<https://www.cemiteriojardimeterno.com.br/>>.

CHOU, S.C; LYRA, A; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENCO, J. (2014a) **Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models.**

American Journal of Climate Change, 3, 438-454.

doi:10.4236/ajcc.2014.35039.http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko

CHOU, S.C; LYRA, A; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENCO, J. **Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models,** 2014. American

Journal of Climate Change, 3, 512-527. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043.
http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_IVikp

CIETEC/AMBIOTECH. RIMA. **Relatório de Impacto Ambiental**. Complexo Industrial Eco-tecnológico CIETec. Paranaguá, 2016. Disponível em:
<http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2017_EIA_RIMA/RIMA_CIETec.pdf>.

CONSELHO DO PLANO DIRETOR DE GUARAPUAVA. **Caderno Temático Plano Diretor 2016/2026**. Disponível em
http://concidade.com.br/concidade/pages/pd2016_2026 .

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA nº 469 de 29 de julho de 2015. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União de 30 de julho de 2015.. Brasília, DF. 2015.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA nº 348 de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Diário Oficial da União nº 158. Brasília, DF. 2004.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA nº 431 de 24 de maio de 2011. Altera o art. 3º da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Diário Oficial da União nº 99 de 25 de maio de 2011. Brasília, DF. 2011.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA nº 448 de 18 de janeiro de 2012. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União nº 249 de 30 de dezembro de 2009. Brasília, DF. 2009.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 358 de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 84, p. 63 – 65, 04 mai. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº. 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União n. 136, p. 95-96, 17 de julho de 2002. Disponível em
<<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº. 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos

Industriais. Diário Oficial da União n. 226, Seção 1, p. 85-91, 22 de novembro de 2002. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=335>>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº. 358, de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências. Diário Oficial da União n. 84, Seção 1, p. 63-65, 4 de maio de 2005. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=462>>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº. 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial da União n. 66, Seção 1, p. 64-68, 7 de abril de 2008. Disponível em <<http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>>.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Paranaguá, Paraná.** Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20124>>.

DIAS, S. **Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: O Caso da Incineração e da Disposição em Aterros.** Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, doi:10.1016/j.desal.2017.09.021

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Antropossolos: proposta de ordem (1ª aproximação).** Embrapa Florestas. Colombo, 2004. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/38117/1/doc101.pdf>>.

EMBRAPA, Natal, RN. MAAS, E.V.; **Crop tolerance to saline sprinkling water.** Plant and Soil, n.89, p.273-284, 1985.

ENGEMA. Encontro internacional sobre gestão empresarial e meio ambiente. **Sustentabilidade Energética: Descrição de indicadores adaptados à geração de energia eólica.** Disponível em (<http://engemasp.submissao.com.br/17/anais/arquivos/225.pdf>).

FELLAOU, S.; RUIZ-GARCIA, A.; GOURICH, B. **Enhanced Exergy Analysis of a Full-scale Brackish Water Reverse Osmosis,** 2021.

FENDRICH, R. **Chuvas Intensas para Obras de Drenagem (no estado do Paraná).** Champagnat, 1998.

FRENKEL, H. **Reassessment of water quality criteria for irrigation.** In: Shainberg, I, Shalhevet, J. Soil salinity under irrigation. Berlin: Springer-Verlag, p.143-72, 1984.

GAGGIOLI, R. A. **Efficiency and costing.** A.C.S. Symposium series, Canadá, n. 235, p.3-12, 1983.

GALDINO, W. R. C.; EDMUNDO, D. A.; FERREIRA, H. D. L. **Estudo das equações de Hazen-Williams e Darcy-Weisbach aplicadas ao dimensionamento hidráulico de hidrantes,** 2018.

GHAMDI, A. A.; MUSTAFA - **Exergy Analysis of a Msf Desalination Plant in Yanbu, Saudi Arabia**, 2016.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e Meio Ambiente no Brasil**. Estudos Avançados 21 (59), 2007.

GOUVEA, N. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social**. 2012.

HOLANDA, J.S.; AMORIM, J. R. A. **Qualidade da água para irrigação**, 1997.

HOORN, J.W.; ALPHEN, J.G. **Salinity control; salt balance; and leaching requirement of irrigated soils**. Wageningen: Agricultural University of Wageningen, 1981. (Lectures notes for the Twentyninth International Course on Land Drainage, 1990). <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=47>: Acesso, 19/12/2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas Hidrogeológico do Brasil. 2013. IBGE, 2013. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-4267.html>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico de 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em 20 out. 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Pedologia. 2007. <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>> Acesso em 20 abr. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Vegetação. 2012. <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4228241/mod_resource/content/2/Manual%20Tecnico%20da%20Vegetacao%20Brasileira%20-%202012.pdf>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa Brasil Climas (1:5.000.000). 2002. <ftp://geoftp.ibge.gov.br/grafis/tematicos/mapas_murais> Acesso em 5 abr. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Agrícola Municipal. 2018. Disponível em: <> Acesso em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Pecuária Municipal. 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2018>>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura. 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2018>> Acesso em: 10 abr. 2020.

IBGE. Síntese de Indicadores Sociais. Uma Análise das Condições de vida da População brasileira. 2019. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101678.pdf>>.

ICMBio - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA

IDA (International Desalination Association). **Desalination Yearbook**. 2014.

IDA. Desalting Inventory 2004: **Desalination Bussines Stabilized on a High Lever**, Int. Desal. Water Reuse, 2004.

IEA. **Energy efficiency 2017, Market report series**, OECD/IEA, Paris. IEA, International Energy Agency. IEA – Atlas of Energy. 2017. Disponível em: (<http://energyatlas.iea.org/!/tellmap/-1002896040>).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Diagrama de Sankey – balanço**. Disponível em: (<https://www.iea.org/Sankey/>). International Water Management Institute (IWMI) <<https://www.iwmi.cgiar.org/>>

JAMSHIDIAN, F. J.; GORJIAN, S.; SHAFIEEFAR, M. - Techno-Economic Assessment of a Hybrid RO-MED Desalination Plant Integrated with a Solar CHP System, 2022. Energy Conversion and Management 2022; 251:114985. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114985

JORDÃO, A. A. **Tecnologia e meio ambiente: a valorização e aproveitamento energético de resíduos sólidos no Brasil**, 2011.

KAHRAMAN, N.; CENGEL, Y.A. **Exergy analysis of a MSF distillation plant**, Energy Conversion and Management. 2005. vol. 46 pp. 2625–2636.

KHAN, M. S.; HUAN, Q.; YAN, M.; ALI, M.; NOOR, O. U.; ABID, M. **A Novel Configuration of Solar Integrated Waste-to-energy Incineration Plant for Multi-Generational Purpose: An Effort for Achieving Maximum Performance**, 2022. Renewable Energy, Elsevier, vol. 194(C), pages 604-620.

KOTTAS, T. J. **The Exergi Method of Thermal Plant Analysis**. Krieger Publishing Company. Malabar, Flórida 1995.

LABORATÓRIO DE GEOPROCESSAMENTO E ESTUDOS AMBIENTAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Relatório parcial referente às condicionantes do termo de ajustamento de conduta, assinado entre o ministério público do Estado do Paraná e Posto O Cupim Paranaguá LTDA**. 2020. Universidade Federal do Paraná.

LOZANO, V. **Teoria del Coste Exergético**. 1989.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S.C.; SUEIRO, G.; DERECZYNSKI, C.P.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. **Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution** Theor Appl Climatol. 2017. doi:10.1007/s00704-017-2067-z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>

MAAS, E.V. **Salt tolerance of plants**. Applied Agriculture Research, v.1, n.1,p.12-26, 1986.

MBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.

MEDEIROS, A.B.; MELO, J.G.; VASCONCELOS, M.B.; MAIA, B. G. O; STAFFORD, F. N. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares oriundos da coleta regular do município de Jaraguá do Sul/SC**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade da Região de Joinville.

MEDEIROS, H. R.; DAMASCENO, J. F. Campina Grande: UFPB. 218p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 revisado1), 1991.

PALÁCIO; SANTOS. **Municipal Solid Waste Management and Energy Recovery**. 2018.

PARANÁ ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. RIMA. **Obras de ampliação do Cais de Acostagem de Paranaguá**. (Paranaguá, 23 jan. 2019). Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/EIA_RIMA/TCP_RIMA_Ampliacao_cais.pdf>.

PARANÁ AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DO PARANÁ. **Festa do Rocio atrai milhares de pessoas a Paranaguá**. Disponível em: <<http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=104654&tit=Festa-do-Rocio-atrai-milhares-de-pessoas-a-Paranagua>>.

PARANÁ ÁGUAS PARANÁ. **Plano da Bacia Litorânea**. 2019. COBRAPE. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/user.php?xoops_redirect=%2Fmodules%2Fconteudo%2Fconteudo.php%3Fconteudo%3D311>.

PARANÁ ÁGUAS PARANÁ. **Plano da Bacia Litorânea**. 2019. COBRAPE. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/user.php?xoops_redirect=%2Fmodules%2Fconteudo%2Fconteudo.php%3Fconteudo%3D311>.

PARANÁ COMPANHIA DE HABITAÇÃO DO PARANÁ. PEHIS – PR **Conceitos e orientações**. Disponível em: <<http://www.cohapar.pr.gov.br/PEHIS-PR-Conceitos-e-Orientacoes>>.

PARANÁ COPEL. **Central de Resultados**, 2021.

PARANÁ ESTADO DO PARANÁ. ano de Bacia Hidrográfica Litorânea (PBHL), de 2019.

PARANÁ ESTADO DO PARANÁ. **ATLAS DE ENERGIA SOLAR DO ESTADO DO PARANÁ**. 2020.

PARANÁ ESTADO DO PARANÁ. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. 2005.

PARANÁ ESTADO DO PARANÁ. Plano de Bacia Hidrográfica Litorânea (PBHL), de 2019;

PARANÁ ESTADO DO PARANÁ. Plano de Desenvolvimento Sustentável Litoral (PDS Litoral), de 2018;

PARANÁ ESTADO DO PARANÁ. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Paraná (PERS-PR), de 2018;

PARANÁ ESTADO DO PARANÁ. Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMA) do Estado do Paraná - Mosaico Lagamar, de 2020;

PARANÁ ESTADO DO PARANÁ. Zoneamento Ecológico Econômico do Litoral do Paraná (ZEE-PR Litoral) de 2016.

PARANÁ IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas climáticas do estado do Paraná. Folha: Guarapuava/PR, 2020.

PARANÁ IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas de solos do estado do Paraná. Folhas 504 e 505 (1:250.000). Paraná, 2008.

PARANÁ INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Mapa de Uso e Cobertura do Solo do Paraná**. 2020. Disponível em <http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/DADOS%20ESPACIAIS/Instrucoes_

PARANÁ INSTITUTO ÁGUAS DO PARANÁ. **Carta das Águas Subterrâneas do Paraná**. Curitiba, 2015. Disponível em <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/PUBLICACOES/LivroR5.pdf>>.

PARANÁ INSTITUTO ÁGUAS DO PARANÁ. **Outorgas emitidas**. Dados de outorga do Estado do Paraná. Curitiba, 2020. Disponível em <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=79> >.

PARANÁ INSTITUTO ÁGUAS DO PARANÁ. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Paraná**. Curitiba, 2010. Disponível em < www.suderhsa.pr.gov.br >. Acesso em 20 abr. 2020.

PARANÁ Paranaguá Saneamento S.A. (PSSA). **Relatório do sistema de tratamento de esgotos no município de Paranaguá**.

PARANÁ PREFEITURA MUNICIPAL DE PARANAGUÁ. **Plano Diretor Do Município de Paranaguá**.

PARANÁ PREFEITURA MUNICIPAL DE PARANAGUÁ. **Plano Municipal de Saneamento Básico, 2021**.

PARANÁ SANEPAR. <https://site.sanepar.com.br/>,2021

PEARCE, M. **Novel Findings in Desalination**. Desalination, 360, 13-18, 2015.

PERRONI, B. L. T.; CARVALHO, J. A. de; FARIA, A. C. **Velocidade Econômica de Escoamento e Custos de Energia de Bombeamento**.

PERUZZO, T. M.; CANTO, E. L. do. **Phenomena: The path to generalizations** [Linguistik Aktuell], ed. Lorie Heggie and Francisco Ordóñez. Amsterdam: John Benjamins.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. 2.ed. Madrid: Editorial Española S.A., 1985.

POLETTO FILHO, J. A. **Viabilidade energética e econômica da incineração de resíduo sólido urbano considerando a segregação para reciclagem**, 2008.

R. RA'EGA, Curitiba, n. 4, p. 111-130. 2000. Editora da UFPR. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/3343>>.

Relatório ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). 2005. Resolução 357 do CONAMA de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

Revista Galileu Online:http://galileu.globo.com/edic/119/rep_agua5.htm. Acessado em 09.outubro.2020

Revista Gestão, Tecnologia e Inovação: <http://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n1/Artigo3-n1-Robson.pdf> . Acessado em 09outubro.2020

REZAC, M. 2004. The Czech agreeing expletive and the theory of strong agreement. Ms.,

REZAC, M. Forthcoming a. The syntax of clitic climbing in Czech. In Clitic ordering

REZAC, M. Forthcoming b. The EPP in Breton: An uninterpretable categorial feature.

REZAC, M. In preparation a. φ -Agree in Basque.

REZAC, M. In preparation b. NP-movement in Breton. Ms., University of Toronto.

REZAC, M. In preparation c. An appositive analysis of clitic doubling. Ms., University of Toronto.

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHAL, A.M. **The use of saline water for crop production**. Rome: FAO, 133p. (FAO:Irrigation and Drainage Paper, 48), 1992.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington D.C.: U.S. Salinity Laboratory. 160p. (USDA. Agriculture Handbook, 60), 1954.

RIGATO, P. C. **Estudo da composição da alimentação de um incinerador rotativo de resíduos visando aumento da capacidade operacional**, 2008.

RIO GRANDE DO NORTE SERHID – Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. (Relatório Técnico), 2003. FEITOSA, E.C. O aquífero Jandaíra no município de Baraúna/ RN – Atualização dos conhecimentos. Secretaria de Recursos Hídricos do

Rio Grande do Norte (SERHID) Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE (FADE), Natal, RN, 1994.

SADI, M.; ARABKOOHSAR, A. **Exergy economic Analysis of a Combined Solar-waste Driven Power**, 2019. Renewable Energy, Elsevier, vol. 141(C), pages 883-893.

SADI, M.; ARABKOOHSAR, A. **Modelling and Analysis of a Hybrid Solar Concentrating-Waste Incineration Power Plant**, 2019.

SANTOS, J. J. **Avaliação Exergo-econômica das tecnologias para a Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada**, 2005.

SÃO PAULO (MUNICÍPIO) SABESP.

SHAPIRO; MORAN. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Fifth Edition, 2006.

SHARQAWY, M. H.; LIENHARD, J. H. V.; ZUBAIR S. M. **Thermophysical Properties of Seawater: A Review of Existing**, 2009.

SHEMER, H.; SEMIAT, R. **Sustainable RO Desalination – Energy Demand and Environmental Impact**, 2017. Desalination 424:10-16

SUAREZ, D.L. **Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters**. Soil Sci. Soc. Amer. J., n.45, p.469-75, 1981.

TAKAKI, A. T. **Análise do aproveitamento do gás natural em plantas de cogeração e trigerção de energia em indústrias frigoríficas**, 2006. xviii, 159 f. de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

TORRI, J. B. **Dessalinização de água salobra e/ou salgada: métodos, custos e aplicações**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Brasil, 2015.

Triggers, ed. Henk van Riemsdijk and Anne Breitbarth. Berlin: Mouton de Gruyter.

TUNA, C. E. **Análise exérgica e termoeconomia: sistematização crítica da produção científica**. 2019. 80 f. Tese (Livre-docência) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/190891>>.

UCHE, J. **Comparison of heat transfer coefficient correlations for thermal desalination units**, 2003.

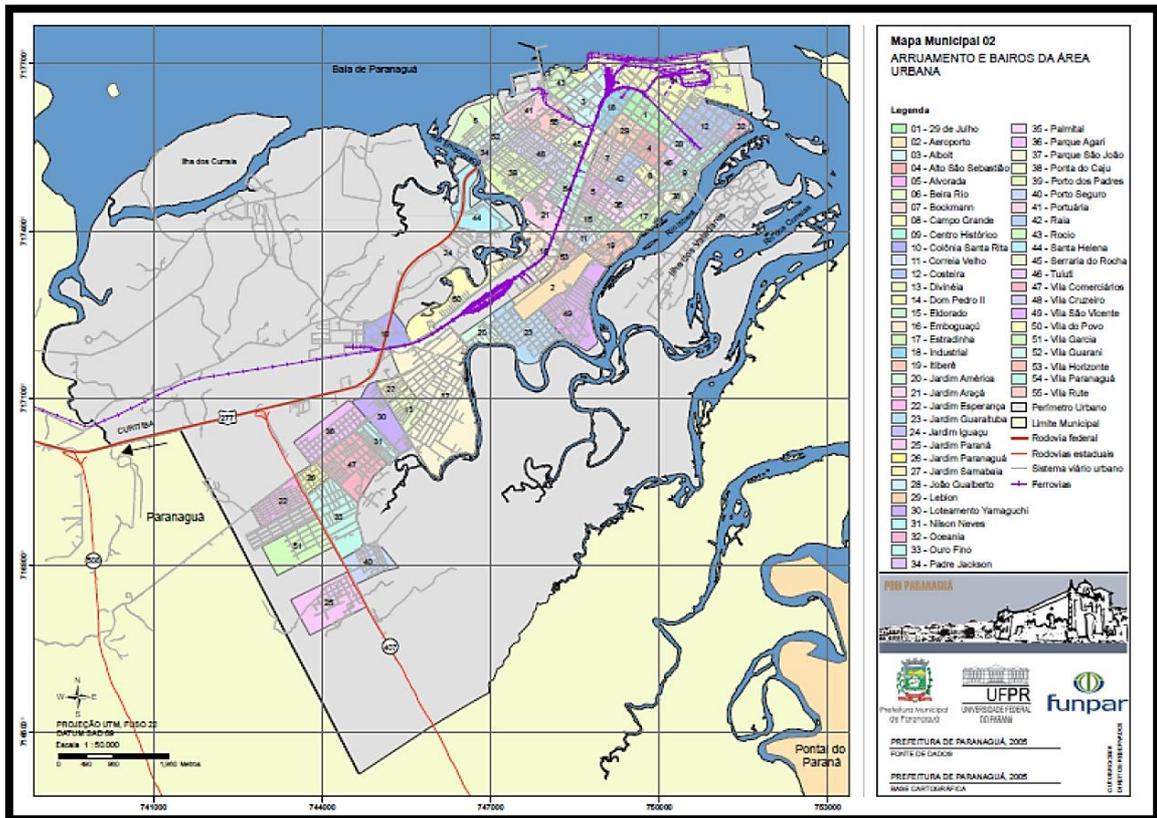
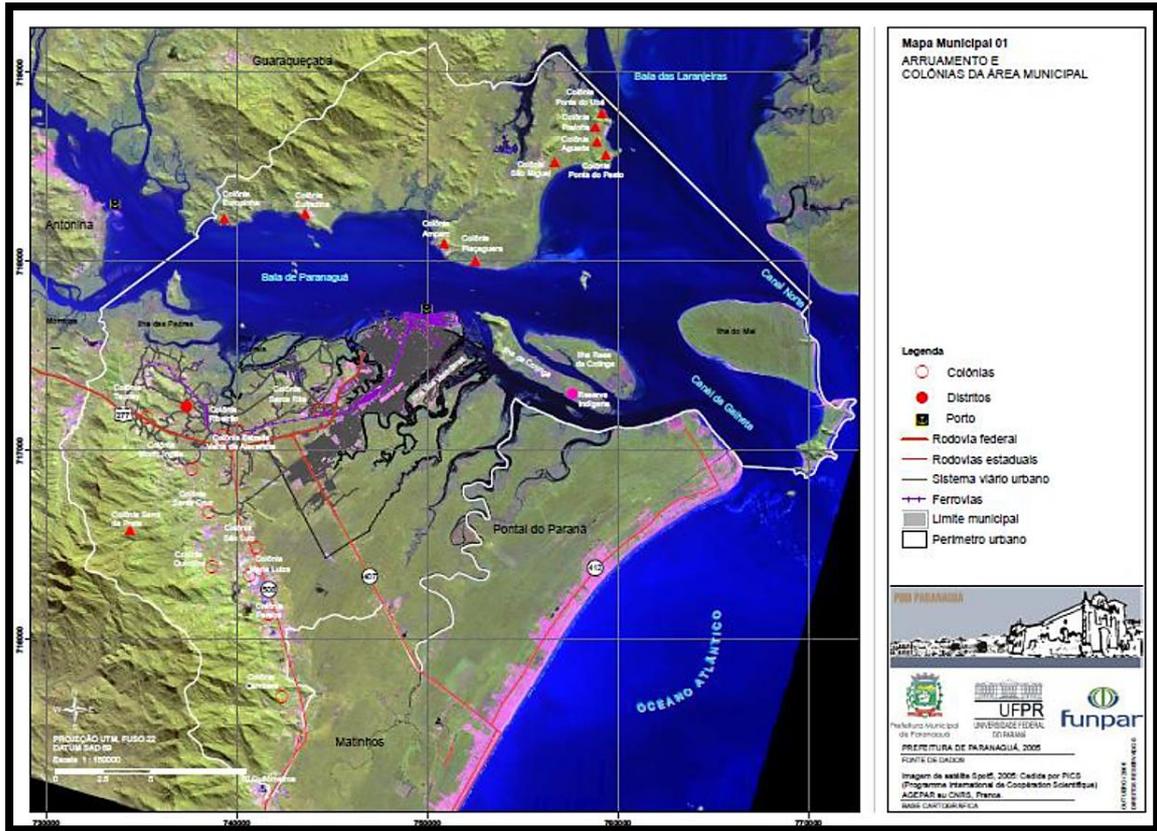
VILLALOBOS, J. U. **A Preservação da Paisagem: A hidrelétrica da serra da prata**. Paranaguá, Paraná, Brasil. V Simposio Internacional de la Historia de la Electrificación, 2019.

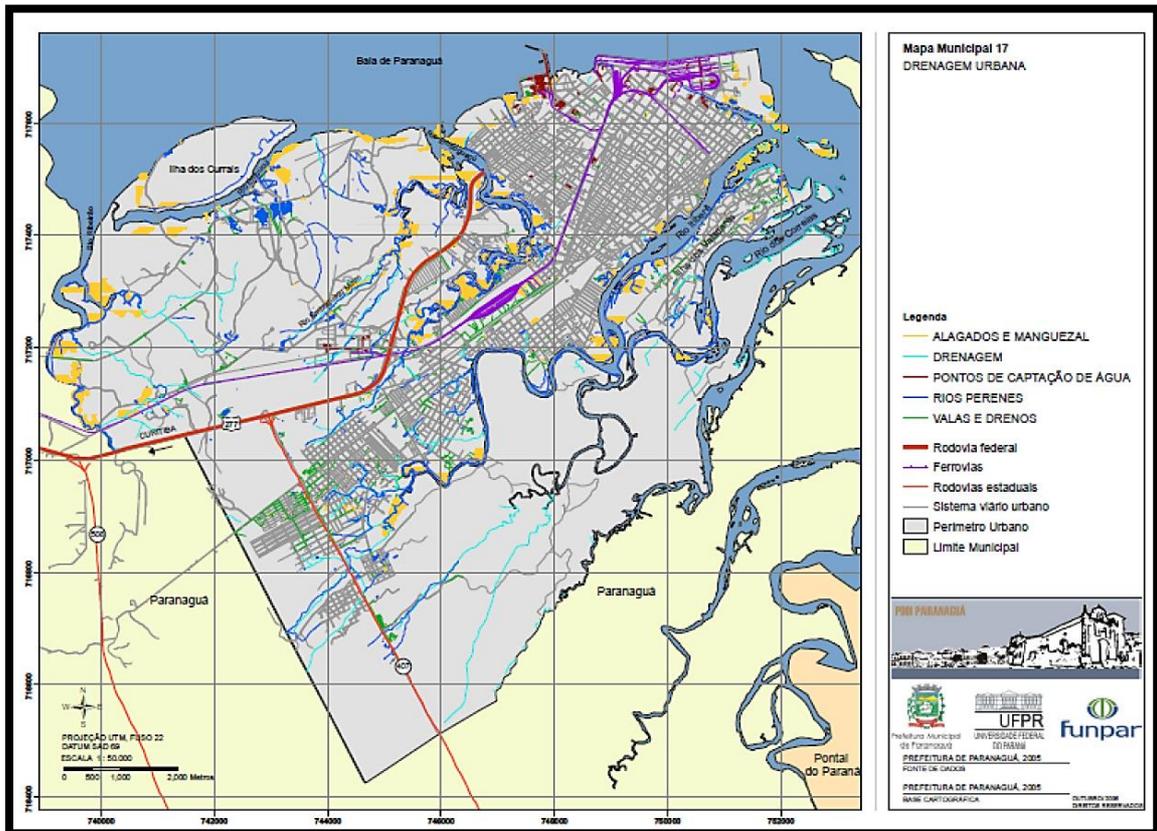
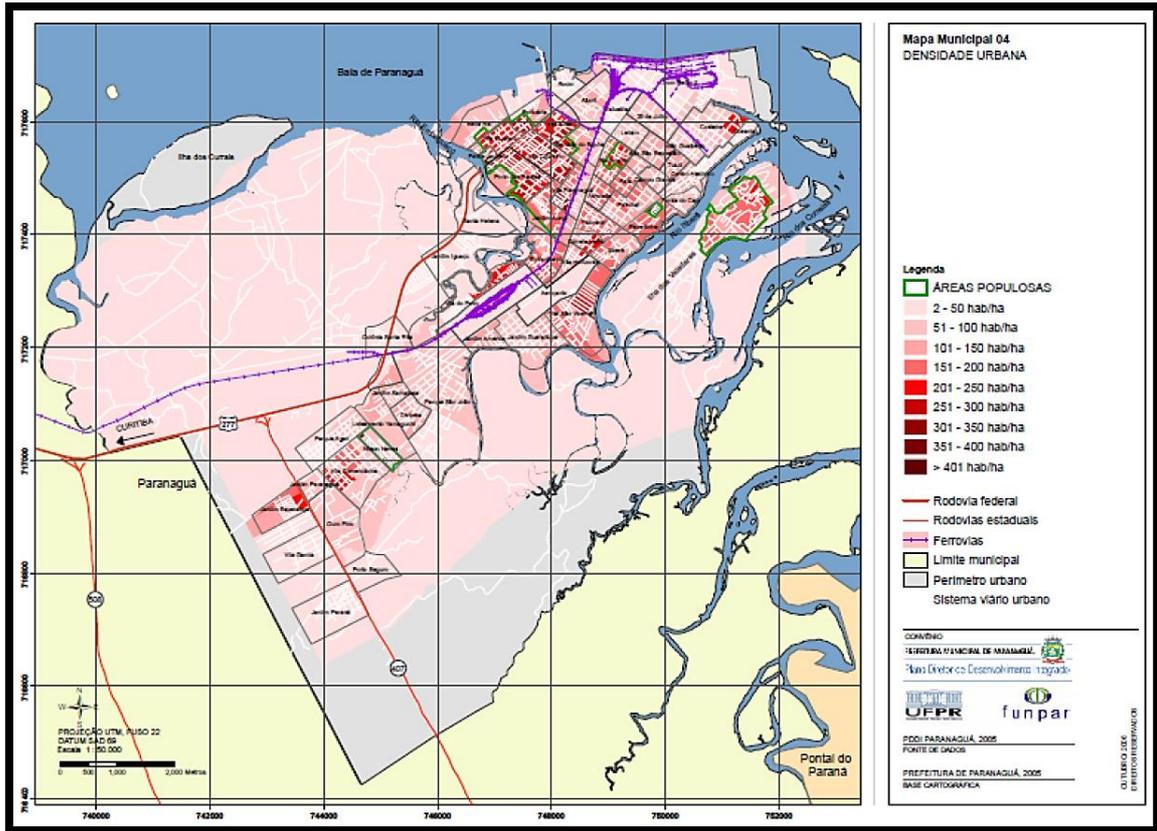
WHO (2007) **Desalination for Safe Water Supply**.
http://www.who.int/water_sanitation_health/gdwqrevision/desalination.pdf

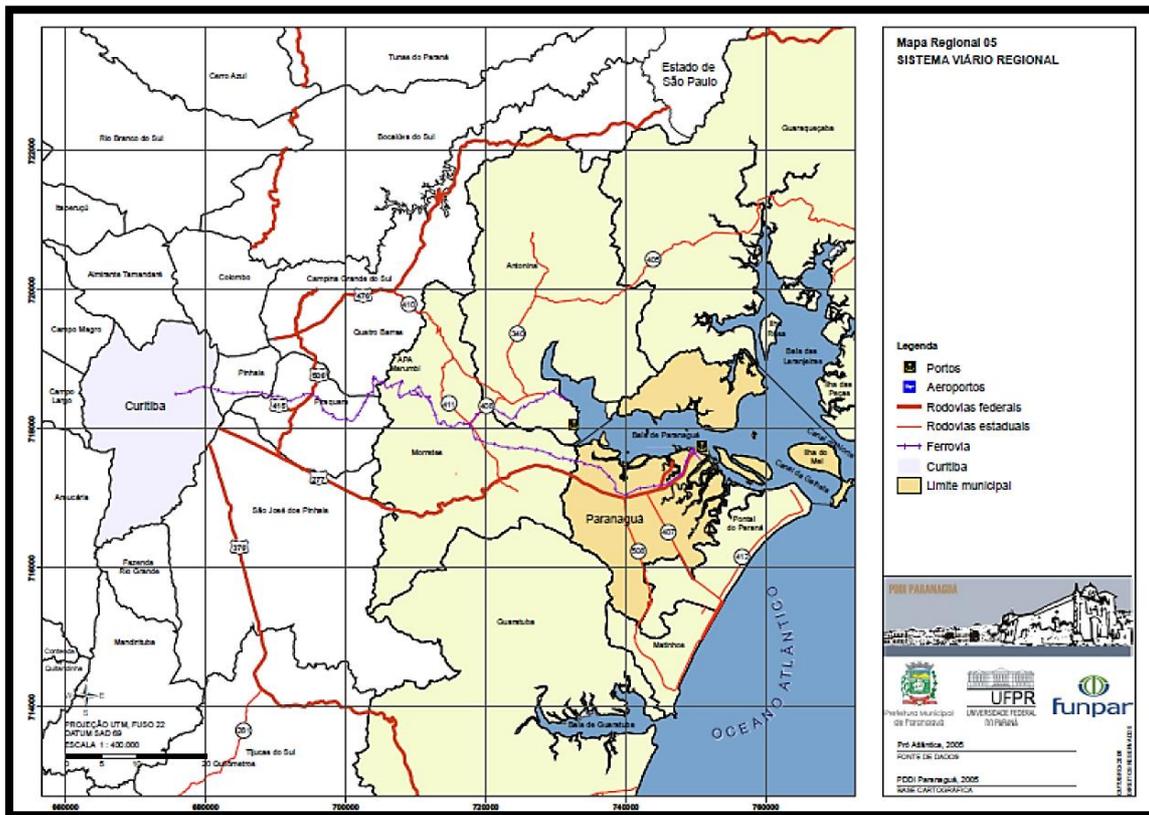
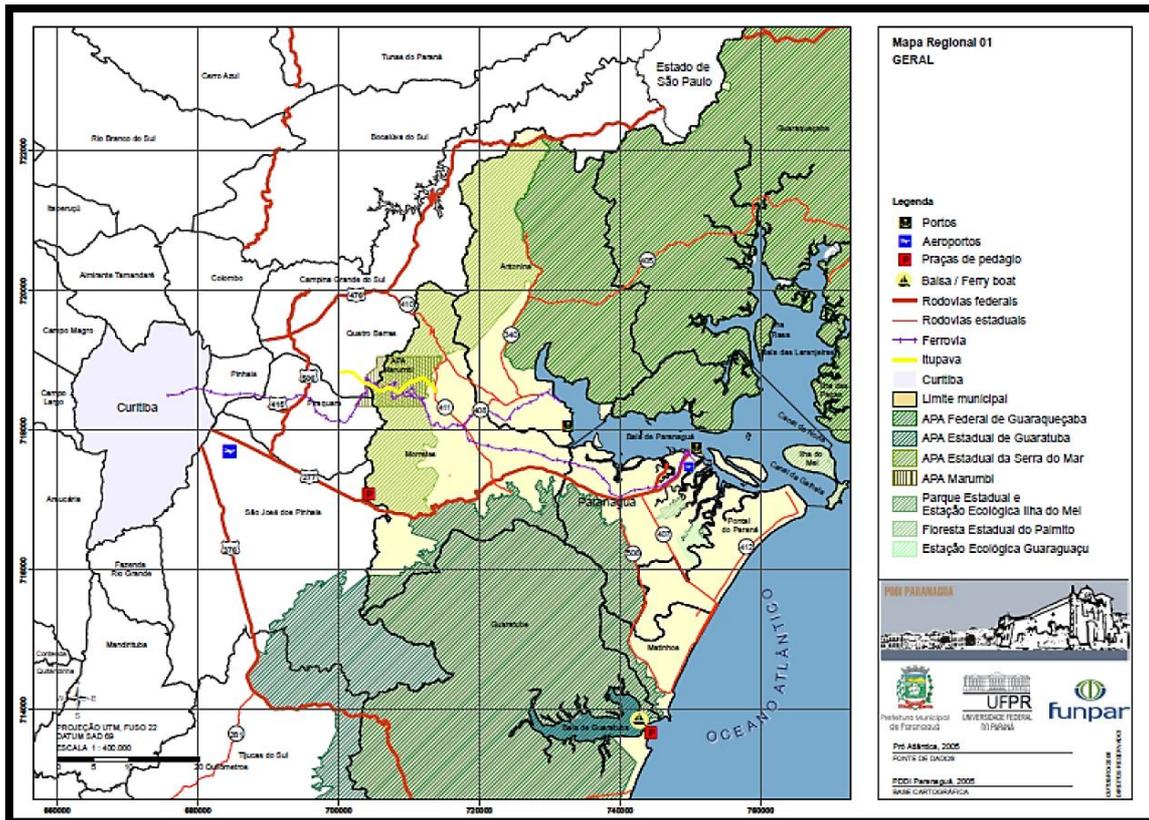
WWF Brasil, 2022.

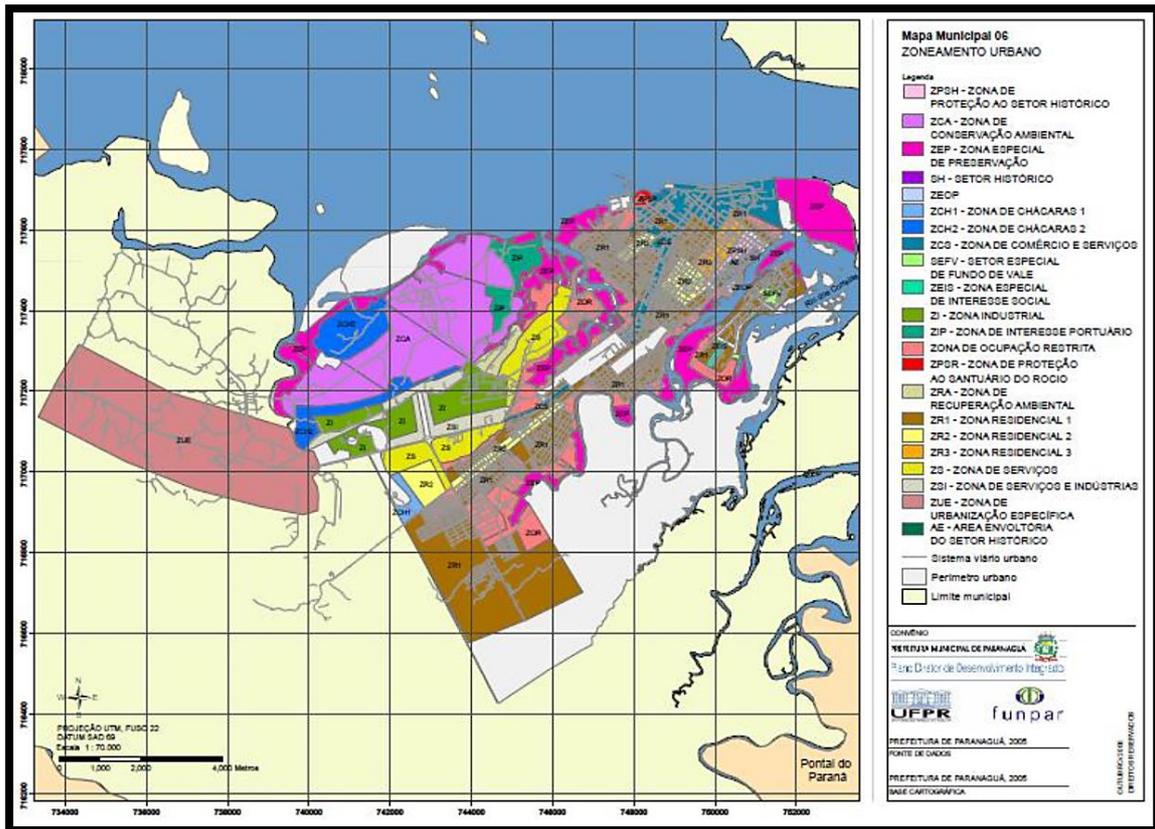
YOUNOS T.; TULOU K. E. Overview of Desalination Techniques. Journal of Contemporary Water Research & Education Issue, p 3-10. Universities Council on Water Resources, Dezembro, 2005.

YUNUS C. Exergy Analysis of a Reverse Osmosis Desalination Plant, 2002. Desalination. Volume 142, Issue 3, 1 March 2002, Pages 257-266









7.2 Códigos *Interactive Thermodynamics* V3.1 para os Volumes de Controle

// Volume de Controle 3 Gerador de Vapor (Boiler) Aporte RSU

// CONSIDERAÇÕES

// Trabalho 3 Nulo

W3 = 0

// Temperatura Ambiente

Tamb = 296.00 // °K

// Conservação da Massa m4 = m1

// Temperatura da Chama

Tc = 1088.70 // K

// Aporte Planta de Incineração de RSU

$$Q3 = (14313.2513) * 0.85 \text{ // kJ/s}$$

$$Q3R = 14313.2513 \text{ // kJ/s}$$

//ENTRADAS

//Estado 4

$$p4 = 10000.00 \text{ // kPa}$$

$$T4 = 388.25 \text{ // K}$$

$$h4 = h_PT(\text{"Water/Steam"}, p4, T4)$$

$$s4 = s_PT(\text{"Water/Steam"}, p4, T4)$$

$$x4 = x_hP(\text{"Water/Steam"}, h4, p4)$$

//SAÍDAS

//Estado 1

$$p1 = 10000.00 \text{ // kPa}$$

$$T1 = 773.20 \text{ // K}$$

$$h1 = h_PT(\text{"Water/Steam"}, p1, T1)$$

$$s1 = s_PT(\text{"Water/Steam"}, p1, T1)$$

$$x1 = x_hP(\text{"Water/Steam"}, h1, p1)$$

//BALANÇOS

$$0 = Q3 - W3 + m4 * (h4 - h1) \text{ // Balanço de Energia}$$

$$Sger3 = m4 * (s1 - s4) - Q3R / Tc \text{ // Balanço de Entropia}$$

// Volume de Controle 3 Gerador de Vapor (Boiler) Aporte PTC

// CONSIDERAÇÕES

```
// Trabalho 3 Nulo
W3 = 0

//Temperatura Ambiente
Tamb = 296.00 // °K

// Conservação da Massa m4 = m1
//Temperatura da Chama
Top = 793.00 // K

// Aporte Planta de Incineração de RSU
Q3 = (14313.2513)*0.85 // kJ/s
Q3R = 14313.2513 // kJ/s

//ENTRADAS

//Estado 4
p4 = 10000.00 // kPa
T4 = 388.25 // K
h4 = h_PT("Water/Steam", p4, T4)
s4 = s_PT("Water/Steam", p4, T4)
x4 = x_hP("Water/Steam", h4, p4)

//SAÍDAS

//Estado 1
p1 = 10000.00 // kPa
T1 = 773.20 // K
h1 = h_PT("Water/Steam", p1, T1)
s1 = s_PT("Water/Steam", p1, T1)
x1 = x_hP("Water/Steam", h1, p1)
```

//BALANÇOS

$0 = Q3 - W3 + m4 \cdot (h4 - h1)$ // Balanço de Energia

$S_{ger3} = m4 \cdot (s1 - s4) - Q3R/Top$ // Balanço de Entropia

// Volume de Controle 4 Turbina a Vapor de Contrapressão e Gerador

// CONSIDERAÇÕES

// Calor em 4 é Desprezado

$Q4 = 0$ // kJ/kg

//Temperatura Ambiente

$T0 = 296.00$ // K

// Conservação da Massa $m1 = m2$

$m1 = 4.2090$ // kg/s

//ENTRADAS

//Estado 1

$p1 = 10000.00$ // kPa

$T1 = 773.20$ // K

$h1 = h_PT("Water/Steam", p1, T1)$

$s1 = s_PT("Water/Steam", p1, T1)$

$x1 = x_hP("Water/Steam", h1, p1)$

//SAÍDAS

//Estado 2

p2 = 260.00 // kPa

T2 = 420.15 // K

h2 = h_PT("Water/Steam", p2, T2)

s2 = s_PT("Water/Steam", p2, T2)

x2 = x_hP("Water/Steam", h2, p2)

//BALANÇOS

0 = Q4 - W4 + m1*(h1 - h2) // Balanço de Energia

Sger4 = m1*(s2 - s1) - Q4/T1 // Balanço de Entropia

// Volume de Controle 6 Bomba de Condensado e Motor

// CONSIDERAÇÕES

// Calor em 6 é desprezado

Q6 = 0 // kJ/kg

//Temperatura Ambiente

T0 = 296.00 // K

// Conservação da Massa m3 = m4

m3 = 4.2090 // kg/s

//ENTRADAS

//Estado 3

p3 = 224.0000 // kPa

T3 = 388.15 // K

h3 = h_PT("Water/Steam", p3, T3)

s3 = s_PT("Water/Steam", p3, T3)

x3 = x_hP("Water/Steam", h3, p3)

$v3 = v_PT(\text{"Water/Steam"}, p3, T3)$

//SAÍDAS

//Estado 4

$p4 = 10000.0000$ // kPa

$T4 = 388.25$ // K

$h4 = h_PT(\text{"Water/Steam"}, p4, T4)$

$s4 = s_PT(\text{"Water/Steam"}, p4, T4)$

$x4 = x_hP(\text{"Water/Steam"}, h4, p4)$

//BALANÇOS

$S_{ger6} = m3*(s4 - s3) - Q6/T4$ // Balanço de Entropia

$W6 = -m3*v3*(p4-p3)$

$W6r = W6/0.85$

// Volume de Controle 7 Bomba de Água do Mar e Motor

// CONSIDERAÇÕES

// Calor em 7 é Desprezado

$Q7 = 0$ // kJ/kg

//Temperatura Ambiente

$T0 = 296.00$ // K

// Conservação da Massa $m12 = m13$

$m12 = 516.07$ // kg/s

// $m12$ trazida por 12 km a pressão $p12$ - Demanda de Potência 18.99 kJ/s

//ENTRADAS

//Estado 12

$p_{12} = 100.00$ // kPa

$T_{12} = 296.00$ // K

$h_{12} = h_{PT}(\text{"Water/Steam"}, p_{12}, T_{12})$

$h_{sw12} = 90.1241$ // kJ/kg

$ssw_{12} = 0.3157$ // kJ/kgK

$x_{12} = x_{hP}(\text{"Water/Steam"}, h_{12}, p_{12})$

$v_{sw12} = 0.000976$

//SAÍDAS

//Estado 13

$p_{13} = 101.00$ // kPa

$T_{13} = 296.01$ // K

$h_{13} = h_{PT}(\text{"Water/Steam"}, p_{13}, T_{13})$

$h_{sw13} = 9.1251$ // kJ/kg

$ssw_{13} = 0.3159$ // kJ/kgK

$x_{13} = x_{hP}(\text{"Water/Steam"}, h_{13}, p_{13})$

//BALANÇOS

$W_7 = m_{12} * v_{sw12} * (p_{13} - p_{12})$

$W_{7r} = W_7 / 0.85$

$S_{ger7} = m_{12} * (ssw_{13} - ssw_{12}) - Q_7 / T_{12}$ // Balanço de Entropia

// Volume de Controle 5 Unidade MSF

// CONSIDERAÇÕES

//Troca de Calor com o Entorno Nula

Q5 = 0 // kJ/s

//Temperatura Ambiente

T0 = 296.00 // °C

//TBT (Top Brine Temperature)

TBT = 383.15 // K

// Conservação da Massa m2 = m3 e m14 = m16 + m17

m2 = 4.2090 // kg/s

m3 = 4.2090 // kg/s

// As capacidades térmicas, entalpia específica e propriedades físicas para água do mar e salmoura são funções de temperatura e salinidade.

//ENTRADAS

//Estado 2

p2 = 260.00 // kPa

T2 = 420.15 // K

h2 = h_PT("Water/Steam", p2, T2)

s2 = s_PT("Water/Steam", p2, T2)

x2 = x_hP("Water/Steam", h2, p2)

//Estado 14

p14 = 101.00 // kPa

T14 = 296.01 // K

h14 = h_PT("Water/Steam", p14, T14)

hsw14 = 90.1251 // kJ/kg

s14 = s_PT("Water/Steam", p14, T14)

ssw14 = 0.3159 // kJ/kgK

x14 = x_hP("Water/Steam", h14, p14)

//SAÍDAS

//Estado 3

p3 = 224.00 // kPa

T3 = 388.15 // K

h3 = h_PT("Water/Steam", p3, T3)

s3 = s_PT("Water/Steam", p3, T3)

x3 = x_hP("Water/Steam", h3, p3)

//Estado 16

p16 = 101.00 // kPa

T16 = 296.01 // K

h16 = h_PT("Water/Steam", p16, T16)

s16 = s_PT("Water/Steam", p16, T16)

x16 = x_hP("Water/Steam", h16, p16)

//Estado 17

p17 = 101.00 // kPa

T17 = 305.21 // K

h17 = h_PT("Water/Steam", p17, T17)

hb17 = 121.5969 // kJ/kg

s17 = s_PT("Water/Steam", p17, T17)

sb17 = 0.4641 // kJ/kgK

x17 = x_hP("Water/Steam", h17, p17)

//EQUAÇÕES AUXILIARES

// GOR 10

m16 = m2*10

m14 = m16 + m17

// Trabalho 5 Demanda de Potência Elétrica Pel - Consumo Elétrico 3 kWh/m³

W5T = -454.572 // kJ/s

$$W5U = W5T * 0.85$$

//BALANÇOS

$$0 = Q5 - W5U + m2 * h2 + m14 * hsw14 - m3 * h3 - m16 * h16 - m17 * hb17 // \text{Balanço de Energia}$$

$$Sger5 = m3 * s3 + m16 * s16 + m17 * sb17 - m2 * s2 - m14 * ssw14 - Q5 / T2 // \text{Balanço de Entropia}$$

// Volume de Controle 8 Unidade RO

// CONSIDERAÇÕES

// Troca de Calor em 8 Nula

$$Q8 = 0$$

//Temperatura Ambiente

$$T0 = 296.00 // \text{°C}$$

// As capacidades térmicas, entalpia específica e propriedades físicas para água do mar e salmoura são funções de temperatura e salinidade.

//Salinidade Final 65‰ de água volta como salmoura e a salinidade da água bruta 35.000 ppm então salinidade da salmoura é 65.000 ppm

//ENTRADAS

//Estado 15

$$p15 = 101.00 // \text{kPa}$$

$$T15 = 296.0100 // \text{K}$$

$$h15 = h_PT(\text{"Water/Steam"}, p15, T15)$$

$$hsw15 = 90.1251 // \text{kJ/kg}$$

$$s15 = s_PT(\text{"Water/Steam"}, p15, T15)$$

$$ssw15 = 0.3159 // \text{kJ/kgK}$$

$$x15 = x_hP(\text{"Water/Steam"}, h15, p15)$$

//SAÍDAS

//Estado 18

$p_{18} = 101.00$ // kPa

$T_{18} = 296.01$ // K

$h_{18} = h_{PT}(\text{"Water/Steam"}, p_{18}, T_{18})$

$s_{18} = s_{PT}(\text{"Water/Steam"}, p_{18}, T_{18})$

$x_{18} = x_{hP}(\text{"Water/Steam"}, h_{18}, p_{18})$

//Estado 19

$p_{19} = 101.00$ // kPa

$T_{19} = 296.01$ // K

$h_{19} = h_{PT}(\text{"Water/Steam"}, p_{19}, T_{19})$

$h_{b19} = 85.8222$ // kJ/kg

$s_{19} = s_{PT}(\text{"Water/Steam"}, p_{19}, T_{19})$

$s_{b19} = 0.3474$ // kJ/kgK

$x_{19} = x_{hP}(\text{"Water/Steam"}, h_{19}, p_{19})$

//EQUAÇÕES AUXILIARES

// Trabalho 5 Demanda de Potência Elétrica Pel - Consumo Elétrico 3 kWh/m³

$W_{8T} = -454.572$ // kJ/s

$W_{8U} = W_{8T} * 0.85$

// Massa

$m_{15} = m_{18} + m_{19}$

$m_{18} = m_{15} * 0.77$

//BALANÇOS

$0 = Q_8 - W_{8U} + m_{15} * h_{sw15} - m_{18} * h_{18} - m_{19} * h_{b19}$ // Balanço de Energia

$$S_{ger8} = m_{18} \cdot s_{18} + m_{19} \cdot s_{b19} - m_{15} \cdot s_{sw15} - Q_8/T_{15} \quad // \text{ Balanço de Entropia}$$