UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL

FILIPE MARQUES PAES DA COSTA

INSTALAÇÃO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA UNIDADE DE DESSORÇÃO TÉRMICA ATRAVÉS DE ECOINDICADORES PARA TRATAMENTO DE SOLOS CONTAMINADOS COM HIDROCARBONETOS E/OU ORGANOCLORADOS

NITERÓI

FILIPE MARQUES PAES DA COSTA

"INSTALAÇÃO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA UNIDADE DE DESSORÇÃO TÉRMICA ATRAVÉS DE ECOINDICADORES PARA TRATAMENTO DE SOLOS CONTAMINADOS COM HIDROCARBONETOS E/OU ORGANOCLORADOS"

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação – Mestrado Profissional em Montagem Industrial – da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Montagem Industrial.

ORIENTADOR

Prof. Dr. DIEGO MARTINEZ PRATA

Prof. Dr. LIZANDRO DE SOUSA SANTOS

NITERÓI

2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE

C837i	Costa, Filipe Marques Paes da Instalação, simulação e otimização de uma Unidade de Dessorção Térmica através de Ecoindicadores para tratamento de solos contaminados com hidrocarbonetos e/ou organoclorados / Filipe Marques Paes da Costa; Diego Martinez Prata, orientador; Lizandro de Sousa Santos, coorientador. Niterói, 2018. 245 f.
	Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.
	 Simulação. 2. Indicador ambiental . 3. Dessorção térmica . 4. Licença ambiental . 5. Produção intelectual. Título II. Prata,Diego Martinez, orientador. III. Santos, Lizandro de Sousa, coorientador. IV. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia.
	CDD -

Bibliotecária responsável: Fabiana Menezes Santos da Silva - CRB7/5274

FILIPE MARQUES PAES DA COSTA

INSTALAÇÃO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA UNIDADE DE DESSORÇÃO TÉRMICA ATRAVÉS DE ECOINDICADORES PARA TRATAMENTO DE SOLOS CONTAMINADOS COM HIDROCARBONETOS E/OU ORGANOCLORADOS

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração Montagem Industrial.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Diego Marting hafa Prof. Dr. Diego Martinez Prata - Presidente - Orientador

Prof. Dr. Diego Martinez Prata - Presidente - Orientador Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Lizandro de Souza Santos - Orientador Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes Universidade Federal Fluminense

Prof^a Dra. Michelle Gonçalves Mothé Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Ph. D. Roger Matsumoto Moreira Universidade Federal Fluminense

Niterói, RJ 2017

AGRADECIMENTO

Este trabalho foi fruto de muito esforço e entrega, com um misto de sentimentos, de dever cumprido e orgulho a fim de poder atestar e até viabilizar a montagem e instalação desses tipos de planta no Brasil. Agradeço imensamente a Universidade Federal Fluminense com todo seu corpo técnico de professores e funcionários, assim como estrutura. A UFF faz parte da minha vida desde a graduação e possibilitou o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Por isso sempre vou leva-la com muito carinho no coração.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Valéria e Rivaldo, avós e padrinhos Irani e Aguinaldo por me darem todo o suporte para o crescimento e educação. Vocês sempre buscaram me dar tudo o que não tiveram acesso na vida, sempre me incentivando a buscar um algo a mais, sem deixar me acomodar, sendo os maiores responsáveis por tudo que conquistei até hoje.

Meu agradecimento especial é para Amanda Alfradique de Faria, minha namorada e Companheira de vida. Posso dizer que sem seu incentivo, cobrança e força para continuar, eu não teria terminado esse Mestrado. Você mudou minha vida e tenho certeza que você está muito orgulhosa disso. Essa conquista é nossa. Uma lembrança especial também para toda sua família que sempre me recebeu com carinho desde que estamos juntos.

Tenho de agradecer imensamente aos meus orientadores. Lizandro, obrigado pela paciência demonstrada durante esse período e por sempre estar disposto a me orientar mesmo após o tempo que estive distante. Diego, desde a graduação sempre com um talento e dedicação rara para lecionar, sinceridade para criticar ou elogiar. Desde o início não tive dúvidas em escolhê-lo para essa orientação. 3D's *forever* foi meu maior aprendizado com você.

Não posso deixar de lembrar da Essencis Soluções Ambientais, na figura de seus gestores, pela liberação do tempo para dedicação a essa tese e do acervo técnico disponibilizado.

E por fim, gratidão aos meus bons amigos. Vocês fazem parte dessa vitória.

Filipe Marques Paes da Costa

RESUMO

O presente trabalho apresenta problemas de tratamento de solos contaminados no Brasil por hidrocarbonetos e organoclorados como passivos muitas vezes não remediados pois não se encontram soluções técnicas com custo-benefício aceitável para o tratamento. Nesse conceito, listou-se exemplos de tecnologias existentes focando no tratamento por dessorção térmica por ser um tema pouco abrangente e estudado no Brasil, mas com eficiência comprovada no mundo. Com isso apresenta-se um resumo das etapas a serem cumpridas para o licenciamento e a montagem desse tipo de planta no Brasil. A fim de atestar a viabilidade técnica através de dados reais simulou-se uma Unidade de Dessorção Térmica específica no software Maple variando os parâmetros físico-químicos que mais influenciam o desempenho do tratamento, ou seja, a concentração de contaminante e o teor de umidade. A partir de uma simulação por balanços de massa e energia, se obteve dados de ecoindicadores ambientais, sendo esses o consumo de combustível, a emissão de CO₂ e o consumo de água. A partir da avaliação desses dados sugeriu-se a instalação de um equipamento de reaproveitamento energético na planta afim de minimizar os Impactos ambientais da planta, sendo instalada uma camisa de troca térmica no forno rotativo. Os dados gerados antes e depois da melhoria de processo foram analisados através de gráficos e de uma metodologia de construção de ecoindicadores com foco em sustentabilidade. Os resultados mostram que a melhoria de processo sugerida possibilitou uma redução no consumo de combustível, na emissão de CO₂ e no consumo de água, quando comparadas para as mesmas premissas de contaminação e teor de umidade de solo. Além disso, através da metodologia ICE – Índice de Comparação de Ecoindicadores – o processo modificado mostrou-se 45,0131% mais ecoeficiente. Logo, a utilização dessa tecnologia apresentou-se viável tecnicamente para a resolução de passivos vistos sem solução no Brasil, agregando valor ao processo.

Palavras-Chave: Dessorção Térmica, Simulação de Processos, Solos Contaminados, Ecoindicadores, Licenciamento Ambiental

ABSTRACT

The present work shows problems in the treatment of Brazilian soils contaminated by hydrocarbons and organochlorine as passive and most of the time not remedied due to the lack of technical solutions with the acceptable cost-benefit for the treatment. In this concept, it was listed examples of existent technology that focus on the treatment by thermal desorption since it's not a very comprehensive and studied subject in Brazil but it's efficiency is proved worldwide. Thereby is presented an abstract of the steps that must be followed for the licensing and assembly of this kind of plant in Brazil. In order to test it's technical viability through data, it was simulated a specific Thermal Desorption Unit in Maple software, varying the physicalchemical parameters that influence the performance of the treatment the most, considering the concentration of the contaminant and the moisture content. From a mass and energy balance simulation, it was obtained environmental ecoindicators data, such as: the fuel consumption, the CO₂ emission and the water consumption. From the analysis of this data, it is suggested the installation of an energy reuse equipment in the plant in order to minimize environmental impacts, installing a heat exchange sleeve on the rotating furnace. The before and after the improvement of the process generated data that where analyzed through graphics and through a construction methodology of ecoindicators that focus on sustainability. The results shows that the suggested improvement of the process made possible the reduction in the fuel and water consumption and in the CO₂ emission when compared with the same premises of contamination and moisture content. Furthermore, through the CIE - Comparison Index of Ecoindicators methodology, the modified process was 45.0131% more eco-efficient. Therefore, the use of this technology was proved technically viable for passives seen without solution in Brazil, adding value to the process.

Key-Words: Thermal Desorption, Process Simulation, Contaminated Soil, Ecoindicators, Environmental Licensing.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	p.35
1.1.CONTEXTO	p.35
1.2.MOTIVAÇÃO	p.37
1.3.OBJETIVO	p.38
1.4.ESTRUTURA	p.39
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	p.40
2.1. CONTAMINAÇÃO DE SOLO	p.41
2.1.1. Contaminantes orgânicos	p.42
2.1.2. Contaminantes inorgânicos	p.42
2.1.3. Casos graves de contaminação de solo no Brasil	p.43
2.1.3.1. Cidade dos Meninos	p.44
2.1.3.2. Caso Rhodia	p.46
2.1.4. Áreas contaminadas no estado do Rio de Janeiro	p.49
2.2. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS	p.52
2.2.1. Tratamento térmico	p.53
2.2.1.1. Métodos de Dessorção Térmica	p.55
2.2.1.2. Aplicação da Dessorção Térmica	p.55

2.2.1.3. Tipos de solos indicados para o tratamento em Unidades de Dessorção Térmica	p.58
2.2.1.4. Tempo de tratamento	p.59
2.2.1.5. Vantagens e desvantagens do tratamento por dessorção térmica	p.60
2.2.1.6. Cases de exemplo de tratamento de solos por dessorção térmica	p.61
2.2.1.7. Emissões atmosféricas	p.62
2.2.1.7.1. Formação de NO _x	p.62
2.2.1.7.2. Formação de SO _x	p.63
2.2.1.7.3. Emissões de Material Particulado	p.63
2.2.1.7.4. Emissões de CO	p.63
2.2.1.7.5. Emissão de Compostos Orgânicos	p.63
2.2.1.7.6. Emissões de Metais	p.64
2.2.1.8. Solo Tratado	p.65
2.2.1.8.1. Multidestinação:	p.65
2.2.1.8.2. Compactação	p.65
2.2.2. Remoção e redisposição do solo	p.65
2.2.3. Biorremediação	p.66
2.2.4. Fitorremediação	p.67
2.2.5. Oxidação química	p.67
2.3. LEIS E NORMAS AMBIENTAIS APLICÁVEIS	p.68
2.3.1. Normas aplicáveis para os padrões de emissão e licenciamento de plantas térmicas	p.72
2.3.2. Normas aplicáveis para os padrões de classificação de solo	p.75
2.4. ECOINDICADORES	p.77
2.4.1. Construção de ecoindicadores	p.78
CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE PROCESSO	p.83
3.1. MONTAGEM DA PLANTA	p.83

3.2. O PROCESSO DE TRATAMENTO	p.84
3.2.1. Fluxo do Solo	p.87
3.2.2. Fluxo do gás de exaustão	p.88
3.2.3. Fluxo de pó e água	p.89
3.2.4. Condições de Processo	p.89
3.2.5. Equipamentos principais do processo	p.90
3.2.5.1. Forno Rotativo	p.90
3.2.5.2. Forno de Pós-Combustão	p.91
3.2.6. Capacidade de tratamento da Unidade de acordo com o tipo de contaminação	p.92

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA	p.94
4.1. SIMULAÇÃO DA UNIDADE DE DESSORÇÃO TÉRMICA	p.95
4.1.1. Condições de processo	p.95
4.1.2. Balanço de massa e energia da Unidade	p.97
4.1.2.1. Forno rotativo	p.98
4.1.2.2. Trocador de calor	p.103
4.1.2.3. Forno de pós combustão	p.106
4.1.2.4. Resfriador	p.113
4.2. CÁLCULOS PARA REAÇÕES QUÍMICAS	p.115
4.2.1. Combustão do C_2Cl_6 (HCE)	p.116
4.2.1.1. Método 1: Energia de ligação – C ₂ Cl ₆	p.117
4.2.1.2. Método 2: Calor de formação – C_2Cl_6	p.117
4.2.2. Combustão do Diesel (C ₁₃ H ₂₈)	p.119
4.2.2.1. Método 1: Energia de ligação – $C_{13}H_{28}$	p.119
4.2.2.2. Método 2: Calor de formação – $C_{13}H_{28}$	p.120
4.3. DADOS PARA A SIMULAÇÃO	p.121

4.4. SIMULAÇÃO DA UNIDADE DE DESSORÇÃO TÉRMICA COM A MELHORIA DE PROCESSOS – UDT-CT	p.125
4.4.1. Condições de processo	p.125
4.4.2. Balanço de massa e energia da Unidade	p.127
4.4.2.1. Forno rotativo – UDT-CT	p.127
4.4.2.1.1. Camisa de troca térmica	p.128
4.4.2.2. Resfriador – UDT-CT	p.129
4.5. DESENVOLVIMENTO DE ECOINDICADORES	p.133
4.5.1. Construção do "RADAR"	p.133
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	p.137
5.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	p.138
5.1.1. Unidade de Dessorção Térmica Tradicional	p.138
5.1.1.1. Dados da simulação UDT - Tradicional	p.138
5.1.1.2. Gráficos da simulação da UDT	p.143
5.1.2. Unidade de Dessorção Térmica com Camisa de Troca Térmica	p.147
5.1.2.1. Dados da simulação da UDT-CT	p.147
5.1.2.2. Gráficos da simulação da UDT-CT	p.152
5.1.3. Comparação entre as Unidades de Dessorção térmica antes e depois da melhoria de processo	p.156
5.1.3.1. Dados comparados	p.156
5.1.3.2. Gráficos das comparações	p.163
5.1.3.2.1. Diesel:	p.164
5.1.3.2.2. Dióxido de Carbono – CO ₂ (g)	p.172
5.1.3.2.3. Água – H ₂ O(l)	p.181
5.1.3.2.4. Análise percentual da redução de consumo de diesel, emissão de CO ₂ e do consumo de água antes e após a melhoria apresentada	p.187
5.1.4. Comparativo econômico entre as Unidades de Dessorção Térmica antes e depois da melhoria de processo	p.188

5.1.4.1. Dados econômicos comparados	p.188
5.1.4.2. Gráficos de Comparação econômica	p.190
5.1.5. Dados de ecoindicadores	p.193
5.1.5.1. Gráficos do tipo radar	p.198
5.1.5.2. Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados	p.203
5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	p.206
5.2.1. Consumo de diesel	p.206
5.2.2. Quantidade de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel	p.208
5.2.3. Emissão de CO ₂	p.209
5.2.4. CO ₂ emitido por 1 kg de contaminante tratado	p.209
5.2.5. Consumo de água	p.210
5.2.6. Comportamento das reduções % de emissão de CO_2 e do consumo de diesel	p.211
5.2.7. Redução do custo com diesel	p.212
5.2.8. Análise de Ecoindicadores	p.213
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	p.221

APÊNDICE A – Códigos da simulação no Maplesoft antes e depois da melhoria de processo. p.228

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Mapa de áreas contaminadas no Estado do Rio de Janeiro em 2015 com foco na Região Metropolitana.	p.51
Figura 2.2	Sistema de alimentação dos fornos.	p.58
Figura 2.3	Organograma do SISNAMA no Estado do Rio de Janeiro.	p.69
Figura 2.4	Gráfico polígono de ecoindicadores, representado cinco indicadores normalizados.	p.80
Figura 2.5	Área de um dos cinco triângulos formados no polígono.	p.80
Figura 2.6	Representação da área resultante no gráfico radar.	p.81
Figura 3.1	Montagem e desmontagem da UDT.	p.84
Figura 3.2	Unidade de Dessorção Térmica.	p.85
Figura 3.3	Fluxograma de processo ilustrado da Unidade de Dessorção Térmica.	p.86
Figura 3.4	Fluxograma de processo ilustrado da Unidade de Dessorção Térmica.	p.87
Figura 4.1	Fluxograma de processo resumido da UDT.	p.95
Figura 4.2	Mapa dos tipos de solo no Brasil.	p.97
Figura 4.3	Fluxo de entrada e saída no forno rotativo.	p.98
Figura 4.4	Fluxo de entrada e saída do trocador de calor.	p.103
Figura 4.5	Fluxo de entrada e saída do Forno de Pós-Combustão.	p.106
Figura 4.6	Fluxo de entrada e saída no resfriador.	p.113
Figura 4.7	Fluxograma de processo resumido da UDT-CT.	p.126

Figura 4.8	Fluxo de entrada e saída no forno rotativo e da camisa de troca térmica da UDT-CT.	p.127
Figura 4.9	Fluxo de entrada e saída no resfriador da UDT-CT.	p.130
Figura 4.10	Gráfico "radar" de 3 ecoindicadores.	p.135
Figura 5.1	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de diesel.	p.143
Figura 5.2	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na emissão de $CO_{2(g)}$.	p.143
Figura 5.3	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de $H_2O_{(1)}$ para resfriamento.	p.144
Figura 5.4	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na quantidade de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel.	p.144
Figura 5.5	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na quantidade de CO_2 emitido por 1 kg de C_2Cl_6 destruído.	p.145
Figura 5.6	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na temperatura de saída do trocador de calor – corrente fria.	p.145
Figura 5.7	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de diesel no forno rotativo e no forno de pós-combustão.	p.146
Figura 5.8	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de diesel da UDT-CT.	p.152
Figura 5.9	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na emissão de $CO_{2(g)}$ da UDT-CT.	p.152
Figura 5.10	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de $H_2O_{(l)}$ para resfriamento da UDT-CT.	p.153
Figura 5.11	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na quantidade de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel da UDT-CT.	p.153
Figura 5.12	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na quantidade de CO_2 emitido por 1 kg de C_2Cl_6 destruído da UDT-CT.	p.154
Figura 5.13	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na temperatura de saída do trocador de calor – corrente fria – UDT-CT.	p.154
Figura 5.14	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de diesel no forno rotativo e no forno de pós-combustão na UDT-CT.	p.155

Figura 5.15	Comparação do impacto da concentração de C ₂ Cl ₆ no consumo de diesel para casos de 0% de umidade no solo contaminado.	p.164
Figura 5.16	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 0% de umidade no solo contaminado.	p.164
Figura 5.17	Comparação do impacto da concentração de C ₂ Cl ₆ no consumo de diesel para casos de 5% de umidade no solo contaminado.	p.165
Figura 5.18	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 5% de umidade no solo contaminado.	p.165
Figura 5.19	Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 no consumo de diesel para casos de 10% de umidade no solo contaminado.	p.166
Figura 5.20	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 10% de umidade no solo contaminado.	p.166
Figura 5.21	Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 no consumo de diesel para casos de 15% de umidade no solo contaminado.	p.167
Figura 5.22	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 15% de umidade no solo contaminado.	p.167
Figura 5.23	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 20% de umidade no solo contaminado.	p.168
Figura 5.24	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 20% de umidade no solo contaminado.	p.168
Figura 5.25	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo na redução do consumo de diesel.	p.169
Figura 5.26	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel para casos de 0% de umidade no solo contaminado.	p.169
Figura 5.27	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel para casos de 5% de umidade no solo contaminado.	p.170
Figura 5.28	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel para casos de 10% de umidade no solo contaminado.	p.170
Figura 5.29	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel para casos de 15% de umidade no solo contaminado.	p.171

Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de

Figura 5.30	C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel para casos de 20% de umidade no solo contaminado.	p.171
Figura 5.31	Impacto da concentração de contaminante e umidade no solo contaminado no ganho na massa de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel.	p.172
Figura 5.32	Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 0% de umidade no solo contaminado.	p.172
Figura 5.33	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 0% de umidade no solo contaminado	p.173
Figura 5.34	Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 5% de umidade no solo contaminado.	p.173
Figura 5.35	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 5% de umidade no solo contaminado.	p.174
Figura 5.36	Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 10% de umidade no solo contaminado.	p.174
Figura 5.37	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 10% de umidade no solo contaminado.	p.175
Figura 5.38	Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 15% de umidade no solo contaminado.	p.175
Figura 5.39	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 15% de umidade no solo contaminado.	p.176
Figura 5.40	Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 20% de umidade no solo contaminado.	p.176
Figura 5.41	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 20% de umidade no solo contaminado.	p.177
Figura 5.42	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$.	p.177
Figura 5.43	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído para casos de 0% de umidade no solo contaminado.	p.178
Figura 5.44	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído para casos de 5% de umidade no solo contaminado.	p.178

Figura 5.45	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído para casos de 10% de umidade no solo contaminado.	p.179
Figura 5.46	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído para casos de 15% de umidade no solo contaminado.	p.179
Figura 5.47	Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído para casos de 20% de umidade no solo contaminado.	p.180
Figura 5.48	Impacto da concentração de contaminante e umidade no solo contaminado na redução da massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído.	p.180
Figura 5.49	Comparação do impacto da concentração de C ₂ Cl ₆ no consumo de água para resfriamento para casos de 0% de umidade no solo contaminado.	p.181
Figura 5.50	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 0% de umidade no solo contaminado.	p.181
Figura 5.51	Comparação do impacto da concentração de C ₂ Cl ₆ no consumo de água para resfriamento para casos de 5% de umidade no solo contaminado.	p.182
Figura 5.52	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 5% de umidade no solo contaminado.	p.182
Figura 5.53	Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 no consumo de água para resfriamento para casos de 10% de umidade no solo contaminado.	p.183
Figura 5.54	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 10% de umidade no solo contaminado.	p.183
Figura 5.55	Comparação do impacto da concentração de C ₂ Cl ₆ no consumo de água para resfriamento para casos de 15% de umidade no solo contaminado.	p.184
Figura 5.56	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 15% de umidade no solo contaminado.	p.184
Figura 5.57	Comparação do impacto da concentração de C ₂ Cl ₆ no consumo de água para resfriamento para casos de 20% de umidade no solo contaminado.	p.185
Figura 5.58	Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 20% de umidade no solo contaminado.	p.185
Figura 5.59	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo na redução do consumo de água para resfriamento.	p.186

Figura 5.60	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo no % de consumo de diesel, emissão de CO_2 e consumo de água para resfriamento	p.187
Figura 5.61	Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 0% na redução de custo com diesel.	p.190
Figura 5.62	Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 5% na redução de custo com diesel.	p.190
Figura 5.63	Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 10% na redução de custo com diesel.	p.191
Figura 5.64	Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 15% na redução de custo com diesel.	p.191
Figura 5.65	Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 20% na redução de custo com diesel.	p.192
Figura 5.66	Impacto da concentração de C_2Cl_6 e umidade na redução de custo com diesel.	p.192
Figura 5.67	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 0% e concentração de contaminante em 0% no solo.	p.198
Figura 5.68	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 0% e concentração de contaminante em 2,5% no solo.	p.199
Figura 5.69	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 0% e concentração de contaminante em 5% no solo.	p.199
Figura 5.70	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 10% e concentração de contaminante em 0% no solo.	p.200
Figura 5.71	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 10% e concentração de contaminante em 2,5% no solo.	p.200
Figura 5.72	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 10% e concentração de contaminante em 5% no solo.	p.201
Figura 5.73	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 20% e concentração de contaminante em 0% no solo.	p.201

Figura 5.74	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 20% e concentração de contaminante em 2,5% no solo.	p.202
Figura 5.75	Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 20% e concentração de contaminante em 10% no solo.	p.202
Figura 5.76	Ecoindicadores do consumo de diesel normalizado da UDT-CT.	p.213
Figura 5.77	Ecoindicadores da emissão de CO2 normalizado da UDT-CT.	p.214
Figura 5.78	Ecoindicadores do consumo de água normalizado da UDT-CT.	p.214

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Áreas Contaminadas no Estado do Rio de Janeiro.	p.50
Tabela 2.2	Quantidade e tipos de contaminação por nichos de atividade industrial.	p.50
Tabela 2.3	Aplicação do Tratamento por Dessorção Térmica.	p.57
Tabela 2.4	Vantagens e desvantagens do tratamento por dessorção térmica.	p.60
Tabela 2.5	Eficiência do tratamento por Dessorção Térmica em projetos reais.	p.61
Tabela 2.6	Taxa de volatização de contaminantes de acordo com a temperatura de dessorção.	p.64
Tabela 2.7	Padrão de emissão atmosférica.	p.75
Tabela 3.1	Condições de Processo da UDT.	p.89
Tabela 3.2	Pontos de ebulição de possíveis contaminantes em um solo.	p.91
Tabela 3.3	Capacidade de Tratamento máximo da UDT de acordo com o tipo de contaminação.	p.92
Tabela 4.1	Condições de processo no Forno Rotativo.	p.96
Tabela 4.2	Condições de processo no trocador de calor.	p.96
Tabela 4.3	Condições de processo no forno de pós-combustão.	p.96
Tabela 4.4	Condições de processo no resfriador.	p.96
Tabela 4.5	Componentes de entrada do forno rotativo.	p.98

Tabela 4.6	Componentes de saída do forno rotativo.	p.99
Tabela 4.7	Equações de calor no Forno Rotativo.	p.101
Tabela 4.8	Equações de calor no trocador de calor – Corrente quente.	p.104
Tabela 4.9	Equações de calor no trocador de calor – Corrente fria.	p.105
Tabela 4.10	Componentes de entrada do Forno de Pós-Combustão.	p.107
Tabela 4.11	Componentes de saída do Forno de Pós-Combustão.	p.107
Tabela 4.12	Equações de calor no Forno de Pós-Combustão.	p.110
Tabela 4.13	Equações de calor no Resfriador.	p.114
Tabela 4.14	Energias de ligação da combustão do hexacloroetano.	p.117
Tabela 4.15	Calor de formação dos compostos envolvidos na combustão do Hexacloroetano.	p.118
Tabela 4.16	Energias de ligação da combustão do C ₁₃ H ₂₈ .	p.119
Tabela 4.17	Calor de formação dos compostos envolvidos na combustão do $C_{13}H_{28.}$	p.120
Tabela 4.18	Massas atômicas dos elementos químicos.	p.121
Tabela 4.19	Peso molecular das substâncias.	p.122
Tabela 4.20	Porcentagem dos elementos químicos nas substâncias.	p.122
Tabela 4.21	Dados termodinâmicos do CO ₂ .	p.122

Tabela 4.22	Dados termodinâmicos do Solo Argiloso.	p.123
Tabela 4.23	Dados termodinâmicos do N ₂ .	p.123
Tabela 4.24	Dados termodinâmicos do O ₂ .	p.123
Tabela 4.25	Dados termodinâmicos do HCl.	p.123
Tabela 4.26	Dados termodinâmicos do C ₂ Cl ₆ .	p.124
Tabela 4.27	Dados termodinâmicos do H ₂ O.	p.124
Tabela 4.28	Novas condições de processo no resfriador da UDT-CT.	p.124
Tabela 4.29	Condições de processo no resfriador na Camisa do forno rotativo da UDT-CT.	p.125
Tabela 4.30	Equações de calor na camisa de troca térmica da UDT-CT.	p.129
Tabela 4.31	Equações de calor no Resfriador da UDT-CT.	p.131
Tabela 5.1	Dados da simulação com 0% de umidade no solo na UDT.	p.138
Tabela 5.2	Dados da simulação com 5% de umidade no solo na UDT.	p.139
Tabela 5.3	Dados da simulação com 10% de umidade no solo na UDT.	p.140
Tabela 5.4	Dados da simulação com 15% de umidade no solo na UDT.	p.141
Tabela 5.5	Dados da simulação com 20% de umidade no solo na UDT.	p.142
Tabela 5.6	Dados da simulação com 0% de umidade no solo na UDT-CT.	p.147

Tabela 5.7	Dados da simulação com 5% de umidade no solo na UDT-CT.	p.148
Tabela 5.8	Dados da simulação com 10% de umidade no solo na UDT-CT.	p.149
Tabela 5.9	Dados da simulação com 15% de umidade no solo na UDT-CT.	p.150
Tabela 5.10	Dados da simulação com 20% de umidade no solo na UDT-CT.	p.151
Tabela 5.11	Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de processos com umidade constante em 0%.	p.157
Tabela 5.12	Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de processos com umidade constante em 5%.	p.158
Tabela 5.13	Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de processos com umidade constante em 10%.	p.159
Tabela 5.14	Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de processos com umidade constante em 15%.	p.160
Tabela 5.15	Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de processos com umidade constante em 20%.	p.161
Tabela 5.16	Comparativo de eficiência energética entre as Unidades antes e depois da melhoria de processos.	p.162
Tabela 5.17	Comparativo econômico entre as Unidades antes e depois da melhoria de processo.	p.188
Tabela 5.18	Valor econômico de referência do diesel e horas anuais de funcionamento das Unidades de Dessorção Térmica.	p.189
Tabela 5.19	Densidade do diesel.	p.189
Tabela 5.20	Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 0% e variando o teor de contaminante.	p.193
Tabela 5.21	Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 5% e variando o teor de contaminante.	p.194
Tabela 5.22	Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 10% e variando o teor de contaminante.	p.195

Tabela 5.23	Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 15% e variando o teor de contaminante.	p.196
Tabela 5.24	Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 20% e variando o teor de contaminante.	p.197
Tabela 5.25	Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 0%.	p.203
Tabela 5.26	Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 5%.	p.204
Tabela 5.27	Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 10%.	p.204
Tabela 5.28	Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 15%.	p.205
Tabela 5.29	Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 20%.	p.205

LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES

Sigla	Descrição (descrição original)	
ACI	Área contaminada sob intervenção	
ACPO	Associação de Combate aos Poluentes Orgânicos Persistentes	
AI	Área contaminada sob investigação	
AMR	Área em processo de monitoramento para reabilitação	
AR	Área reabilitada para o uso declarado	
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno	
С	Elemento Químico Carbono	
C13H28(1)	Diesel líquido	
$C_2Cl_{6(s)}$	Hexacloroetano sólido – contaminante	
CCl ₄	Tetracloreto de carbono	
CECA	Comissão Estadual de Controle Ambiental	
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental	
Cl	Elemento Químico Cloro	
CN	Cianeto	
СО	Monóxido de carbono	
CO _{2(g)}	Gás Carbônico ou Dióxido de Carbono	
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente	
CONEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente	
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis	
C _x H _y	Hidrocarboneto de cadeia não definida	
DDT	Diclorodifeniltricloroetano	
DRE	Demonstrações de Resultados Financeiros	
DZ	Diretriz para Licenciamento Ambiental	
EDR	Eficiência de Destruição e Remoção	

EIA	Estudo de Impacto Ambiental	
Elambiental	Ecoindicador ambiental	
EPA	Environmental Protection Agency	
ERD	Eficiência de Remoção e Destruição	
F.R.	Forno Rotativo	
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia e Meio Ambiente	
FIEMG	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais	
FIOCRUZ	Fundação Osvaldo Cruz	
FPC	Forno de Pós-Combustão	
FR	Forno Rotativo	
Н	Elemento Químico Hidrogênio	
$H_2O_{(g)}$	Água Gasosa	
H2O(1)	Água Líquida	
НСВ	Hexaclorobenzeno	
HCE	Hexacloroetano	
НСН	Hexaclorociclohexano	
HCI	Ácido Clorídrico	
HCl(g)	Ácido Clorídrico gasoso	
HF	Ácido Fluorídrico	
Hg	Mercúrio	
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis	
ICE	Índice de Comparação de Ecoeficiência	
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade	
IEF	Instituto Estadual de Florestas	
INEA	Instituto Estadual do Ambiente –RJ	
LI	Licença de instalação	
LO	Licença de Operação	

LP	Licença Prévia
METTS	Mobil Ecotechnieek Thermal Threatment System
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPRJ	Ministério Público do Rio de Janeiro
Ν	Elemento Químico Nitrogênio
N _{2(g)}	Gás Nitrogênio
NaOH	Soda ou Hidróxido de Sódio
NBR	Norma Brasileira
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
0	Elemento Químico Oxigênio
O _{2(g)}	Gás Oxigênio
ONU	Organização das Nações Unidas
P.C.	Pós-Combustão
РАН	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
РСВ	Bifenilas Policloradas
PCI	Poder Calorífico Inferior
РСОР	Principal Composto Orgânico Perigoso
POP's	Poluentes Orgânicos Persistentes
REDUC	Refinaria Duque de Caxias
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RJ	Rio de Janeiro
Sabc	Área do Polígono ABC
SCOVs	Componentes Orgânicos Semi-voláteis
SEA	Secretaria Estadual do Ambiente
SERLA	Superintendência Estadual de Rios e Lagoas
Si	Área de cada triângulo.

SLAP	Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras
SO ₂	Óxido de Enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
St	Área do total formada pelos triângulos do gráfico radar
SVOC	Sigla em inglês de Componentes Orgânicos Semi-voláteis
TAC	Termo de Ajuste de Conduta
ТС	Trocador de Calor
TNT	Trinitrotolueno
ТРН	Hidrocarbonetos Totais de Petróleo
UDT	Unidade de Dessorção Térmica
UDT – Tradicional	Unidade de Dessorção Térmica apresentada no Capítulo 3
UDT apresentada	Unidade de Dessorção Térmica apresentada no Capítulo 3
UDT-CT	Unidade de Dessorção Térmica com camisa de troca térmica
UFF	Universidade Federal Fluminense
Umidade	H ₂ O
UNCTAD	United Nation Conference on Trade And Development
EPA	United States Environment Protection Agency
VI	Valor de Investigação
VOC	Sigla em inglês de Compostos Orgânicos Voláteis
VP	Valor de Prevenção
VRQ	Valor de Referência de Qualidade
δ	Desvio Padrão
δ^2	Variância
Т	Temperatura

LISTA DE SÍMBOLOS

Variável	Descrição (descrição original)
%C _{C2Cl6}	Porcentagem em Massa de carbono no Hexacloroetano
% <i>C_{CO₂}</i>	Porcentagem em Massa de carbono no gás carbônico
%C _{Diesel}	Porcentagem em Massa de carbono no diesel
$%Cl_{C_2Cl_6}$	Porcentagem em Massa de cloro no Hexacloroetano
%Cl _{HCl}	Porcentagem em Massa de cloro no ácido clorídrico gasoso
%H _{Diesel}	Porcentagem em Massa de hidrogênio no diesel
%H _{H20}	Porcentagem em Massa de hidrogênio na água
%H _{HCl}	Porcentagem em Massa de hidrogênio no ácido clorídrico gasoso
%N _{Ar}	Porcentagem em Massa de nitrogênio no ar
$\%O_{Ar}$	Porcentagem em Massa de oxigênio no ar
%0 _{CO2}	Porcentagem em Massa de oxigênio no gás carbônico
%0 _{H20}	Porcentagem em Massa de oxigênio na água
$\sum E_{Liga abla ar{ extsf{o}} o es formadas}$	Somatório das energias de ligações formadas
$\sum E_{Liga igree imes imes$	Somatório das energias de ligações rompidas
$\sum \Delta H_f^0_{produtos}$	Somatório das entalpias padrões de formação dos produtos
$\sum \Delta H_f^0_{reagentes}$	Somatório das entalpias padrões de formação dos reagentes
$C_{L\acute{a}gua}$	Calor latente da água
$\mathcal{C}_{Lsublima arsigma \widetilde{a} o}$	Calor de sublimação do contaminante

$Cp(T)$ Águ $a_{(g)}$	Calor específico da água gasosa em função da temperatura
$Cp(T)$ Á $gua_{(l)}$	Calor específico da água líquida em função da temperatura
$Cp(T)Contaminante_{(g)}$	Calor específico do contaminante gasoso em função da temperatura
$Cp(T)Contaminante_{(s)}$	Calor específico do contaminante sólido em função da temperatura
Cp(T)Dióxido de carbono	Calor específico do dióxido de carbono em função da temperatura
Cp(T)Gás Nitrogênio	Calor específico do gás nitrogênio em função da temperatura
Cp(T)Gás Oxigênio	Calor específico do gás oxigênio em função da temperatura
$Cp(T)HCl_{(g)}$	Calor específico da água gasosa em função da temperatura
$CpContaminante_{(s)}$	Calor específico do contaminante sólido
CpSolo Argiloso	Calor específico do solo argiloso
Eambiental	Ecoindicador da variável ambiental avaliada
m _{Ar F.R.}	Massa de ar no forno rotativo
m _{Ar P.C.}	Massa de ar de combustão no Pós-combustão
$mC_{13}H_{28}$	Massa de diesel
mC_2Cl_6	Massa de Hexacloroetano
mC ₂ Cl _{6 Entrada do P.C.}	Massa de Hexacloroetano na entrada do Pós-combustão
mC2Cl _{6Saída do F.R.}	Massa de Hexacloroetano na saída do forno rotativo
$mC_2Cl_{6Solo\ Contaminado}$	Massa de Hexacloroetano no solo contaminado
mC _{Combustível doF.R.}	Massa de carbono no combustível do forno rotativo
mC _{Combustível do P.C.}	Massa de carbono no gás de entrada do Pós-combustão

$m\mathcal{C}_{Gcute{a}s}$ de Saída do F.R.	Massa de carbono no gás de saída do forno rotativo
$m\mathcal{C}_{G{ m \acute{a}s}}$ de Saída do P.C.	Massa de carbono no gás de saída do Pós-combustão
mCl _{Gás de Entrada do P.C.}	Massa de cloro no gás de entrada do Pós-combustão
mCl _{Gás de Saída do F.R.}	Massa de cloro no gás de saída do forno rotativo
mCl _{Gás de Saída do P.C.}	Massa de cloro no gás de saída do Pós-combustão
mCl _{Solo Contaminado}	Massa de cloro no solo contaminado
mCO _{2 Comb. Cont.}	Massa de dióxido de carbono gerada na combustão do contaminante
$mCO_{2 \ Comb. \ Diesel}$	Massa de dióxido de carbono gerada na combustão do diesel
mCO _{2Saída do F.R.}	Massa de gás carbônico na saída do forno rotativo
mCO _{2Saída do P.C.}	Massa de dióxido de carbono no gás de saída do Pós- combustão
$mCO_{2\ Entrada\ do\ P.C.}$	Massa de dióxido de carbono na entrada do Pós-combustão proveniente da corrente fria de saída do trocador de calor
$m\mathcal{C}_{Solo\ Contaminado}$	Massa de carbono no solo contaminado
m _{Diesel F.R.}	Massa de diesel no forno rotativo
m _{Diesel P.C.}	Massa de combustível do Pós-combustão
$mH_2O_{Comb. Cont.}$	Massa de água consumida na combustão do contaminante
$mH_2O_{Comb. Diesel}$	Massa de água gerada na combustão do diesel
$mH_2O_{Entrada\ do\ P.C.}$	Massa de água gasosa na entrada do Pós-combustão proveniente da corrente fria de saída da unidade de recuperação de calor i
$mH_2O_{resfriamento}$	Massa de água de resfriamento abrupto dos gases de saída do Pós-combustão.
mH ₂ O _{Saída do F.R.}	Massa de água na saída do forno rotativo
mH ₂ O _{Saída do P.C.}	Massa de água no gás de saída do Pós-combustão

$mH_2O_{Solo\ Contaminado}$	Massa de água no solo contaminado
mHCl _{Saída do P.C.}	Massa de ácido clorídrico gasoso na saída do Pós- combustão
mH _{Combustível} do F.R.	Massa de hidrogênio no combustível para o forno rotativo
$mH_{Combustível}$ do P.C.	Massa de hidrogênio no combustível do Pós-combustão
$mH_{G{top s}deentradadoP.C.}$	Massa de hidrogênio no gás de entrada do Pós-combustão
mH _{Gás de} Saída do F.R.	Massa de hidrogênio no gás de saída do forno rotativo
$mH_{G{arson s} a b}$ Saída do P.C.	Massa de hidrogênio no gás de saída do Pós-combustão
$mH_{Solo\ Contaminado}$	Massa de hidrogênio no solo contaminado
mN _{2 Ar do P.C.}	Massa de gás nitrogênio proveniente do ar para o Pós- combustão
mN _{2 Entrada} do P.C.	Massa de gás nitrogênio na entrada do Pós-combustão proveniente da corrente fria de saída da unidade de recuperação de calor i
$mN_{2SaídadoF.R.}$	Massa de gás nitrogênio no gás de saída do forno rotativo
mN _{2 Saída} do P.C.	Massa de gás nitrogênio no gás de saída do Pós-combustão
mN _{Ar F.R.}	Massa de nitrogênio no ar de combustão do forno rotativo
mN _{Ar P.C.}	Massa de nitrogênio no ar de combustão do Pós-combustão
$mN_{G{arson}s}$ de entrada do P.C.	Massa de nitrogênio no gás de entrada do Pós-combustão
$mN_{G{\acute{a}}s}$ de Saída do F.R.	Massa de nitrogênio no gás de saída do forno rotativo
$mN_{G{top a}s}$ de Saída do P.C.	Massa de nitrogênio no gás de saída do Pós-combustão
mO _{2 Ar do P.C.}	Massa de gás oxigênio proveniente do ar para o Pós- combustão
$mO_{2\ Comb.\ do\ Cont.}$	Massa de gás oxigênio consumido na combustão do contaminante
$mO_{2\ Comb.\ do\ Diesel}$	Massa de gás oxigênio consumido na combustão do diesel

$mO_{2EntradadoP.C.}$	Massa de gás oxigênio na entrada do Pós-combustão proveniente da corrente fria de saída da unidade de recuperação de calor i
mO _{2 Saída do P.C.}	Massa de gás oxigênio no gás de saída do Pós-combustão
mO _{2 Saída do F.R.}	Massa de gás oxigênio na saída do forno rotativo
$mO_{Ar F.R.}$	Massa de oxigênio no ar de combustão do forno rotativo
mO _{Ar P.C.}	Massa de oxigênio no ar de combustão do Pós-combustão
$mO_{G{\acute a}s}$ de entrada do P.C.	Massa de oxigênio no gás de entrada do Pós-combustão
$mO_{G{\acute{a}}sde}$ Saída do F.R.•	Massa de oxigênio no gás de saída do forno rotativo
$mO_{G{\acute a}s}$ de Saída do P.C.	Massa de oxigênio no gás de saída do Pós-combustão
$mO_{Solo\ Contaminado}$	Massa de oxigênio no solo contaminado
$m_{Solo\ argiloso}$	Massa de solo argiloso alimentado
$PMC_{13}H_{28}$	Peso molecular do diesel
PMC ₂ Cl ₆	Peso molecular do Hexacloroetano
РМСО2	Peso molecular do dióxido de carbono
РМН ₂ О	Peso molecular da água
РМНСІ	Peso molecular do ácido clorídrico
PMO ₂	Peso molecular do gás oxigênio
Q _{Água no TC Q.}	Quantidade de calor gerada na transferência de calor da água gasosa no trocador de calor proveniente da corrente quente de saída do Pós-combustão
Q _{Água no TC F} .	Quantidade de calor necessária para o aquecimento da água gasosa na corrente fria da trocador de calor que alimentará o Pós-combustão
Q _{Água no F.R.}	Quantidade de calor necessária para o aquecimento e vaporização da água no forno rotativo

Q _{Água no P.CR.}	Quantidade de calor necessária para o aquecimento da água gasosa no Pós-combustão
Q _{Água na C.T.}	Quantidade de calor gerado pela transferência de calor da água na camisa de troca térmica do forno rotativo
$Q_{{\it Comb.}\ contaminante\ no\ P.C.}$	Quantidade de calor gerado pela combustão do contaminante no Pós-combustão
$Q_{Contaminante\ no\ TC\ F.}$	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do contaminante na corrente fria da trocador de calor que alimentará o Pós-combustão
$Q_{Contaminante\ no\ F.R.}$	Quantidade de calor necessária para o aquecimento e sublimação do contaminante no forno rotativo
$Q_{Contaminante\ no\ P.C.}$	contaminante da temperatura de entrada no Pós-combustão até a temperatura padrão de sua reação de combustão
$Q_{Diesel no F.R.}$	Quantidade de calor gerado pela combustão de diesel no forno rotativo
$Q_{Diesel no P.C.}$	Quantidade de calor gerado pela combustão de diesel no Pós-combustão
$Q_{Di \acuteo xi do}$ de Carbono no TC F.	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do dióxido de carbono na corrente fria da trocador de calor que alimentará o Pós-combustão
$Q_{Di \acuteo xi do}$ de Carbono no TC Q.	Quantidade de calor gerada na transferência de calor do dióxido de carbono na trocador de calor proveniente da corrente quente de saída do Pós-combustão
$Q_{Di \acuteoxido}$ de Carbono no F.R.	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do dióxido de carbono no forno rotativo
$Q_{Dióxido}$ de Carbono no P.C.	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do dióxido de carbono no Pós-combustão
$Q_{Di \acuteo xi do}$ de Carbono na C.T.	Quantidade de calor gerado pela transferência de calor do dióxido de carbono na camisa de troca térmica do forno rotativo
$Q_{G{ m \acute{a}s}}$ Nitrogênio no TC Q.	Quantidade de calor gerada na transferência de calor do gás nitrogênio na trocador de calor proveniente da corrente quente de saída do Pós-combustão
$Q_{G\acute{a}s\ Nitrog\hat{e}nio\ na\ C.T.}$	Quantidade de calor gerado pela transferência de calor do gás nitrogênio na camisa de troca térmica do forno rotativo
$Q_{G\acute{a}sNitrog\hat{e}nionoTCF.}$	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do gás nitrogênio na corrente fria da trocador de calor que alimentará o Pós-combustão
$Q_{G\acute{a}s\ Nitrog\hat{e}no\ no\ F.R.}$	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do gás nitrogênio no forno rotativo

$Q_{G\acute{a}s\ Nitrog\hat{e}no\ no\ P.C.}$	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do gás nitrogênio no Pós-combustão
$Q_{G{ m \acute{a}s}\ Oxig{ m e}nio}$ no TC Q.	Quantidade de calor gerada na transferência de calor do gás oxigênio na trocador de calor proveniente da corrente
	quente de saída do Pós-combustão
$Q_{G{ m \acute{a}s}\ Oxig{ m \acute{e}nio}\ na\ C.T.}$	Quantidade de calor gerado pela transferência de calor do gás oxigênio na camisa de troca térmica do forno rotativo
$Q_{G{ m \acute{a}s}\ Oxig{ m \acute{e}nio}\ no\ TC\ F.}$	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do gás oxigênio na corrente fria da trocador de calor que alimentará o Pós-combustão
$Q_{G{ m \acute{a}s}\ Oxig{ m \acute{e}nio}\ no\ F.R.}$	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do gás oxigênio no forno rotativo
$Q_{G{ m \acute{a}s}\ Oxig{ m \acute{e}nio}\ no}$ P.C.	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do gás oxigênio no Pós-combustão
$Q_{\it G\acute{a}s Oxig\hat{e}nio no Resfriador.}$	Quantidade de calor cedido do resfriamento do gás oxigênio na saída do trocador de calor, corrente quente.
Q _{HCl no} тс q.	Quantidade de calor gerada na transferência de calor do ácido clorídrico gasoso na trocador de calor proveniente da corrente quente de saída do Pós-combustão
Q _{HCl na C.T.}	Quantidade de calor gerado pela transferência de calor do ácido clorídrico gasoso na camisa de troca térmica do forno rotativo
Q _{HCl no P.C.}	Quantidade de calor necessária para o aquecimento do ácido clorídrico gasoso gerado na combustão do contaminante na sua temperatura padrão até a temperatura de saída do Pós- combustão
$Q_{Solo\ argiloso}$	Quantidade de calor necessária para aquecimento do solo argiloso no forno rotativo
Tambiente	Temperatura ambiente
Tentrada do P.C.	Temperatura de entrada do Pós-combustão
Tentrada no TC F.	Temperatura de entrada da corrente fria na trocador de calor que alimentará o Pós-combustão
Tentrada no TC Q.	Temperatura de entrada na trocador de calor proveniente da corrente quente de saída do Pós-combustão
Tentrada na C.T	Temperatura de entrada na camisa de troca térmica
Tevaporação da água	Temperatura de evaporação da água
Tfinal do solo	Temperatura final do solo ao sair do forno rotativo

Tresfriamento dos gases Temperatura de resfriamento abrupto dos gases

Tsaída do F.R.	Temperatura de saída do forno rotativo
Tsaída do P.C.	Temperatura de saída do Pós-combustão
Tsaída no TC F.	Temperatura de saída da corrente fria na trocador de calor que alimentará o Pós-combustão
Tsaída no TC Q.	Temperatura de saída na trocador de calor proveniente da corrente quente de saída do Pós-combustão
Tsaída na C.T.	Temperatura de saída na camisa de troca térmica

Tsublimação do contaminante Temperatura de sublimação do contaminante

$\Delta H^o{}_{Comb.}$ Contaminante	Entalpia padrão de combustão do contaminante
$\Delta H^o_{Comb.}$ Contaminante 1	Entalpia padrão de combustão do contaminante pelo método de energias de ligação
$\Delta H^o{}_{Comb.}$ Contaminante 2	Entalpia padrão de combustão do contaminante pelo método de calores de formação
$\Delta oldsymbol{H}^{o}{}_{oldsymbol{C}omb.}$ Diesel	Entalpia padrão de combustão do diesel
$\Delta H^o_{Comb. Diesel 1}$	Entalpia padrão de combustão do diesel pelo método de energias de ligação
$\Delta H^o_{Comb. Diesel 2}$	Entalpia padrão de combustão do diesel pelo método de calores de formação

Obs.: O termo "-C.T." representa a camisa de troca térmica e ele é incluído nos balanços depois melhoria de processo a fim de mostrar que os termos são diferentes.
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

A busca crescente pelo desenvolvimento econômico no mundo motivou muitos países a investirem pesquisas para projetos de processos inovadores de modo a obterem vantagem competitiva frente aos seus concorrentes. Neste contexto, o desenvolvimento de novas tecnologias é primordial para se produzir mais gastando menos. Esse processo se iniciou com a Revolução Industrial no século XVIII, cujo objetivo inicial era a produção de produtos, bens e serviços, que agregassem valor e fomentassem a economia (RIFKIN, 2012).

A partir da Revolução Industrial, foram evidenciados aumentos significativos na geração de poluentes atmosféricos, resíduos sólidos, contaminações de solos e afluentes e acidentes nos processos industriais que afetavam comunidades e o meio ambiente. Além disso, a maior parte da sociedade até a metade do século XX não possuía senso crítico frente à preservação ambiental e do ser humano, vivendo muitas vezes em condições precárias de saneamento básico, pois o que realmente importava era o consumismo. A ausência de regulamentações de trabalho, de segurança e ambiental, até a década de 70, fez com que uma grande quantidade de resíduos fosse destinada de forma inadequada. Essa disposição no solo tem acontecido principalmente por metais pesados, materiais químicos sintéticos e derivados do petróleo (FIEMG, 2011).

A contaminação do Meio Ambiente acontece desde os tempos mais antigos, mas o processo agravou consideravelmente nas últimas décadas, principalmente pelo crescente aumento da população mundial e necessidade de exploração de bens de consumos não renováveis para gerar energia e movimentar a produção dos mais variados bens de consumo.

Alguns relatos constatam que durante o império romano, uma das principais atividades econômicas era a extração de metais através de escavações minerais. Essa atividade exploratória gerava variados tipos de resíduos que contaminavam o entorno dessas minas e a sociedade não tinha conhecimento de que essa contaminação poderia ocasionar graves problemas para o ambiente e para a própria saúde de seres vivos (BAIRD, 2002).

Entretanto, com o passar do tempo e dos acidentes vivenciados pela sociedade, as regulamentações e boas práticas de produção e segurança mudaram com um controle mais rígido, porém, os passivos existentes se acumularam, alguns sem solução economicamente viável, principalmente no que compete a contaminação de solos.

De acordo com o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), em 2013 foi lançado a primeira edição sobre as áreas contaminadas no Estado do Rio de Janeiro que segundo o monitoramento do órgão ambiental, haviam 160 áreas no estado contaminadas e/ou reabilitadas e esse número subiu respectivamente, 68,75% e 105,00% nos anos de 2014 e 2015 em relação ao ano de 2013. Esse aumento se deve principalmente com a maior fiscalização das áreas de atividade industrial, comércio e tratamento de resíduos no Estado.

Existem diversas técnicas de remoção seguidas de tratamento e/ou disposição final ambientalmente corretas de solos contaminados. As opções de remediação são analisadas frente a prazos de tratamento, custos e seletividade a contaminação e aquelas que apresentam melhor custo-benefício são escolhidas. Atualmente, a remoção com posterior envio a aterros industriais é o principal conjunto de técnicas aplicadas para este tipo de passivo ambiental. Entretanto, existem outras que podem ser aplicadas, como por exemplo: extração de vapores, biorremediação, contenção, oxidação química e dessorção térmica (CETESB, 2010).

A dessorção térmica é caracterizada pela remoção de compostos orgânicos, que estão em concentrações que os configuram como contaminantes no solo, através da aplicação de calor. Para isso, o solo é aquecido à determinada temperatura suficiente para volatilizar os compostos orgânicos contaminantes e posteriormente aquecido novamente a altas temperaturas capazes de oxidar totalmente os compostos orgânicos (TROXLER, 1993).

Esta tecnologia é muito pouco difundida no Brasil, principalmente nos quesitos de legislação para implantação e operação, custos de tratamento frente aos tipos de contaminantes e quantidade de passivo ambiental. Cabe ressaltar, que há pouco material técnico sobre o processo de operação visto que a maior parte das plantas existentes no país apenas são capazes de tratar solos contaminados com hidrocarbonetos.

Além disso, com o advento da Política Nacional de Resíduos Sólidos, em que as empresas são obrigadas a tratar e reutilizar seus resíduos e dispor em aterro apenas o que não tiver solução de tratamento, esta tecnologia pode ajudar a solucionar os inúmeros passivos de solo contaminado com organoclorados e hidrocarbonetos no Brasil (MMA, 2012).

1.2. MOTIVAÇÃO

O Brasil atualmente tem inúmeros passivos de solo contaminado com hidrocarbonetos e organoclorados sem solução. Estes são considerados poluentes orgânicos persistentes que se caracterizam pelos seus efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana. Eles são altamente tóxicos, permanecem no ambiente por muito tempo pois, são bioacumulativos e biomagnificados.

Diversas tecnologias de tratamento para estes compostos já foram utilizadas como a oxidação química, remoção e recolocação do solo em outros locais controlados, incineração, etc.. Muitas falham pelo alto custo de tratamento, outras pelo grande tempo necessário para tratamento, sendo que a maioria não tem funcionamento (RUIZ *et al.*, 2012). Por isso, muitos locais encontram-se em condições de descaso, sem solução afetando toda a biota ao redor do local.

Na tecnologia de dessorção térmica, todos os tipos de contaminantes orgânicos podem ser removidos do solo. A eficiência de destruição e remoção (EDR) desses contaminantes pode chegar a 99,999%. Com isso, as concentrações residuais desses "contaminantes" ficam abaixo dos valores que os caracterizam como contaminantes (ANDERSON, 1993). Além disso, há uma grande vantagem de que como o solo é remediado e está limpo, o mesmo pode ser reutilizado no local da antiga contaminação.

Por ser uma tecnologia pouco utilizada e conhecida no Brasil, entretanto com vasto reconhecimento e eficiência nos EUA e Europa (PAL *et al.*, 1998), este trabalho permitirá apresentar às empresas e aos órgãos públicos brasileiros uma nova tecnologia de tratamento e remediação de solos contaminados, apresentando todo o seu modo operante, as legislações aplicáveis para instalação e operação, e os custos associados no processo de operação e impactos ambientais, por meio de ferramentas de simulação matemática de processos.

Esse trabalho acadêmico será um documento textual que servirá de base para o licenciamento deste tipo de tecnologia, visto que hoje, no Brasil, é desconhecida a existência

de plantas de dessorção térmica para tratamento de solos contaminados com organoclorados. Isso poderá atrair investidores para este tipo de planta industrial possibilitando remediar grandes passivos ambientais no Brasil vistos antes como sem solução.

A Unidade de Dessorção Térmica (UDT) em questão a ser estudada, da Essencis Soluções Ambientais, localizada na cidade de Magé, Rio de Janeiro, é uma unidade toda modularizada (METTS – *Mobil Ecotechnieek Thermal Threatment System*). Ela foi projetada em módulos de contêineres de padrões oceânicos para facilitar o seu transporte para os locais de tratamento. A Unidade é composta por fornos de dessorção térmica e oxidação de contaminantes orgânicos, lavador de gases, trocador de calor, ventiladores, e sistemas de resfriamento de gases. Vale ressaltar que existem diversos tipos de unidades de dessorção térmica conforme apresentado na seção 2.2, logo, esta tecnologia já possui um bom estágio de desenvolvimento.

1.3. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho será apresentar uma nova tecnologia de tratamento de solos contaminados com hidrocarbonetos e organoclorados, bem como as etapas críticas no processo de licenciamento no Brasil, simular o seu funcionamento no *software Maple* para desenvolvimento de indicadores para monitoramento do processo e após isso, avaliar a instalação de novos equipamentos no processo a fim de se obter uma melhor eficiência ambiental na planta. Na simulação, para a geração dos dados, utilizaremos o Hexacloroetano como contaminante variando sua concentração assim como o teor de umidade no solo na entrada. Com isso, obtêm-se as principais influências dessas variáveis no processo e suas relações com o consumo de combustível, emissão de CO₂ e consumo de água. Dentro desse contexto, compara-se os resultados entre si (antes e depois da melhoria de processo) através de gráficos de performance e ecoindicadores.

Vale ressaltar que o objetivo principal deste estudo não é ofertar grandes inovações nas rotas de processo, mas sim possibilitar otimizar rotas já consolidadas.

Esta simulação servirá de base para que em casos de contaminação de solo, possamos dar entrada com os dados de contaminação e ter resultados de como a planta se comportará no tratamento, ou seja, obter informações de dados de consumo de combustível, e a emissão de gases e consumo de água esperada no processo.

1.4. ESTRUTURA

Além deste capítulo de introdução, este trabalho está organizado da maneira descrita a seguir:

<u>Capítulo 2</u>: é realizada uma revisão bibliográfica, focada nos principais passivos ambientais existentes no Brasil e os tipos de tecnologias existentes para tratamento, apresentando vantagens e desvantagens com um enfoque maior no Tratamento Térmico. Além disso, será abordado as legislações brasileiras pertinentes para instalação de novas tecnologias de solos no Brasil.

<u>Capítulo 3</u>: é apresentada a descrição detalhada da Unidade de Dessorção Térmica a ser simulada com todas as condições necessárias para a montagem e simulação.

<u>Capítulo 4</u>: é apresentada a metodologia para simulação do processo operacional, assim como as possíveis alternativas de melhoria de processo para a planta de tratamento, e de unidades sem reaproveitamento energético, apresentando os métodos a serem utilizados para a geração dos ecoindicadores do processo.

<u>Capítulo 5</u>: são apresentados e discutidos os resultados das simulações através de análises gráficas e de tabelas de dados, além dos ecoindicadores de performance da planta após a instalação da melhoria de processo, através do comportamento do consumo de combustível, da emissão de CO_2 e do consumo de água.

Capítulo 6: é apresentada a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas também as referências bibliográficas consultadas e citadas durante o trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais temas que compõem este trabalho de pesquisa, tais como a apresentação da tecnologia de dessorção térmica e as principais unidades existentes: modulares e não modulares, móveis e fixas, comparação com outras tecnologias de remediação e/ou tratamento de solo apresentando suas vantagens e desvantagens, casos recentes no Brasil de contaminação de solos, licenciamento de novas tecnologias de tratamento de resíduos no país e a metodologia de ecoindicadores para performance ambiental.

Para busca de referências técnicas do processo térmico deste tipo de tecnologia, foram pesquisadas fontes que já as implementaram. Para a busca da aplicabilidade da tecnologia no mercado nacional e algumas legislações foram pesquisados os sites dos órgãos brasileiros pertinentes, no caso dos órgãos ambientais dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro e o Ministério do Meio Ambiente, além de normas e legislações ambientais da Constituição Brasileira.

Além disso, foram realizadas pesquisas sobre as fontes de contaminação de solos e sobre os principais passivos ambientais existentes no Brasil, principalmente para justificar a motivação do estudo.

Na questão da simulação, buscou-se na própria Universidade *softwares* de simulação de processos, sendo escolhido para ser utilizado o *Maplesoft*.

Para as pesquisas bibliográficas foram utilizados bancos de dados como o *Periódicos Capes, Science Direct, Scielo, Scopus e Web of Science.* A escolha dos autores e referências aconteceu por ordem de relevância, e aderência ao tema proposto.

2.1. CONTAMINAÇÃO DE SOLO

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, uma área é considerada contaminada quando possui concentrações de resíduos acima de um limite pré-estabelecido em condições que posam causar prejuízos à saúde da população e ao meio ambiente, ou seja, causar dano a toda a biota da região em que há a contaminação. Tais substâncias podem ter sido ali dispostas de maneira planejada, acidental ou natural, podendo estar concentradas no solo, rochas, sedimentos ou nas águas subterrâneas (MMA, 2014).

No Brasil, tem-se notado que a maior parte da contaminação de solos é ocasionada por petróleo e seus derivados, ou seja, contaminação por hidrocarbonetos. Quando ocorre esta contaminação, se ela não for primeiramente contida para depois ser remediada, a mesma pode atingir os lençóis freáticos, tornando a água para consumo humano intratável (ANDRADE, 2010).

Além disso, outras maneiras comuns que acarretam na contaminação do solo são: (ECOTECHNIEK BODEM BV, 1998)

- No vazamento de tanques de armazenagem de petróleo e seus derivados, ou postos de gasolina;
- Por hidrocarbonetos halogenados utilizados em lavanderias;
- Por cianetos em estações de gás e processos especiais;
- Por metais pesados devido à produção de cloro, hidróxido de sódio, hidrogênio, produção de pesticidas e extração de gás natural;
- Por compostos de nitrogênio, fósforo, bromo e enxofre na produção de explosivos.

Após a contaminação do solo, os principais fatores que influenciam a dissipação desses contaminantes pelo meio são (DYMINSKI, 2008):

- Propriedades físico-químicas do contaminante, tais como a solubilidade, densidade, concentração, pH, etc.);
- Características físicas do solo (granulometria, mineralogia, permeabilidade, quantidade de matéria orgânica para avaliar qualquer possibilidade de reação química com o contaminante, etc.;
- Características do local e de como ocorreu a contaminação, tais como o tempo de exposição do ao contaminante, temperatura do local, condições hidrogeológicas, etc.).

A pluma de contaminação é caracterizada pelo modo que o contaminante se desloca no solo e todos os aspectos citados anteriormente. Os tipos de contaminantes de solo podem ser divididos em orgânicos e inorgânicos.

2.1.1. Contaminantes orgânicos

Os contaminantes orgânicos podem ser divididos em alifáticos, aromáticos, hidrocarbonetos (ANDERSON, 1993):

- Alifáticos ou substâncias oleosas e naftalenos:
 - Voláteis (Baixos Pontos de Ebulição);
 - Não voláteis (Altos Pontos de Ebulição).

O limite entre as substâncias voláteis ou não é o valor de aproximadamente 250°C.

- Aromáticos:
 - Mono aromáticos: quase sempre voláteis, com exceção de fenóis. (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xileno (BTEX));
 - Aromáticos policíclicos: Dificilmente voláteis, também chamados de PAH (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*).
- Hidrocarbonetos halogenados:

Basicamente organoclorados como:

- Hidrocarbonetos clorados: tricloroetileno;
- o Aromáticos clorados;
- Pesticidas clorados ou produtos residuais. (HCH's, Lindano, HCB's ou Drins);
- PCB's;
- Dioxinas e furanos.
- Outros contaminantes:
 - o TNT;
 - o Pesticidas não clorados;
 - o Piridina;
 - Tiofeno e Tetraidrofurano.

2.1.2. Contaminantes inorgânicos

• Cianetos:

- Cianetos livres: usualmente os mais tóxicos;
- Compostos complexos de cianeto.
- Metais Pesados:
 - Metais pesados e metalóides.
- Outros:
 - o Amônia, fosfatos, cloretos, brometos, sulfatos ou ácidos concentrados.

2.1.3. Casos graves de contaminação de solo no Brasil

Os casos mais graves de contaminação de solo encontrados no Brasil e que ainda não possuem remediação são os ocasionados pelos Poluentes Orgânicos Persistentes (POP's) e metais pesados. Um contaminante para ser considerado como POP deve ser (ALBUQUERQUE, 2006):

- Possuir tempo de meia-vida longo;
- Bioacumulativo, ou seja, acumula–se na gordura do corpo, sangue e outros fluidos do corpo humano;
- Altamente tóxico para a biota;
- Influencia negativamente funções vitais do corpo humano, como hormônios, sistemas imunológico, neurológico e reprodutivo;

Em relação aos metais pesados, os que possuem maior preocupação e periculosidade devido à alta frequência de contaminação são o chumbo e o cádmio. O máximo aceitável para a potabilidade da água é de 0,01 e 0,005 mg/L, para o chumbo e o cádmio, respectivamente. As principais fontes de contaminação no solo para estes metais pesados são o descarte irregular de baterias automotivas e de baterias de celulares (BRAGATO, 2006).

Cada tipo de hidrocarboneto e organoclorado tem a sua peculiaridade e dependendo da sua concentração pode trazer diversos problemas ao meio ambiente e a saúde das pessoas. O problema mais grave neste caso é que grande parte destes compostos são carcinogênicos.

A contaminação de solos por contaminantes que se encaixam nas famílias de Hidrocarbonetos e Organoclorados geralmente ocorre por grandes instalações industriais que ou manufaturam compostos como pesticidas, herbicidas, ou que utilizam estes produtos químicos como insumos para outros produtos. As principais fontes de contaminação de solo no Brasil são: (CETESB, 2010)

• Manuseamento inadequado de agrotóxicos;

- Vazamentos no transporte efluentes líquidos e/ou manuseio inadequado;
- Disposição e tratamento inadequado de resíduos industriais perigosos;
- Minerações;

Atualmente, nós temos alguns grandes casos de contaminação de solos no país que encontram-se sem solução por muito tempo. Podemos citar:

- Cidade dos meninos Duque de Caxias contaminado com o HCH Hexaclorociclohexano (Organoclorado), resumido na seção 2.1.3.1;
- Caso Rhodia Cubatão Contaminado com Hexaclorobenzeno (HCB) (Organoclorado), resumido na seção 2.1.3.2;
 - 2.1.3.1. Cidade dos Meninos

A "Cidade dos Meninos" está localizada na cidade de Duque de Caxias, na baixada Fluminense no Rio de Janeiro e recebe esse nome pois no fim da década de 40 foi criada com o objetivo de ser um internato que disponibilizasse ensino profissional e moradia para rapazes de baixa renda, por isso o apelido. Nesta "cidade", os internos tinham cursos profissionalizantes de pesca, marcenaria, agricultura, criação de animais, etc. (DA SILVA *et. al.*, 2010)

No início da década de 50, a Baixada Fluminense era uma região com alta incidência de malária e outras doenças tropicais, por isso, o Ministério da Educação e Saúde, instalou na localidade, mais especificamente na "Cidade dos Meninos", uma fábrica de produção de pesticidas para o combate à vetores da doença. A fábrica funcionava em conjunto com a instituição educacional e um de seus principais produtos era o HCH (OLIVEIRA, 2008).

Devido aos elevados custos de manutenção da fábrica a mesma foi fechada em 1961, diversos pesticidas foram abandonados sem qualquer tipo de tratamento ou orientação à população local. Assim, houve um uso indiscriminados desses produtos no local aumentando a incidência de contaminação da população e da área. O "pó de broca", como era popularmente conhecido o HCH, era comercializado ilegalmente pela população no local em feiras da cidade. A quantidade de matéria prima abandonada foi em torno de 300 a 400 toneladas de resíduos tóxicos, especialmente o HCH (DE SOUZA, 2003).

Atualmente, segundo dados do Ministério da Saúde, cerca de 97% da população, está com níveis acima do permitido de HCH no organismo. Este contaminante pode provocar câncer, má formação congênita, entre outras doenças (DE SOUZA, 2003).

Por ter se tornado um problema de saúde pública, em 1995 o Ministério da Saúde fez uma parceria com uma empresa privada para tentativa de tratamento por uma remediação química. Esta empresa utilizava uma solução de hidrato de carbono (cal) com a tentativa de neutralizar o material contaminado. O objetivo era reduzir a concentração de isômeros de HCH na terra, entretanto, estudos posteriores mostraram que a operação piorou a contaminação no local pois as reações de neutralização dos contaminantes tentadas, apenas geraram compostos mais perigosos como fenóis e benzenos, inviabilizando a remediação (OLIVEIRA, 2008).

Na mais recente atualização sobre o caso, as famílias ali residentes foram removidas para outros lugares, e a prefeitura de Duque de Caxias derrubou os loteamentos irregulares existentes no local. Entretanto o passivo, continua sem remediação, sendo apenas monitorado.

Linha do tempo do caso "Cidade dos Meninos"

Segue um histórico do caso (OLIVEIRA, 2008):

- 1943 A Cidade dos Meninos foi criada;
- 1947 Foi criado o Instituto Nacional de Malariologia pelo Ministério da Educação e Saúde e instalado no local visto que a área da Baixada Fluminense tinha um grande foco de doenças tropicais;
- 1950 A fábrica de produção de pesticidas foi inaugurada;
- 1950 1956 Durante a operação da fábrica, a mesma produzia HCH e produtos à base de DDT;
- 1956 1962 Período de desativação da fábrica. Os resíduos da produção de pesticidas foram abandonados no local;
- 1988 Denúncias de vendas de pesticidas em feiras locais;
- 1989 São retirados 40 toneladas de pesticidas e armazenados na REDUC RJ (Refinaria Duque de Caxias – RJ);
- 1990 Procuradoria Geral da Justiça do RJ abre inquérito para investigação da contaminação do local e solicita a evacuação da área;
- 1995 Foi testado um projeto de remediação da área com aplicação de cal;
- 2001 Remoção pelo governo de dez famílias na área de maior contaminação;

- 2002 A Secretaria de Patrimônio da União passa a responsabilidade do local ao Ministério da Saúde que realiza os estudos de análise de risco à saúde. Além disso, a CETESB realiza um estudo da contaminação do local e identifica os focos principal e secundários;
- 2003 O governo realiza um programa de cadastramento da população no local para coleta de sangue e análise pele FIOCRUZ;
- 2004 A empresa Ambios finaliza o diagnóstico do sítio contaminado;
- 2004 Foi encaminhado ao Congresso Nacional o projeto de Lei 3034 com o objetivo de interromper a exposição humana, mediante indenização e desmobilização da área contaminada;
- 2008 Foi criado um grupo de Trabalho Interministerial para tentativa de resolução do problema;
- 2013 Prefeitura de Duque de Caxias desmobiliza os loteamentos irregulares existentes no local.

2.1.3.2. Caso Rhodia

Desde o início da industrialização brasileira, a Baixada Santista foi uma das áreas que atraiu várias indústrias multinacionais, sobretudo aquelas voltadas para o setor de base (petroquímicas, siderúrgicas, entre outras), originando o Polo Industrial de Cubatão.

Com isso, a região também se tornou vulnerável a contaminações ambientais devido à intensa ocupação por indústrias e à deficiência da fiscalização ambiental na época.

Um dos casos mais famosos de contaminação é o da fábrica da Rhodia de pesticidas, mais especificamente o "Pó da China", cujo principal contaminante é um organoclorado Hexaclorobenzeno. A literatura e as investigações mostraram que a Rhodia descartou na década de 70 resíduos tóxicos do processo em diversos pontos fora da fábrica contaminando o solo e a população ao redor. O HCB chegou a ser encontrado em amostras de leite materno na região do estuário de Santos. Estudos epidemiológicos têm mostrado que a presença deste composto no leite materno pode estar associada a alterações no desenvolvimento cognitivo, dos sistemas imunológico e reprodutivo, e com a ocorrência de tumores. (FERREIRA, 2015)

Diversas tentativas de remediação foram implementadas, tais como, a incineração do solo, técnicas de contenção e filtragem do lençol freático, remoção do solo contaminado com disposição em aterro e substituição por solo limpo.

Atualmente a contaminação ocorrida na região de Cubatão é registrada como uma das maiores contaminações por POP's ocorridas no mundo. (Associação de Combate aos Poluentes – ACPO).

Linha do tempo do caso "Rhodia"

Segue um histórico do caso (ACPO):

- 1965 Instalação da empresa Clorogil. Fabricação de Pentaclorofenol e seu sal, o pentaclorofenato de sódio (pó da China);
- 1972 A Clorogil funde–se ao grupo estatal também francês Rhône–Poulenc;
- 1974 A subsidiária Rhodia inicia a fabricação de CCl₄, Percloroetileno e HCB;
- 1974 a 1976 Disposição de resíduos tóxicos em cavas abertas no interior da fábrica;
- 1976 A Rhodia assume definitivamente a razão social de ambas as fábricas, e diante da falta de espaço físico no interior da unidade, inicia clandestinamente o descarte dos rejeitos tóxicos mencionados;
- 1977 a 1981 A Rhodia começa a recolher os resíduos tóxicos em caçambas e despejar a céu aberto, em diversos pontos fora da fábrica. Foram encontrados resíduos desde a cidade de Cubatão até a cidade de Itanhaém, cerca de 80 km do ponto de origem, onde era oferecido como adubo;
- 1978 Surgem as primeiras denúncias de problemas de saúde nos operários da unidade de produção de Pó da China. A CETESB registra em relatórios os descartes da Rhodia, sem adotar nenhuma medida punitiva;
- 1979 Primeiras reportagens denunciam os lixões químicos, mas não há repercussão por falta de consciência ambiental da população. A unidade de produção de Pó da China em Cubatão é desativada sob pressão dos operários contaminados. Eles conquistaram algumas garantias trabalhistas como estabilidade vitalícia no emprego. Antes disso, houveram 2 mortes por intoxicação aguda;
- 1982 a 1983 Os resíduos passaram a ser drenados em tambores e estocados sobre o mesmo morro de antes. Com o tempo, os tambores se oxidavam e o resíduo escorria integralmente para o solo;
- 1985 Ocupação dos locais de despejo pela população de baixa renda. Novas denúncias são veiculadas e a empresa volta a confinar o lixo tóxico precariamente na área fabril.

O Ministério Público de SP (MP–SP) abre procedimentos investigatórios que confirmam a contaminação do solo, das águas e da cadeia alimentar;

- 1986 Vários lixões químicos são encontrados. A Rhodia e a CETESB são denunciadas ao MPE. A justiça condena a Rhodia a isolar as áreas contaminadas e a remover e incinerar todo o solo contaminado;
- 1992 Os operários da fábrica de solventes clorados em Cubatão descobrem que estão contaminados por HCB e denunciam a empresa ao MP, que providencia uma inspeção conjunta que confirma a contaminação. Em dezembro, morre outro operário por intoxicação;
- 1993 Em junho, a justiça concede uma liminar, a pedido do MPE, interditando a fábrica de solventes clorados e o incinerador de resíduos tóxicos. A Rhodia não contesta a liminar. Os operários não podem ser demitidos e ficam em licença remunerada por decisão judicial até o esclarecimento dos fatos;
- 1995 Com o apoio da ACPO, o MPE em Cubatão celebra um Termo de Ajuste de Conduta (TAC) na Ação Civil que interditou a fábrica, que prevê algumas garantias trabalhistas inéditas. Além da Rhodia e do MP, o Sindicato dos Químicos assina o acordo extrajudicial, apesar das restrições dos operários à entidade. Em virtude da interrupção da incineração, a Rhodia começa a remediar as áreas contaminadas em Cubatão através de técnicas de contenção e filtragem do lençol freático, que mais tarde foram constatadas como insuficientes para a CETESB. Em Itanhaém, nem medidas de contenção são adotadas, apenas a remoção superficial do solo contaminado e sua substituição por solo limpo, seguida de reflorestamento e isolamento precário da superfície;
- 2001 Em maio, a Organização das Nações Unidas (ONU) celebra em Estocolmo a assinatura por 120 países, incluindo o Brasil, da Convenção de Estocolmo sobre os POP's, que propõe a eliminação global de 12 poluentes orgânicos persistentes, entre eles o Hexaclorobenzeno;
- 2002 Em janeiro, a Rhodia anuncia oficialmente a sua saída definitiva da região da Baixada Santista, sem oferecer maiores garantias quanto ao cumprimento das obrigações impostas judicialmente perante o imenso passivo sócio–ambiental;
- 2011 A Rhodia demitiu seis empregados que estavam de licença sob a alegação de que estariam curados da contaminação por Hexaclorobenzeno.

2.1.4. Áreas contaminadas no estado do Rio de Janeiro

Segundo o INEA, até o ano de 2015, o Rio de Janeiro possuia 328 áreas de solos contaminados mapeados no Estado. O órgão ambiental dividiu as áreas contaminadas em ramos de atividade que podem ser:

- Industrial;
- Aterro de resíduos;
- Viação;
- Postos de gasolina;

Os sítios foram mapeados e classificados conforme a Resolução CONAMA 420/2009. A classificação ocorreu da seguinte forma:

- AI Área contaminada sob investigação:
 - Área já investigada cuja a contaminação foi comprovada através de análises do solo e das águas subterrâneas, cuja concentração de contaminantes esteja acima dos valores permitidos na legislação;
- ACI Área contaminada sob intervenção:
 - Área em que houve a constatação de substâncias nocivas em fase livre, ou seja, em que a contaminação esteja visível ou ainda em que for comprovado após investigações e avaliações de risco que há existência de risco à saúde da população;
- AMR Área em processo de monitoramento para reabilitação:
 - Área comprovadamente contaminada em que o risco é considerado tolerável após avaliação de risco;
- AR Área reabilitada para o uso declarado:
 - Área contaminada que após monitoramento e remediação foi comprovado a eliminação do perigo e/ou a redução de riscos a níveis considerados toleráveis;

Segundo esta classificação, as 328 áreas de contaminação de solo no Rio de Janeiro obtiveram o seguinte ranqueamento, conforme Tabela 2.1:

Atividade	Quantidade	AI	ACI	AMR	AR	
Industrial	111	49	48	9	5	
Aterro	10	6	4	0	0	
Viação	15	2	10	2	1	
Postos de gasolina	192	94	63	28	7	
TOTAL	328	151	125	39	13	
						-

Tabela 2.1 – Áreas Contaminadas no Estado do Rio de Janeiro.

Fonte: Adaptado de INEA (2015).

Nota-se que a contaminação em postos de gasolina representa mais da metade das áreas de contaminação, por isso, os tipos de contaminação desse nicho de atividade foram analisados separadamente conforme a Tabela 2.2:

Tipo de Contaminação	Outras Ati (Industrial Viaç	ividades: , Aterro e ão)	Postos de	gasolinas	ТОТ	`AL
	[unidades]	[%]	[unidades]	[%]	[unidades]	[%]
Metais pesados	127	36,3%	0	0,0%	127	16,5%
TPH	67	19,1%	81	19,2%	148	19,2%
PAH	41	11,7%	126	29,9%	167	21,7%
Organoclorados	13	3,7%	0	0,0%	13	1,7%
VOC ^a	35	10,0%	4	1,0%	39	5,1%
SVOC ^b	23	6,6%	0	0,0%	23	3,0%
РСВ	13	3,7%	0	0,0%	13	1,7%
Fenóis	2	0,6%	0	0,0%	2	0,3%
BTEX	23	6,6%	210	49,9%	233	30,2%
Inorgânicos	6	1,7%	0	0,0%	6	0,8%
TOTAL	350	100,0%	421	100,0%	771	100,0%

Tabela 2.2 – Quantidade e tipos de contaminação por nichos de atividade industrial.

Fonte: Adaptado de INEA (2015).

a - Compostos Orgânicos Voláteis.

b - Compostos Orgânicos Semi-voláteis.

Como era de se esperar, as contaminações de postos de gasolina são em sua grande maioria de derivados de petróleo, ou seja, uma contaminação por hidrocarbonetos enquanto que das outras atividades industriais há uma maior variação no tipo de contaminação prevalecendo a maior parte por metais pesados. A Figura 2.1 ilustra o mapa de áreas contaminadas no estado do Rio de Janeiro demonstrando que a maior parte está na Região Metropolitana:

Figura 2.1 – Mapa de áreas contaminadas no Estado do Rio de Janeiro em 2015 com foco na Região Metropolitana.



Fonte: Adaptado de INEA (2015).

O tratamento térmico, objeto do estudo dessa dissertação, que será explicado com mais detalhes na seção 2.2, tem grande eficiência de remoção e destruição para praticamente todos os contaminantes citados, excetuando-se os metais pesados e outros contaminantes inorgânicos. Isso representa uma capacidade de tratamento de 82,7% ou 638 dos 771 tipos de contaminação citados.

2.2. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

As técnicas de remediação de solos são utilizadas com o objetivo de reduzir a concentração dos contaminantes a níveis aceitáveis e compatíveis com a proteção à biota do local.

O tratamento de solos contaminados pode ser realizado de três maneiras diferentes segundo o local de tratamento:

- No local onde ocorreu a contaminação:
 - On site: com remoção do solo;
 - In situ: sem remoção do solo;
- Fora local onde ocorreu a contaminação:
 - *Ex situ*: ocorre a remoção do solo e tratamento ou disposição em outro sítio;

As tecnologias de tratamento são escolhidas de acordo com o melhor custo-benefício para o tratamento, observando-se sempre a sua eficiência na remoção do contaminante além do custo financeiro do tratamento. No mundo há uma forte tendência e preferência a se utilizar técnicas de remediação in situ, pois estas não possuem o risco de contaminação de outros locais durante o transporte do solo contaminado, além de não haver o custo de frete no transporte do solo contaminado quando comparamos com as técnicas ex situ (DE LUCENA TAVARES, 2013).

As principais técnicas de remediação de solos existentes são (RUIZ et al., 2012):

• Tratamentos térmicos;

- o Dessorção térmica;
- o Incineração;
- Remoção e redisposição do solo contaminado;
- Biorremediação;
- Fitorremediação;
- Oxidação Química.

A seleção da melhor tecnologia para um eventual tratamento ou combinação de duas ou mais depende de três fatores que influenciam no custo-benefício (RUIZ *et al.*, 2012):

- Nível de concentração que se quer atingir para o uso futuro da área, ou seja, quando menor o nível de concentração do contaminante necessário no pós-tratamento, mais oneroso pode ser o processo;
- Profundidade da contaminação;
- Custos envolvidos no processo de licenciamento, estudo, remoção do solo, se necessário, e tratamento.

2.2.1. Tratamento térmico

O tratamento térmico consiste no aquecimento do solo em temperaturas capazes de promover a separação dos contaminantes orgânicos pela sua volatilização ou destruição. Esta técnica pode ser utilizada "in situ ou "ex situ". As técnicas in situ ocorrem por injeção de vapor, aquecimento condutivo em poços térmicos ou em aquecimento por eletrorresistividade. Já o tratamento ex situ, que será o objeto de estudo desta dissertação, ocorre em unidades de processos específicas de dessorção térmica (CETESB, 2010).

A incineração é um processo de destruição térmica que ocorre em altas temperaturas, geralmente acima de 900°C. Seu principal objetivo é reduzir o material incinerado a cinzas, ou seja, nela ocorre a completa destruição da contaminante e consequente redução de volume do solo. Estas cinzas precisam ser dispostas em aterro industrial controlado. (CETESB, 2010)

A dessorção térmica é uma técnica de tratamento de solos, lodos ou sedimentos que usa o calor para separar fisicamente compostos orgânicos de materiais sólidos. O equipamento de dessorção térmica é projetado para aquecer o material sólido contaminado a temperaturas suficientes para fazer com que os constituintes orgânicos volatilizem e sejam dessorvidos, sendo separados fisicamente do material sólido a ser tratado. Apesar de não serem projetados para decompor constituintes orgânicos, os equipamentos de dessorção térmica podem, dependendo do composto orgânico presente e da temperatura do sistema de dessorção, causar decomposição total ou parcial de alguns dos constituintes. A grande maioria dos contaminantes orgânicos pode ser removida da matriz sólida por dessorção térmica. Nestes casos, pode-se citar os COV's e os SCOV's. Os COV's, tais como solventes, gasolina, evaporam facilmente, quando aquecidos, por possuírem baixo ponto de ebulição. Já os SCOV's necessitam de temperaturas mais elevadas para evaporar. São exemplos de SCOVs o creosoto (conservante de madeira), pesticidas e compostos organoclorados em geral. (EPA, 1997)

A dessorção térmica dificilmente é utilizada para tratar compostos inorgânicos, mas pode remover parcialmente do solo metais como o mercúrio e o arsênio, por serem metais com baixo ponto de ebulição. Caso exista a presença de compostos inorgânicos em quantidade significativa no resíduo, é necessário saber que quantidades destes compostos podem ser vaporizadas no processo para adequar o pós-tratamento dos gases (EPA, 1997).

Vale ressaltar que uma Unidade de Dessorção Térmica não pode ser considerada como um incinerador, visto que o objetivo do incinerador é aquecer o material a elevadas temperaturas e consequentemente reduzir o seu volume produzindo cinzas. Diferentemente da dessorção térmica que tem o objetivo de volatizar o contaminante da matriz sólida, tornando assim o solo tratado. Nela, a estrutura do solo tratado permanece intacta permitindo seu reuso. Por trabalhar com temperaturas menores que a incineração, a dessorção térmica tem um custo menor quando comparados entre si (KENNA *et al.*, 1996).

Os compostos orgânicos volatilizados são tratados geralmente em uma unidade secundária do tratamento antes da descarga à atmosfera. Eles podem ser tratados por condensação, coleta ou combustão. Para as duas primeiras opções, coleta ou condensação dos contaminantes, os gases são usualmente tratados fora do *site* após a primeira fase do processo. Para a terceira opção, combustão, o tratamento ocorre no *site*, imediatamente após a saída do gás da primeira fase do processo. As câmaras de combustão destroem os constituintes orgânicos, enquanto os condensadores e coletores retêm os compostos orgânicos volatilizados para tratamento posterior ou eliminação (SULLIVAN, 1997).

No processo básico de dessorção térmica, a aplicação é limitada aos contaminantes não clorados com baixos pontos de ebulição (abaixo de 315 °C). O material contaminado é aquecido

entre 148 °C e 315 °C. O processo de dessorção térmica é eventualmente aplicado a contaminantes que possuem pontos de ebulição acima de 315°C, como no caso dos compostos clorados. Esse sistema pode evoluir sendo possível aquecer as temperaturas no intervalo entre 315°C e 648°C. Em ambos os casos o material tratado mantém suas propriedades físicas, apesar destas poderem ser alteradas se o material for aquecido a altas temperaturas (ANDERSON, 1993).

2.2.1.1. Métodos de Dessorção Térmica

Em geral, a dessorção térmica pode ocorrer de duas formas:

- Aquecimento Direto;
- Aquecimento Indireto;

A principal característica da utilização do aquecimento direto é a de que o processo de dessorção ocorre pela transferência de calor da corrente de gás quente gerada pela queima de combustível para o solo, em contato direto. Portanto, é necessário gerar uma grande quantidade de gás de combustão, o que significa um gasto significativo de combustível e demanda equipamentos de filtragem, pós-combustão e resfriamento maiores e mais complexos. O aquecimento indireto é caracterizado pela transferência de calor ao solo por uma corrente gasosa em função de equipamentos de troca térmica como trocadores de calor. Com isso, somente uma pequena quantidade de gás de combustível queimada e o tamanho e complexidade dos equipamentos para seu tratamento. (U.S DEPARTMENT OF LABOR, 2003)

2.2.1.2. Aplicação da Dessorção Térmica

Em geral, o processo de dessorção térmica é capaz de tratar diferentes materiais, incluindo solo, sedimentos, lama, e tortas de filtro, contaminados com uma grande variedade de contaminantes orgânicos. A dessorção térmica envolve a escavação do solo para tratamento na unidade, sendo que o solo pode ser tratado no próprio local, ou transportado para o local em

que a planta de tratamento está instalada. Os sistemas de dessorção térmica são classificados em duas classes gerais: unidades estacionárias ou móveis. Existem quatro tipos principais de unidades de dessorção térmica (CUDAHY *et al.*, 1992):

- *Rotary dryer* Forno rotativo;
- Asphalt Plant Aggregate Dryer Forno rotativo agregados com usinas de asfalto;
- *Thermal Screw* Parafuso térmico;
- *Conveyor Furnace* Fornalhas;

Estas plantas se diferenciam principalmente pelo tratamento que é dado ao contaminante dessorvido do solo, sendo a tecnologia mais utilizada a *rotary dryer*, que é o objeto de estudo dessa dissertação. Neste tipo de tecnologia, o contaminante dessorvido que se apresenta na fase gasosa, é oxidado termicamente em fornos de pós combustão e posteriormente a isso, os gases são neutralizados em lavadores de gases. (TROXLER *et al.*, 1993)

Segundo TROXLER *et al.*, 1993, através de uma consulta de dados e registros com empreiteiros que utilizam estas tecnologias, e a EPA, os seguintes fatores são considerados cruciais na performance e aplicabilidade de cada sistema de dessorção:

- Projeto dos equipamentos de processo e características de funcionamento:
 - Temperatura de tratamento do solo;
 - Tempo de tratamento;
 - Característica dos gases de exaustão dos fornos;
 - Método de transferência de calor (direto ou indireto);
- Característica físico-química dos contaminantes:
 - o Pressão de vapor;
 - Concentração de contaminante;
- Característica do solo:
 - Densidade aparente;
 - Granulometria do solo;
 - o Plasticidade;
 - Teor de matéria orgânica no solo;
 - Quantidade de solo;

Para se determinar a aplicabilidade da dessorção térmica a um local particular, devemse considerar todos os fatores supracitados, pois esses impactam principalmente o custo de instalação e operação de cada remediação específica. A mobilidade das tecnologias de dessorção térmica impactam bastante, também, no custo final de tratamento. Se elas são móveis, o que impacta no custo é o tamanho do equipamento e a quantidade de solo a ser tratada. Se elas são estacionárias, a distância de transporte dos solos contaminados até a tecnologia influencia bastante no custo (TROXLER *et al.*, 1993).

Uma orientação mais específica na aplicação da dessorção térmica para tratamento de vários contaminantes específicos é apresentada na Tabela 2.3:

Grupos de contaminantes		Eficiência			
		Solos	Lama	Sedimentos	Tortas de filtro
	Voláteis halogenados	1	2	2	1
	Semi-voláteis halogenados	1	2	2	1
	Voláteis não halogenados	1	2	2	1
	Semi-voláteis não halogenados	1	2	2	1
Orgânicos	PCBs	1	2	2	2
	Pesticidas	1	2	2	2
	Dioxinas / Furanos	1	2	2	2
	Cianetos orgânicos	2	2	2	2
	Corrosivos orgânicos	3	3	3	3
	Metais voláteis	1	2	2	2
Metais não voláteis		3	3	3	3
In angên i ang	Amianto	3	3	3	3
Inorganicos	Materiais radioativos	3	3	3	3
	Corrosivos inorgânicos	3	3	3	3
	Cianetos inorgânicos	3	3	3	3
D (:	Oxidantes	3	3	3	3
Keativos	Redutores	3	3	3	3
Eficiência: 1 – Demonstrada empiricamente; 2 – Potencial (opinião de especialistas); 3 –					
Baixa (opinião	o de especialistas).				

Tabela 2.3 – Aplicação do Tratamento por Dessorção Térmica.

Fonte: EPA (1995).

2.2.1.3. Tipos de solos indicados para o tratamento em Unidades de Dessorção Térmica

O tratamento térmico é adequado para todo o tipo de solo, diferentemente de outras técnicas. O tipo de solo afeta a capacidade de produção da instalação, principalmente pela distribuição do tamanho das partículas. Com isso, mais energia é gasta em solos argilosos devido ao fato de possuir maior grau de umidade. Logo, gasta-se mais combustível apenas com o propósito de secar o solo. Dependendo da estrutura do solo se faz necessária a quebra de grandes aglomerados ou medidas de prevenção à formação de grandes quantidades de poeira. Isso deve ocorrer pois partículas grandes podem causar ineficiência no processo de transferência de calor ao solo prejudicando a dessorção dos contaminantes, além de haver o risco de entupimento do sistema de alimentação do solo no forno, ilustrada na Figura 2.2. Por isso, o pré-tratamento com peneiras ou equipamentos de trituração para redução granulométrica podem ser utilizados. (CETESB, 2010)



Figura 2.2. Sistema de alimentação dos fornos.

Os solos podem ser divididos nas seguintes categorias em relação a relevância para dessorção térmica: (ECOTECHNIEK BODEM BV, 1998)

Arenosos: Solos que contem menos de 10% de partículas de tamanho menor que 63µm;

- Argila: Solos que contém mais de 10% e menos de 30% de partículas de tamanho menor que 63 μm;
- Argilosos: Solos que contém mais de 30% de partículas de tamanho menor que 63 μm;
- Pantanoso: Solos contendo no mínimo 30% de substâncias orgânicas (base seca) capaz de aprisionar grandes volumes de água;
- Altamente Estratificados ou Misturas: Solos que não se encaixam nas outras categorias ou formados por mistura de dois ou mais tipos de solo.

O solo, depois de tratado, pode ser usado para diferentes propósitos sem nenhuma restrição ambiental, conforme CONAMA 420. Restrições do reuso para esse solo podem surgir, se o contaminante em questão tiver concentrações de metais pesados acima dos limites permitidos. E como explicado anteriormente, metais pesados, fogem do escopo do tratamento térmico.

2.2.1.4. Tempo de tratamento

O tempo de duração do tratamento de solos em unidades de dessorção térmica depende principalmente dos seguintes fatores (EPA, 2012):

- Quantidade de solo contaminada;
- Concentrações dos contaminantes;
- Dificuldade do processo de dessorção devido a existência de poeiras, barros e umidade;
- Capacidade da unidade de tratamento.

Em geral, o tratamento térmico é muito mais rápido que as outras técnicas de remedição existentes, principalmente quando a concentração dos contaminantes é elevada.

2.2.1.5. Vantagens e desvantagens do tratamento por dessorção térmica

Na Tabela 2.4, são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do processo de dessorção térmica:

Vantagens	Desvantagens
• Equipamento disponível para tratamento no <i>site</i> ou fora dele.	 É necessária escavação de solos, geralmente limitadas a 8,00 m da superfície.
• O tempo gasto no tratamento é curto. Geralmente opera-se com capacidades de 25 t/h.	• Tratamentos no <i>site</i> requerem uma área significante (>2.000 m ²) para instalação da unidade de dessorção e armazenamento dos sólidos a serem processados.
• Custo competitivo para grandes volumes de sólido. (>1.000 m ³)	• Tratamentos fora do <i>site</i> necessitam de transporte do sólido, o que gera custos.
 Pode ser usado para remediação em áreas com elevada concentrações de hidrocarbonetos de petróleo. 	 Sólidos escavados abaixo dos níveis de água subterrânea necessitam de pré-tratamento devido ao elevado índice de umidade.
• O solo tratado pode ser redepositado no <i>site</i> ou utilizado como cobertura para aterros.	• Altos custo com combustível para aquecimento dos fornos.
• Pode reduzir o TPH para menos de 10 ppm e BTEX para menos de 100 ppb.	
 Tem eficiência comprovada no tratamento de solos contaminados com organoclorados. 	
 É uma solução imediata para contaminantes extremamente perigosos 	
 A eficiência de destruição térmica dos contaminantes é quase 100%. 	

Tabela 2.4 – Vantagens e desvantagens do tratamento por dessorção térmica.

Fonte: EPA (1995) e CETESB (2010)

2.2.1.6. Cases de exemplo de tratamento de solos por dessorção térmica

A Tabela 2.5 apresenta dados de eficiência em sistemas de tratamento de solos contaminados com hidrocarbonetos e organoclorados em unidades de dessorção térmica similares à unidade que será simulada. A relação tem intenção de mostrar resultados possíveis de serem atingidos pela tecnologia proposta na simulação.

Projeto	Temperatura de saída do solo - °C	Contaminantes	Concentração do contaminante no solo - ppm	Concentração do contaminante no solo tratado	Eficiência de remoção
TH Agriculture and Natrition	445 – 583	OCL pesticidas	400-500	DDT: <0,13 ppm Toxafeno: < 6,8	> 95%
S&S Flying/Malone	371	5.500 t de solo contaminado com toxafeno	634	<pre> ppm < 1 ppm</pre>	>99,76 %
Port of Los Angeles Thermal Desorption	290	Destilados de petróleo	Acima de 30.000	Hidrocarbonetos < 2000 ppm PAH < 1 ppm	>97 %
NBM	672	Solos contaminados com pesticidas	<i>Aldrin</i> : 34 <i>Dieldrin</i> : 88 <i>Endrin</i> : 710 Lindano: 1.8	Todos eles < 0,01 ppm	> 99 %
General Motors Providing Ground	315 - 482	6.727 t contaminado com dietilbenzeno	380 - 2.400	< 0,01 ppm	>99 %
Explorer Pipeline, Spring, TX	315 - 482	48.737 t contaminado com BTEX	15.000	< 1 ppm	> 99 %
Niagara Mohawk	315 - 538	5.000 t contaminado com <i>benzo-</i> <i>perylene</i>	50.000	< 3 ppm	> 99 %

Tabela 2.5 – Eficiência do tratamento por Dessorção Térmica em projetos reais.

		Continuação da	Tabela 2.5:		
Kelley Air Force Base, San Antonio, TX	260 - 538	20.000 t de solo contaminado com TPH	Acima de 5.000	< 10 ppm	> 99 %
Garage in City of Brooklyn Center, MN	260 - 538	Diesel Benzeno Xileno	5.600 < 0,09 0,22	< 0,6 ppm < 0,03 ppm < 0,08 ppm	> 99 % 66 % 63 %
Petroleum Facility, North Adams, MA	315 - 538	240.000 t contaminada com BTEX e TPH	50 - 1000	< 1 ppm	90 – 99 %

Fonte: Adaptado de PAL et al. ((1998)).
---------------------------------	--------	----

2.2.1.7. Emissões atmosféricas

No processo de dessorção térmica os contaminantes orgânicos, que são os focos principais da ação de remediação, são os parâmetros de interesse a serem controlados, pois como já explicado, na dessorção térmica não ocorre destruição dos materiais inorgânicos. Além disso, por se utilizar uma câmara de pós combustão para oxidação térmica destes compostos orgânicos, como é comum nestes sistemas, há como resultado desse processo de destruição, a formação de gases ácidos, tais como, o NO_x, SO_x, etc.

2.2.1.7.1. Formação de NOx

Os óxidos de nitrogênio são formados principalmente a partir da reação do oxigênio e do nitrogênio presentes no ar, em presença de temperatura elevada, aos quais denominam-se NO_x térmicos, e também, pela reação do nitrogênio presente na composição de combustíveis, denominados NO_x do combustível. Segundo Pal *et al.* (1998), as emissões de NO_x em processos de dessorção térmica são inferiores a 100ppmv.

A formação de SO_x está relacionada principalmente com a presença de enxofre nos combustíveis, no caso da UDT, o diesel, formado basicamente pela oxidação de enxofre contido no mesmo. Em função dos combustíveis a serem utilizados no processo, as emissões de SO_x serão pouco significativas.

2.2.1.7.3. Emissões de Material Particulado

A emissão de material particulado (MP) está relacionada com as características do solo a ser processado, as condições de queima (arraste pela corrente de ar) e turbulência do processo e da eficiência do equipamento de controle de MP, no caso o filtro de mangas.

2.2.1.7.4. Emissões de CO

O monóxido de carbono (CO) presente nas emissões é resultante da combustão incompleta, associados às deficiências e/ou limitações técnicas do projeto, instalação, operação e manutenção do equipamento de destruição térmica de resíduos. Por isso, o CO é utilizado como controle de qualidade de queima. Quanto menor os teores de CO, melhor a qualidade da queima.

2.2.1.7.5. Emissão de Compostos Orgânicos

Os compostos orgânicos são os elementos de maior interesse em termos de emissão. Sua emissão depende dos teores destes compostos no solo, da taxa de alimentação, da eficiência do processo dessorção e da eficiência da destruição dos mesmos na câmara de pós combustão.

Segundo EPA (1997), a Equação 2.1 estima a taxa de emissão do contaminantes orgânicos na dessorção térmica, após a oxidação na câmara de pós combustão:

 $ER_{i} = \left(\frac{C_{i}}{1000}\right) \times F \times \left(\frac{V_{i}}{100}\right) \times \left(1 - \frac{CE_{i}}{100}\right);$ (2.1) $ER_{i} = taxa \ de \ emissão \ do \ contaminate \ "i" - \left(\frac{g}{h}\right);$ $C_{i} = teor \ do \ contaminate \ "i" \ no \ solo - \left(\frac{mg}{kg}\right);$ $1000 = f \ ator \ de \ conversão - \left(\frac{mg}{g}\right);$ $F = taxa \ de \ alimentação \ de \ solo - \left(\frac{kg}{h}\right);$ $V_{i} = porcentagem \ do \ contaminante \ "i" \ volatizado - \left(\frac{mg}{kg}\right);$ $CE_{i} = eficiência \ de \ destruição \ térmica \ da \ câmara \ de \ controle;$

Os valores para a porcentagem de contaminantes volatilizados (V_i), segundo a EPA (1997), são apresentadas na Tabela 2.6:

Valores de V _i				
Compostos	Faixa de Temperatura	Faixa de Temperatura		
Compositos	(93 a 315°C)	(315 a 538 °C)		
VOC's/BTEX	99,00 %	99,99 %		
SVOC's	90,00 %	99,00 %		
THC	95,00 %	99,90 %		
PCB 's	50,00 %	99,00 %		

Tabela 2.6 – Taxa de volatização de contaminantes de acordo com a temperatura de dessorção.

Fonte: EPA (1997).

Os valores de CE_i (eficiência de destruição térmica da câmara de pós combustão) são em geral superiores a 97% (EPA, 1997).

2.2.1.7.6. Emissões de Metais

Os metais não são destruídos por combustão. Os processos de dessorção térmica não são projetados para o tratamento de metais e são considerados ineficientes na separação de contaminantes inorgânicos da matriz do solo. Assim, se considera que, nos níveis de temperatura do processo a emissão não é significativa, permanecendo grande maioria dos mesmos na matriz do solo.

2.2.1.8. Solo Tratado

2.2.1.8.1. Multidestinação:

Após o tratamento, as concentrações dos compostos residuais estão abaixo dos valores que o tornam um contaminante. Portanto, o solo está limpo e de um ponto de vista ambiental está adequado para diversas utilizações como: construção civil, áreas de recreação, coberturas de aterros sanitários, estradas e entre outros. Uma análise completa do solo pode ser realizada com base no CONAMA 420, que após o tratamento, define a qualidade de uso do solo como sendo residencial, agrícola e industrial (MMA, 2009).

Dificilmente, após o tratamento, há alguma diferença significativa nas propriedades físicas e químicas do solo tratado com a do solo original (antes da contaminação) o que permite a sua devolução ao local de origem e com adição de fertilizantes e após alguns meses, o solo está totalmente restaurado ecologicamente.

2.2.1.8.2. Compactação

O tratamento térmico é ideal para adequar o solo à compactação, uma vez que o processo reduz a quantidade de poeira orgânica presente no solo enquanto mantêm as propriedades físicas e químicas. Isso permite um maior grau de compactação do solo tratado em relação ao original.

2.2.2. Remoção e redisposição do solo

A remoção e redisposição do solo contaminado em outros locais controlados é uma das técnicas mais tradicionais e consagradas na remediação de locais contaminados. Tecnicamente, nela não há o tratamento do resíduo contaminado, pois o que ocorre é apenas a remoção do solo

de um local contaminado e sem controle do passivo para um local confinado, como os aterros industriais, em que a contaminação não se propaga pelo solo e lençóis freáticos. Sendo assim, o maior cuidado nesse tipo de tratamento é durante o transporte do material para que não haja a contaminação de outros sítios. Esta técnica é indicada para casos em que a quantidade de solo contaminado é relativamente baixa, menor que dez mil toneladas, visto que os custos com transporte influenciam bastante nesse tipo de destinação (CETESB, 2010).

2.2.3. Biorremediação

A biorremediação consiste na degradação de contaminantes orgânicos por microrganismos que utilizam os mesmos como fonte de carbono para seu metabolismo celular e consequente geração de energia. No caso desta técnica, os principais fatores que influenciam a degradação dos contaminantes no solo são (RUIZ *et al.*, 2012):

- Tipo de contaminante, sua estrutura molecular e concentração;
- Umidade do solo;
- Temperatura do solo;
- pH;
- Salinidade do solo.

Esta técnica necessita de adição conjunta de nutrientes, como o Nitrogênio e o Fósforo, a fim de gerar um ambiente ótimo para o crescimento e multiplicação dos microrganismos e consequentemente, aumentar a taxa de biodegradação. (DE LUCENA TAVARES, 2013).

A biorremediação possui grandes vantagens frente a outras técnicas de tratamento como a sua aplicabilidade para diferentes tipos de contaminação (hidrocarbonetos, halogenados alifáticos e aromáticos, PCB's, metais pesados), baixo custo para compostos de fácil biodegradação, alta eficiência na metabolização dos contaminantes, etc. (CETESB, 2010).

Porém, como desvantagens, a biorremediação é um processo de difícil controle no que diz a respeito o processo de crescimento e desenvolvimento das bactérias, é um processo muito específico para cada tipo de contaminação, ou seja, se a área contaminada possuir mais de um tipo de contaminação, esta técnica não conseguirá abranger todo o problema, além de que no

processo de metabolização dos contaminantes há a possibilidade de formação de produtos tóxicos como metano e sulfetos, e o tempo de tratamento é relativamente longo (BENTO, 2003 ; CETESB, 2010).

2.2.4. Fitorremediação

A fitorremediação utiliza plantas para degradação, extração, contenção e/ou inoculação de contaminantes orgânicos e inorgânicos de solos e águas subterrâneas. Zodrow (1999) afirmou que esta tecnologia de tratamento tem eficiência na remediação de áreas contaminadas por derivados de petróleo, solventes, creosoto, PCB's e metais pesados.

No processo de tratamento, as plantas podem operar de forma direta ou indireta na remoção dos contaminantes. Na direta, os contaminantes são absorvidos e metabolizados nos tecidos das plantas. Na forma indireta, a presença das plantas cria um ambiente favorável para uma atividade de microrganismos que degradam o contaminante, num processo semelhante à biorremediação (DE LUCENA TAVARES, 2013).

A eficiência desse tratamento depende da concentração do contaminante e a profundidade da contaminação sendo indicada para ser utilizada em conjunto com outras técnicas de tratamento como um processo final de polimento da remediação (CETESB, 2010).

A grande desvantagem da utilização desta tecnologia é o tempo elevado para obtenção de resultados com o tratamento.

2.2.5. Oxidação química

O processo de tratamento de solos contaminados por oxidação química ocorre através da injeção de agentes oxidantes no solo contaminado, como ozônio, peróxidos, permanganatos e persulfatos, que reagem com o contaminante oxidando-o em compostos menos nocivos ao solo como o gás carbônico e água. Neste tratamento, o agente oxidante é injetado no solo através de uma mistura superficial ou com uma injeção no interior do solo. Após injetado, o oxidante reage com os compostos contaminantes, quebrando suas moléculas e transformando-os em compostos menos nocivos ao meio ambiente (CETESB, 2010).

Os processos de oxidação química são classificados em processos oxidativos convencionais ou oxidativos avançados. Nos métodos convencionais, há a utilização de íons como agentes oxidante, como os permanganatos e persulfatos, por exemplo. O objetivo dos métodos oxidativos avançados é produzir a radical hidroxila que é fortemente oxidante e pouco seletivo (GRACIANO *et al.*, 2012).

A escolha do oxidante para o processo de descontaminação é realizada após a realização de testes em laboratório e aquele que possui a melhor reatividade com os contaminantes do solo é o indicado.

A maior dificuldade para esse processo, é a eficiência do processo de dispersão dos reagentes através do solo, pois se isso não for corretamente executado, há chance de se criar caminhos preferenciais na difusão do reagente no solo e consequentemente, não tratar todo o solo contaminado (CETESB, 2010).

2.3. LEIS E NORMAS AMBIENTAIS APLICÁVEIS

Segundo TROXLER *et al.*, (1993) as exigências regulamentárias para licenciamento de tecnologias de tratamento de resíduos podem influenciar consideravelmente os custos e o cronograma de um projeto instalação, pois etapas que deixam de ser cumpridas no licenciamento, podem acarretar em multas e atrasos que podem inviabilizar o projeto. Além disso, o local de instalação da planta influencia diretamente as diretrizes e procedimentos que devem ser seguidas no licenciamento.

Por isso, realizou-se o estudo a seguir para avaliar as principais leis e normas ambientais que devem ser seguidas na avaliação de solos contaminados e na instalação de tecnologias de tratamento térmico, mais especificamente no estado do Rio de Janeiro.

Na legislação brasileira não existe uma resolução específica que regula o processo de tratativas para áreas contaminadas. Porém, referindo-se à legislação ambiental atual, encontrase processos que abordam a classificação de solos segundo o grau de contaminação, itens que abordam a necessidade de preservação e/ou recuperação da qualidade dos solos e outros instrumentos legais presentes no Sistema Nacional de Meio Ambiente – SISNAMA, que definem diretrizes e normas para controle e tratamento da poluição (CETESB, 2010). O SISNAMA, presente no art. 6 da Lei Federal 6.938/81, é constituído pelos órgãos e entidades da União, dos Estados e do Distrito Federal, e dos Municípios e pelas Fundações instituídas pelo poder público responsável pela proteção e melhoria da qualidade ambiental. A Figura 2.3 ilustra um exemplo da estrutura do SISNAMA (MPRJ, 2016):



Figura 2.3. Organograma do SISNAMA no Estado do Rio de Janeiro.

Fonte: MPRJ (2016).

Da figura 2.3, têm-se:

Esfera Federal

- Conselho de Governo: órgão superior colegiado que reúne todos os ministros e a Casa Civil tendo por função assessorar a Presidência da República na formulação da política nacional e nas diretrizes governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais;
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente): órgão consultivo e deliberativo tendo por finalidade assessorar, estudar e propor ao Conselho de Governo, diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais e deliberar, no âmbito de sua competência, sobre normas

e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à sadia qualidade de vida;

- MMA (Ministério do Meio Ambiente): órgão central tendo por finalidade planejar, coordenar, supervisionar e controlar a política nacional e as diretrizes governamentais fixadas para o meio ambiente;
- IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis): órgão executor encarregado de executar e fazer executar as políticas e diretrizes governamentais definidas para o meio ambiente;
- ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade): órgão executor encarregado de executar a política de conservação da biodiversidade e as ações voltadas à gestão das unidades de conservação federais e suas zonas de amortecimento – integrante do Sistema Nacional de Unidades de Conservação.

• Esfera Estadual

- SEA (Secretaria Estadual do Ambiente): órgão central da administração estadual com função de formular e coordenar a política estadual de proteção e conservação do meio ambiente e de gerenciamento dos recursos hídricos, visando ao desenvolvimento sustentável;
- CECA (Comissão Estadual de Controle Ambiental): órgão colegiado vinculado à SEA a quem compete baixar normas ambientais e atos complementares necessários ao funcionamento do licenciamento ambiental; aplicar penalidades cabíveis aos infratores da legislação de controle ambiental; e dar solução final aos processos de licenciamento ambiental (Decreto n0 21.287/95);
- CONEMA (Conselho Estadual do Meio Ambiente): órgão deliberativo e normativo a quem cabe o estabelecimento das diretrizes da política estadual de controle ambiental (Decreto n° 40.744/07);
- INEA (Instituto Estadual do Ambiente): órgão executor de programas e projetos dirigidos à proteção, conservação e recuperação do meio ambiente e promoção do desenvolvimento sustentável (Lei n0 5101/07). Órgão oriundo da fusão da Fundação Estadual de Engenharia e Meio Ambiente (FEEMA), Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA) e do
Instituto Estadual de Florestas (IEF) que é estruturado em 9 Superintendências Regionais correspondente às regiões hidrográficas do Estado.

• ESFERA MUNICIPAL

- Secretaria Municipal de Meio Ambiente: órgão central da administração municipal composto de corpo técnico especializado e revestido de competência para a fiscalização e o licenciamento ambiental;
- Conselho Municipal de Meio Ambiente: órgão normativo, colegiado, consultivo e deliberativo de gestão ambiental, com representação da sociedade civil organizada;

Assim como explicado no caso de gerenciamento de áreas contaminadas, a dessorção térmica, diferentemente de outros processos térmicos, como o de incineração de resíduos perigosos, não possui resoluções, normas ou até mesmo diretrizes específicas no Brasil com padrões de emissão estabelecidos na legislação federal específicos para esse tipo de tecnologia. Entretanto, por similaridade de processos, utiliza-se algumas legislações de incineração de resíduos como base de referência para se definir critérios de desempenho para o processo de dessorção térmica. Utiliza-se a incineração como base de referência, pois após a dessorção dos contaminantes do solo no forno rotativo, o tratamento dos contaminantes da fase gasosa funciona na unidade como no processo de incineração de resíduos.

Sendo assim, três parâmetros são fundamentais para avaliação no processo de licenciamento e operação de uma planta de dessorção térmica. Para isso, referencia-se os itens mais importantes na legislação ambiental que regula cada parâmetro (BRASIL, 1988):

• Emissões Atmosféricas;

- Atendimento à Resolução CONAMA nº 316 e NBR 11.175;
- Classificação do solo contaminado antes e após o tratamento;
 - Atendimento à Resolução CONAMA nº 420;
- Eficiência de Remoção e Destruição dos contaminantes;
 - Atendimento à Resolução CONAMA nº 316 e NBR 11.175;

Além disso, no estado do Rio de Janeiro existe a DZ-1314.R-0 – *Diretriz para licenciamento de processos de destruição térmica de resíduos* – que pode ser utilizada como um guia para o processo de licenciamento para o processo de Dessorção Térmica, como parte integrante do Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras – SLAP (CECA, 1993).

Resumidamente, segundo a DZ-1314.R-0, as etapas a serem cumpridas para o licenciamento são (CECA, 1993):

- Obtenção de Licença Prévia LP, Licença de instalação LI e Licença de Operação – LO, sendo que as instruções necessárias para enquadramento a SLAP, estão todas contidas na IT-1315.R-0 – *Instrução técnica para requerimento de licenças para unidades de destruição térmica de resíduos*;
- Realização de Estudo de Impacto Ambiental EIA e do Relatório de Impacto Ambiental – RIMA;
- Realização de Teste de Queima com as seguintes etapas:
 - Plano do teste de queima;
 - Após aprovação do plano, realizar o teste com acompanhamento do órgão ambiental;
 - Elaboração do relatório com os resultados e apresentação do mesmo ao órgão ambiental que avaliará a liberação da LO;

2.3.1. Normas aplicáveis para os padrões de emissão e licenciamento de plantas térmicas

Em esfera nacional, existe a Resolução CONAMA Nº 316, de 29 de outubro de 2002 – *Procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos* – define tratamento térmico como "qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura de mínima de oitocentos graus célsius" (BRASIL, 2002). O processo de dessorção térmica não atinge valores de temperatura superiores a 648°C (ANDERSON, 1993).

A EPA (1997) define a dessorção térmica como um processo de separação física, não sendo um processo de incineração, pois a destruição dos constituintes orgânicos não é o resultado desejado, mas sim sua dessorção. Além disso, existem padrões de emissão para processos como de coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, incineração de resíduos

de serviços de saúde. A dessorção térmica não se enquadra nestes tipos de processo pois não ocorre a transformação, incineração ou fundição dos materiais.

A *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA) é aplicada nos EUA nos casos em que a planta esteja tratando resíduos classificados como Classe I - Perigosos. Neste caso, como não existe categoria específica para dessorção térmica na RCRA, a dessorção térmica tem sido caracterizada como incinerador ou fornalha industrial.

Uma análise detalhada do CONAMA 316 e da NBR 11.175 – *Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho* – que se baseia na própria Resolução, mostrou que algumas ações devem ser tomadas antes da montagem e outras devem ser atendidas para que o processo de licenciamento seja bem-sucedido (BRASIL, 2002) e (ABNT, 1990). Segue trechos extraídos da própria Resolução:

Art. 90 A instalação de sistemas de tratamento térmico de resíduos industriais deve atender à legislação em vigor, não podendo ser instalado em áreas residenciais.

Art. 11. Todo sistema de tratamento térmico para resíduos industriais deverá atingir a taxa de eficiência de destruição e remoção (EDR) superior ou igual a noventa e nove inteiros e noventa e nove décimos por cento para o principal composto orgânico perigoso (PCOP) definido no teste de queima.

Parágrafo único. No caso de bifenilas policloradas (PCBs), a taxa de eficiência de destruição e remoção (EDR) deverá ser superior ou igual a noventa e nove inteiros e noventa e nove décimos por cento.

O Cálculo da EDR, segundo a NBR 11.175 é feito de acordo com a Equação 2.2:

$$EDR = \frac{\left(PCOP^{ENTRADA} - PCOP^{SAIDA}\right)}{\left(PCOP^{ENTRADA}\right)} \times 100$$
(2.2)

EDR = Eficiência de Destruição e Remoção;

PCOP^{ENTRADA} = Taxa de alimentação de PCOP na entrada do resíduo. [kg/h];

PCOP^{SAIDA} = Taxa de saída de PCOP na saída do resíduo. [kg/h];

Art. 26. O processo de licenciamento das unidades de tratamento térmico de resíduos será tecnicamente fundamentado com base nos estudos, a seguir relacionados, que serão apresentados pelo interessado:

I - Projetos Básico e de Detalhamento;

II - Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) ou outro estudo, definido pelo órgão ambiental competente;

III - Análise de Risco;

IV - Plano do Teste de Queima (anexo II da RESOLUÇÃO);

V - Plano de Contingência (anexo III da RESOLUÇÃO);

VI - Plano de Emergência (anexo IV da RESOLUÇÃO).

§ 10 O prazo máximo de vigência da licença de operação será de cinco anos.

§ 20 A periodicidade dos testes para verificação de conformidade dos limites máximos de emissão e os demais condicionantes da Licença de Operação, bem como outros procedimentos não elencados, deverão ser fixados a critério do órgão ambiental competente.

§ 30 Na hipótese de encerramento das atividades, o empreendedor deverá submeter ao órgão ambiental competente o Plano de Desativação do sistema (anexo V), obtendo o devido licenciamento.

Art. 29. A primeira verificação do cumprimento aos Limites Máximos de Emissão será realizada em plena capacidade de operação e deve necessariamente preceder à expedição da Licença de Operação (LO), que por sua vez não poderá ultrapassar os seis meses do início da partida da unidade.

Parágrafo único. A realização de teste de queima é obrigatória por ocasião do licenciamento, renovação de licença, além de toda e qualquer modificação das condições operacionais. Além disso, as emissões gasosas do sistema para a atmosfera devem satisfazer as condições estipuladas no CONAMA 316. Conforme a Tabela 2.7 apresenta, essas emissões são relacionadas à porcentagem de oxigênio de 7% O₂ (vol% base seca) na chaminé (BRASIL, 2002).

Composto	Quantidade	Unidade
Material Particulado	70	mg/Nm ³
SOx	280	mg/Nm ³
HCl	1,8	kg/h
HF	5	mg/Nm ³
СО	100	ppm
C_xH_y	20	mg/Nm ³
NO _x	560	mg/Nm ³

Tabela 2.7 – Padrão de emissão atmosférica.

Fonte: BRASIL (2002).

2.3.2. Normas aplicáveis para os padrões de classificação de solo

Em dezembro de 2009, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com a Resolução nº 420/2009 – 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. –, definiu formas de classificação da qualidade do solo segundo a concentração de uma gama variada de substâncias químicas. Neste aspecto, algumas definições, conforme artigo 6º, são adotadas para classificação do solo (BRASIL, 2009):

- Valor de Referência de Qualidade VRQ:
 - É definida como a concentração em que todas as substâncias químicas presentes no solo são de suas características naturais, sem interferências antrópica, com base em análises físico-químicas de diferentes tipos de solo.
- Valor de Prevenção VP:

- É a concentração limite de determinada substância química no solo, que se ultrapassada, podem ocorrer prejuízos à qualidade do solo e dos lençóis freáticos.
- Valor de Investigação VI:
 - É a concentração de determinada substância química que se ultrapassada apresenta fortes riscos à saúde humana e a toda biota local.

Sendo assim, segundo essa Resolução, os solos são subdivididos em classes, conforme (BRASIL 2009):

Art. 13. Ficam estabelecidas as seguintes classes de qualidade dos solos, segundo a concentração de substâncias químicas:

- I Classe 1 Solos que apresentam concentrações de substâncias químicas menores ou iguais ao VRQ;
 - II Classe 2 Solos que apresentam concentrações de pelo menos uma substância química maior do que o VRQ e menor ou igual ao VP;
 - III Classe 3 Solos que apresentam concentrações de pelo menos uma substância química maior que o VP e menor ou igual ao VI; e
 - IV Classe 4 Solos que apresentam concentrações de pelo menos uma substância química maior que o VI.

Após a classificação do solo, medidas de prevenção, controle e restauração da qualidade do solo devem ser tomadas de acordo com a classe na qual está inserido. Segundo o Artigo 20, do CONAMA 420, as medidas são (BRASIL, 2009):

- Classe 1: Nenhuma ação precisa ser tomada;
- Classe 2: O Órgão Ambiental pode requerer uma avaliação da área para investigar se há fontes de poluição antrópicas ou de ocorrência natural e quando houver necessidade determinar ações preventivas de controle;

- Classe 3: O Órgão Ambiental deve requerer a identificação da fonte de contaminação, avaliando se a mesma ocorreu de forma natural ou não, requerendo o controle da fonte e o monitoramento do solo e dos lençóis freáticos;
- Classe 4: O Órgão Ambiental deverá requerer ações de gerenciamento das áreas contaminadas.

Após o tratamento do solo, de acordo com o padrão de recuperação do solo e presença das substâncias químicas no mesmo, ele pode ser enquadrado em solos sob investigação (BRASIL, 2009):

- Padrão agrícola: O solo pode ser reutilizado para fins agrícolas;
- Padrão Residencial: O solo pode ser reutilizado em locais residenciais;
- Padrão Industrial; O solo pode ser reutilizado em locais industriais;

2.4. ECOINDICADORES

Atualmente, as indústrias em geral, devem ter inseridas em seu *core-business* os conceitos de desenvolvimento sustentável a fim de minimizar os impactos socioambientais aos *stakeholders* que antes não eram valorizados como hoje, tais como, a sociedade e o meio ambiente, quando comparados e levados em consideração aos índices de produção e econômicos. Isso gerou como consequência uma maior conscientização das empresas em alinhar o seu desenvolvimento econômico e de produção, ao meio ambiente. Somando-se a isso, um dos catalisadores para essa maior conscientização é o aumento de fiscalizações e apelo realizado pela mídia nos problemas ambientais, o que levam as empresas a investirem nesse quesito a fim de não terem passivos econômicos, com multas, e na imagem da empresa, o que na soma geral, impacta consideravelmente o resultado final da Companhia. (PEREIRA, 2013)

A utilização de recursos de forma mais eficiente aliado ao conceito de denegrir o menos possível o meio ambiente, antes pareciam duas variáveis inversamente proporcionais, pois acreditava-se que para produzir mais, maior quantidade de recursos deveria ser explorada. Porém, com o passar recente dos anos, essa visão mudou e o desafio principal das empresas, é alinhar a redução de custos operacionais, impactando o meio ambiente e a sociedade da menor

maneira possível, a fim de que seus produtos cheguem ao mercado com preços mais competitivos em sinergia com a sustentabilidade.

A partir dessa ideia as empresas precisaram criar métricas para o desempenho de sustentabilidade e/ou Impacto ambiental de seus processos. Nesse conceito, surge o desenvolvimento de ecoindicadores, que nada mais são que indicadores de ecoeficiência que monitoram o processo operacional e auxiliam na tomada de decisões. Esses indicadores podem servir também para Comparação do desempenho ambiental de empresas de mesmo segmento a fim de medir as que apresentam uma produção mais limpa em um período de tempo.

Segundo UNCTAD (2004), os principais objetivos da utilização de ecoindicadores são comparar o desempenho ambiental de uma empresa frente ao seu desempenho produtivo e/ou financeiro, facilitar a tomada de decisões pelos gestores com dados econômicos e ambientais, permitindo assim a avaliação dos Impactos das decisões tomadas e complementar as demonstrações de resultados financeiros – DRE – das empresas, comparando os índices de ecoeficiência no atual momento e no futuro frente o desempenho econômico.

Um dos pontos a serem apresentados nesse trabalho é a estimativa quantitativa, através da construção de ecoindicadores, de o quanto uma Unidade de Dessorção Térmica se torna mais eficiente e sustentável quando sugerimos a melhoria de processo no tratamento de solos contaminados por hidrocarbonetos e/ou organoclorados. Os parâmetros a serem avaliados e comparados serão o consumo de combustível (diesel), emissão de CO₂ e consumo de água no tratamento de solo cujo os dados para a construção desses indicadores serão obtidos via simulação por balanços de massa e energia no *software Maple*.

2.4.1. Construção de ecoindicadores

Ecoindicadores podem ser calculados pela relação de uma variável ambiental e uma variável econômica, ou seja, um item ambiental dividido por um item financeiro. Eles devem apresentar informações simples, claras e objetivas. O item financeiro da relação pode ser exposto de duas formas, sendo uma através da capacidade de produção ou através da receita gerada por essa mesma produção. (SIITONEN, *et al.*, 2010). No caso desse trabalho, a variável econômica é a capacidade de tratamento de solo contaminado da Unidade de Dessorção Térmica.

Sendo assim, os indicadores são calculados, conforme a Equação 2.3:

$EI_{ambiental}$

$$= \frac{[Variável ambiental (consumo de diesel, água, emissão de CO_2)]}{[Variável econômica (capacidade produtiva)]}$$
(2.3)

Dessa forma, conforme menor o valor do ecoindicador ambiental, melhor é a ecoeficiência.

A fim de se deixar a comparação entre os ecoindicadores claros e objetivos, é utilizada a metodologia proposta por (PEREIRA, 2013), que consiste na criação de um Índice de Comparação de Ecoeficiência – ICE. Nessa solução, os ecoindicadores são analisados em índices que devem ser agrupados e padronizados permitindo assim a construção de gráficos do tipo "radar".

A padronização e aglutinação dos ecoindicadores é realizada através da normalização deles. Ou seja, realiza-se o adimensionamento através da divisão de todos os resultados de cada ecoindicador (emissão de CO₂ (kg/t_{processada}), consumo de combustível (L/t_{processada}), consumo de água, (m³/t_{processada})) pelo maior resultado respectivo de cada categoria encontrada na análise de cada ecoindicador na comparação entre os processos, que neste caso representa o pior cenário ambiental. Tal normalização é necessária para remover as unidades dos ecoindicadores, de forma a permitir que sejam avaliados cada categoria de forma conjunta, como num índice.

Dessa forma, garante-se que os resultados estarão adimensionados e que os valores encontrados estarão sempre entre 0 e 1, de forma que quanto mais próximo de 0, melhor será o cenário ambiental analisado daquele ecoindicador normalizado.

Logo, o desempenho de uma unidade industrial, em certo período, pode ser comparado em relação a outro por meio da área do polígono gerado no gráfico por esses ecoindicadores normalizados. Uma representação pode ser visualizada na Figura 2.4 (PEREIRA, 2013):



Figura 2.4 – Gráfico polígono de eco indicadores, representado cinco indicadores normalizados.

Conforme representado na Figura 2.4, no polígono formado, cada eixo representa um ecoindicador. O gráfico radar apresenta eixos equidistantes originados em um mesmo centro de maneira que todos os ângulos entre eles tenham o mesmo valor. Os eixos adjacentes do gráfico juntamente com a reta formada pela distância de dois pontos dados pelos valores apresentados nestes eixos formam triângulos de, pelo menos, um ângulo conhecido e idêntico aos demais ângulos comuns ao centro (uma vez que os eixos são equidistantes e dividem-se em uma volta completa – 360°).

O procedimento utilizado para avaliar um determinado processo no ponto de vista ambiental se baseia no cálculo da área do polígono. Para calcular a área dos triângulos formados no gráfico utiliza-se a lei dos senos. Para ilustração, a Figura 2.5 representa um triângulo ABC de lados l_A , l_B e l_C e altura h, o qual divide o lado l_C em segmentos m e n.



Figura 2.5 – Área de um dos cinco triângulos formados no polígono

Ia e Ib representam dois ecoindicadores normalizados.

Ao aplicar a lei dos senos sobre o triangulo da Figura 2.5 a área resultante do triangulo

$$S_{AB} = \left(\frac{I_A \times I_B}{2}\right) \times sen(\theta) \tag{2.4}$$

 $\boldsymbol{\theta}$ representa o ângulo entre os lados I_A e I_B, onde $\boldsymbol{\theta} = \alpha + \beta$.

Logo, é possível calcular a área (adimensional) resultante, Figura 2.6, aplicando a lei dos senos sobre cada triângulo (i) do polígono, conforme Equação 2.5. Nesse exemplo, seria o somatório da área dos cinco triângulos, onde i = 5.

$$S_t = \sum_i S_i \tag{2.5}$$

 $\mathbf{S}_{\mathbf{t}} =$ Area total.

é:

 $S_{i=}$ área de cada triângulo.



Figura 2.6 – Representação da área resultante no gráfico radar

Fonte: PEREIRA (2013).

Consequentemente, o índice comparativo de ecoeficiência (ICE), utilizado para contabilizar quantitativamente o ganho em ecoeficiência entre dois ou mais grupos de mesmos ecoindicadores, é representado por:

$$ICE = \left(1 - \frac{S_t}{S_t^*}\right) \times 100\% \tag{2.6}$$

 $S_t^* =$ Área do polígono de referência de maior área (pior cenário ambiental)

Para o cálculo de n ecoindicadores (n>2), a Equação 2.6 do ICE, pode ser escrita de modo generalizada conforme a Equação 2.7:

$$ICE = \frac{1}{2} \times sen\left(\frac{2\pi}{x}\right) \times \left(I_i \times I_n + \sum_{i=1}^{n-1} I_1 \times I_{n+1}\right)$$
(2.7)

Dessa forma, tem-se definido uma metodologia para comparar diferentes tecnologias ou processos operacionais na indústria.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE PROCESSO

Toda a descrição do processo apresentada neste capítulo foi baseada no sistema móvel da Ecotechnieek (METTS – *Mobil Ecotechnieek thermal Treatment System*). Logo, o objetivo deste capítulo é explicar o funcionamento da planta e dos principais equipamentos do sistema para facilitar o entendimento do processo de simulação.

3.1. MONTAGEM DA PLANTA

Com o objetivo de se obter o máximo de mobilidade, todos os componentes são integrados, ou possuem a dimensão de containers oceânicos padrões. Por essa razão todos os equipamentos que integram a Unidade podem ser transportados em carretas equipadas para transporte de containers. Logo, o fato de a Unidade ser toda modularizada facilita todo o processo de montagem e desmontagem em diferentes lugares para tratamento, conforme Figura 3.1.

Segundo Stubbs e Emes (1990), plantas modulares para processos químicos são utilizadas desde a década de 70 com grandes vantagens em relação a plantas convencionais, pois diminuem consideravelmente o tempo de montagem da planta e consequentemente os custos caem, o projeto é facilmente replicado e o transporte para lugares remotos é facilitado. Além disso, o comissionamento de cada módulo é facilitado e problemas podem ser resolvidos antes da transferência da planta de tratamento.

Além disso, outra vantagem da UDT ser modularizada é a padronização da montagem. Uma vez definido o passo a passo, o mesmo é replicado nos diferentes sites em que a Unidade for instalada, diminuindo os riscos no campo.



Figura 3.1 – Montagem e desmontagem da UDT.

3.2. O PROCESSO DE TRATAMENTO

A operação básica da planta, Figura 3.2, se baseia na vaporização de componentes do solo que são classificados como contaminantes. A vaporização é obtida pela elevação da temperatura do solo contaminado por um período de tempo em que os componentes previamente mencionados passam para o estado gasoso.



Figura 3.2 – Unidade de Dessorção Térmica.

A Figura 3.3 descreve o processo de forma ilustrativa e 3-D a fim de se buscar um melhor entendimento do tratamento de solo na TDU.



Figura 3.3 – Fluxograma de processo ilustrado da Unidade de Dessorção Térmica.

Os contaminantes do solo são vaporizados no Forno Rotativo gerando uma corrente gasosa e uma de solo limpo. A corrente gasosa segue para um sistema de desempoeiramento, no qual são removidas partículas arrastadas de solo contaminado. Com isso, a corrente gasosa segue para o Forno de Pós Combustão (FPC), sendo previamente pré-aquecida no trocador de calor (TC). No FPC os contaminantes são destruídos por vias oxidativas (oxidação total dos componentes) em temperaturas elevadas. Após o FPC, a corrente gasosa retorna para o TC que pré-aquece os gases contaminados de entrada do FPC, conforme explicado previamente. Esse sistema de reaproveitamento energético, baseado no aproveitamento da corrente dos gases de exaustão da pós-combustão, representa uma economia em custos para a instalação industrial através da economia do combustível dos fornos e consequente significativa vantagem ambiental para um sistema de tratamento de gases. O sistema de tratamento dos gases consiste em um resfriamento gasoso, através de um resfriador com água e uma lavagem alcalina dos gases ácidos no lavador de gases.

A poeira arrastada pelos gases é recuperada em um filtro de mangas e seus contaminantes são vaporizados em uma câmara de queima secundária denominada queimador de Pó, antes de ser enviada para o resfriador de solo, onde se encontra com o solo tratado no forno. O solo tratado passa no resfriador de solos para redução de temperatura e emissão de poeira antes de ser descarregado da Unidade.

Compostos inorgânicos ácidos, como o HCl, SO_x e HF são convertidos em componentes não perigosos no lavador de gases através de um processo de neutralização com NaOH. Esse eficiente sistema de lavagem e neutralização de gases presente na TDU possibilita realizar o tratamento de solos contaminados com compostos organoclorados, pesticidas, PCBs, dioxinas e furanos.

Nos tópicos seguintes são detalhadas as rotas do tratamento do solo, o fluxo dos gases de exaustão, fluxo de água e principais equipamentos.

3.2.1. Fluxo do Solo

A Figura 3.4 apresenta o fluxo de solo na UDT de forma ilustrativa.



Figura 3.4 – Fluxograma de solo ilustrado da Unidade de Dessorção Térmica.

Na alimentação do solo no forno rotativo, uma pá mecânica é usada para depositar o solo contaminado em uma tremonha de alimentação. O solo é transportado então para o forno rotativo por uma cinta transportadora e alimentado no forno por uma rosca de alimentação.

O processo de dessorção no forno rotativo acontece por aquecimento direto, ou seja, contato do solo com a chama do maçarico. O fluxo de solo dentro do forno rotativo é em contracorrente à chama do maçarico, por isso, no início da alimentação onde o calor é menor e conforme o solo se aproxima da região do maçarico, o processo de dessorção dos contaminantes começa a acontecer.

O solo limpo sai do forno rotativo e é levado para um resfriador de solo, onde água é usada para resfria-lo e umidifica-lo de tal forma que emissões de poeiras não ocorram durante a armazenagem e posteriores transportes do solo limpo.

3.2.2. Fluxo do gás de exaustão

Os gases produzidos no forno rotativo podem ser classificados como sendo de três origens:

- Gases de exaustão provenientes da queima do óleo e petróleo;
- Vapor de água proveniente do solo;
- Componentes líquidos e sólidos proveniente do solo contaminado e convertidos em componentes gasosos à elevada temperatura.

O gás de exaustão é desempoeirado em um filtro coletor de pó (Filtro de Mangas) e posteriormente aquecido em um trocador de calor (TC).

No FPC com queimador a óleo diesel, serão oxidados todos os componentes. O gás de exaustão de pós-combustão transfere uma grande parte de seu calor para o TC e o restante de seu resfriamento é realizado pelo resfriador de gases denominado (Resfriador).

O Resfriador, localizado antes do Lavador de Gases, tem a função de resfriamento abrupto do gás de saída do trocador de calor, corrente quente, de forma a evitar a formação de dioxinas e furanos, quando o tratamento de organoclorados é realizado. Ainda assim, o gás de exaustão resultante deste processo pode estar contaminado por agentes acidificantes como HCl, SO₂ e HF em concentrações nas quais não são permitidas a sua liberação na atmosfera. Devido a isso, um lavador de gás está presente após o Resfriador, onde estes componentes são neutralizados com Soda (NaOH) por absorção. Desta forma, a emissão atmosférica atende às especificações do CONAMA 316.

3.2.3. Fluxo de pó e água

O pó do filtro de mangas pode estar altamente contaminado com compostos orgânicos e inorgânicos arrastados no processo de dessorção no forno rotativo. Por isso, este pó é transportado por um sistema de roscas para um Queimador de Pó. Este queimador aquece o pó até uma temperatura suficiente para vaporizar os compostos orgânicos e inorgânicos presentes.

Após o processamento no queimador, a poeira é transportada até o Resfriador de Solo, onde este é misturado ao solo tratado.

A água do Lavador de Gás, dependendo da presença de agentes acidificantes no gás de exaustão, pode estar carregada com vários sais. Esta água é reusada o máximo possível para resfriar e umidificar o solo no Resfriador de Solos.

3.2.4. Condições de Processo

As condições de processo que serão consideradas para a simulação são baseadas no manual de operação do equipamento, considerando as seguintes situações e limites apresentados na Tabela 3.1:

Variável	Condição
Temperatura do Forno Rotativo	250°C a 600°C
Temperatura de Saída dos Gases na Chaminé	70°C a 85°C
Temperatura de Saída do Solo na Cinta de Descarga	< 100°C
Temperatura dos Gases na Forno de Pós-Combustão	$800^{\circ}C < T < 1200^{\circ}C$
Temperatura de Entrada dos Gases na Forno de Pós-Combustão	< 650°C
Vazão de Alimentação de Solo Contaminado	10,0 t/h
Temperatura de Entrada dos Gases no Resfriador	$550^{\circ}C < T < 750^{\circ}C$
Valor de pH na Saída do Resfriador	> 5
Temperatura dos Gases na Saída do Forno Rotativo	< 220°C

Tabela 3.1 – Condições de Processo da UDT.

Fonte: ECOTECHNIEK BODEM BV (1998).

3.2.5. Equipamentos principais do processo

3.2.5.1. Forno Rotativo

A temperatura do solo durante um processo de descontaminação numa UDT pode ser dividida em duas fases:

- Secagem (Fase 1);
- Vaporização / dessorção (Fase 2);

A Fase 1 ocorre até temperaturas próximas a 250 °C e tem o objetivo de remover água do solo. Ela ocorre no início da alimentação de solo do forno, onde o calor é menor que na região final do forno em que está presente o maçarico. A secagem consiste na evaporação da umidade presente no solo. Esta água pode se encontrar na forma livre, ligada fisicamente ou ligada quimicamente.

Nessa etapa, quando a temperatura atinge o ponto de ebulição da água, a água livre se evapora passando para a fase gasosa. A velocidade de evaporação é função direta da quantidade de calor introduzida no sistema.

É importante mencionar que nesta temperatura os hidrocarbonetos leves serão igualmente evaporados nesta fase de tratamento.

A Fase 2, de aquecimento direto no forno, ocorre em temperaturas na faixa entre 250 °C a 600 °C. Nela acontecerá a vaporização dos contaminantes do solo. A Tabela 3.2 apresenta a temperatura de ebulição de possíveis contaminantes num solo.

Componentes	Temperaturas de ebulição (ºc)
BTEX	50 - 200
Óleo Mineral	150 - 300
CN	Aproximadamente 400
PAH's	200 - 475
EOX	
- HCB	< 300
- HCH	< 350
- PCB's	< 400
Hg	< 600
Hexacloroetano	185
Clorobenzeno	131
Tricloroetileno	86,7
Tetracloreto de Carbono	76,7

Tabela 3.2 – Pontos de ebulição de possíveis contaminantes em um solo.

Fonte: Adaptado de Green e Perry (2007).

No caso da simulação proposta neste trabalho, utilizaremos o Hexacloroetano – $HCE - C_2Cl_6$ como contaminante organoclorado devido a seu elevado grau de dificuldade de destruição térmica de acordo com o ranking de incinerabilidade de composto orgânicos perigosos. (OPPELT, 1987)

3.2.5.2. Forno de Pós-Combustão

O FPC é uma das partes mais importantes do processo de destruição/transformação do contaminante. As principais condições de processo que devem ser respeitadas nele são:

- As temperaturas são suficientemente altas para garantir a completa destruição dos contaminantes, entre 800 e 1.200 °C;
- Os gases contaminantes ficarão por no mínimo 2 segundos no FPC para que a destruição seja eficiente;
- A mistura e turbulência dentro do FPC são necessárias para a eficiência na destruição dos contaminantes e para a prevenção de fluxos preferenciais;

 A concentração de oxigênio no FPC será controlada em 6% volume seco, valor suficiente para ocorrer a oxidação dos contaminantes à CO₂, H₂O e HCl (no caso dos organoclorados).

É importante se atentar que durante a vaporização no forno rotativo a matéria orgânica pode formar dioxinas, furanos e seus percussores, na presença de oxigênio e cloro. Porém, o FPC é capaz de destruí-los devido a sua temperatura elevada. Uma posterior formação dos compostos supracitados é evitada com um resfriamento abrupto no Resfriador. O resfriamento brusco até temperaturas abaixo dos 100 °C garante que não se formem dioxinas e furanos, pois somente na faixa de temperatura de 250 a 400 °C que normalmente ocorre tal formação (EPA, 1998).

3.2.6. Capacidade de tratamento da Unidade de acordo com o tipo de contaminação

A capacidade típica de tratamento da UDT é apresentada na Tabela 3.3:

Composto	Quantidade
PAH's	15.000 mg/kg de Solo Seco
Óleo Mineral	15.000 mg/kg de Solo Seco
BTEX (Mono aromáticos)	25.000 mg/kg de Solo Seco
Fenol	15.000 mg/kg de Solo Seco
EOX:	
HCH, drins (pesticidas)	
- Solventes	5.000 mg/kg de Solo Seco
- MCB	
- PCB	
Dioxinas / Furanos	40.000 ng/kg de Solo Seco
Material pirotécnico	45.000 mg/kg de Solo Seco
Enxofre	0,5% em peso
Cianetos (Totais)	1.000 mg/kg de Solo Seco
Umidade	20% em peso
Valor Energético	1.000 kJ/kg de Solo Seco
Teor de cloro	30 kg/h

Tabela 3.3 – Capacidade de Tratamento máximo da UDT de acordo com o tipo de
contaminação.

Essas concentrações são valores aproximados que garantem que após o tratamento o solo possuia características de solo limpo de acordo com o CONAMA 420. Valores de concentrações maiores podem ser aceitos para tratamento, porém é exigido que seja feito um *blend* com solo limpo de forma a adequá-lo aos critérios apresentados na Tabela 3.3.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Nesse capítulo são apresentados a metodologia e as premissas utilizadas para desenvolver matematicamente a simulação da UDT variando a concentração do contaminante (HCE) e de umidade no solo, obtendo-se assim um conjunto de resultados que possibilita o desenvolvimento dos indicadores ambientais: consumo de combustível, emissão de CO₂ e consumo de água.

A partir desses resultados, são avaliadas oportunidades de melhorias no processo que permitam um ganho na eficiência desses indicadores ambientais, simulando matematicamente a unidade com a melhoria apresentada.

Finalmente, para quantificar o ganho em ecoeficiência do processo (representado por esses indicadores) utiliza-se o método do Índice de Comparação de Ecoeficiência (ICE), que de maneira simplificada agrupa esses indicadores. Resumindo, as etapas se dividem em:

- Desenvolvimento do modelo matemático, com base nos balanços de massa e energia da UDT;
- Simulação da UDT, com base no modelo, para as condições de operação padrão ou típicas;
- Apresentação da oportunidade de melhoria, com base nos resultados preliminares da simulação;
- Simulação da UDT, com base no modelo, para as condições com a melhoria de processo sugerida;
- Desenvolvimento dos ecoindicadores antes e pós melhoria;
- Avaliação dos ganhos de forma gráfica;
- Avaliação quantitativa do ganho em ecoeficiência, com base na metodologia ICE.

4.1. SIMULAÇÃO DA UNIDADE DE DESSORÇÃO TÉRMICA

O desenvolvido matemático da simulação será realizado através de balanços de massa e energia, utilizando-se o *Maple*, um *software* matemático licenciado para a Universidade Federal Fluminense que se baseia em um sistema algébrico computacional e é desenvolvido pela *Maplesoft*, uma empresa canadense.

4.1.1. Condições de processo

A Figura 4.1 ilustra o fluxograma de processo resumido da Unidade apresentada no capítulo 3, que servirá como base para os balanços.



Figura 4.1. Fluxograma de processo resumido da UDT.

Observa-se pela Figura 4.1, que é considerada uma unidade com a seguinte estrutura básica: forno rotativo, trocador de calor, forno de pós combustão e resfriador. Os outros

equipamentos de processo de tratamento (ciclone, filtro de mangas e ventilador) foram desconsiderados do sistema pois a passagem dos gases neles não gera alterações significativas que influenciem no balanço de massa e energia da unidade.

As condições de processo adotadas para a realização da simulação serão baseadas no manual de operação do equipamento, conforme apresentado nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4:

Temperatura Ambiente	25 °C	
Temperatura de Saída dos Gases	220 °C	
Temperatura de Saída do Solo Limpo	400 °C	
Vazão de Entrada de Solo Contaminado	10 t/h	
% de Oxigênio nos Gases de Saída	6 %	

Tabela 4.1 – Condições de processo no Forno Rotativo.

Fonte: ECOTECHNIEK BODEM BV (1998).

Corrente fria	
Temperatura de entrada dos gases	220 °C
Temperatura de saída dos gases	Varia de acordo com o % de contaminante e teor de umidade no solo
Corrente quent	te
Temperatura de entrada dos gases	950 °C
Temperatura de saída dos gases	750 °C

 Tabela 4.2 – Condições de processo no trocador de calor.

Fonte: ECOTECHNIEK BODEM BV (1998).

Tabela 4.3 – Condições de processo no forno de pós-combustão.

Temperatura de Saída dos Gases	950 °C
% de Oxigênio nos Gases de Saída	6 %

Fonte: ECOTECHNIEK BODEM BV (1998).

Tabela 4.4 – Condições de processo no resfriador.

Temperatura de saída dos gases	/0 °C	
Transmission de secole de secone		
Temperatura de entrada dos gases	750 °C	

Fonte: ECOTECHNIEK BODEM BV (1998).

4.1.2. Balanço de massa e energia da Unidade

Para realização dos balanços, precisou-se definir algumas premissas de alguns componentes de entrada que não possuem uma composição química determinada, como o óleo diesel e o solo.

O óleo diesel, cuja queima irá gerar energia para aquecimento do solo e consequentemente dessorção do contaminante e de outros componentes voláteis, possui uma estrutura complexa devido ao grande número de hidrocarbonetos pesados que o constituem. Por isso, considera-se o óleo diesel como o hidrocarboneto que o constitui em maior quantidade, sendo um alcano, $C_{13}H_{28}$. (BRAGA, 2006)

Para definição das propriedades físico-químicas do tipo de solo a ser considerado nesse estudo, escolhe-se o solo do tipo argiloso, por ser um dos que existem em maior abundância no Brasil, conforme Figura 4.2 (COELHO *et al.*, 2013).



Figura 4.2. Mapa dos tipos de solo no Brasil.

Fonte: Coelho et al. (2013)

Os fluxogramas das Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram as entradas e saídas dos componentes em cada equipamento de processo com suas respectivas condições de processo.



4.1.2.1. Forno rotativo

Figura 4.3. Fluxo de entrada e saída no forno rotativo.

a. Balanço de massa no forno rotativo por elemento químico:

As Tabelas 4.5 e 4.6, e as Equações 4.1 a 4.6 detalham a modelagem matemática do forno rotativo.

Itens de entrada	Componentes
Solo contaminado	$H_2O_{(l)}$ - $C_2Cl_{6(s)}$ - $Argila_{(s)}$
Combustível óleo diesel	$C_{13}H_{28(l)}$
Ar	$\mathbf{O}_{2(g)}$ - $\mathbf{N}_{2(g)}$

Tabela 4.5 – Componentes de entrada do forno rotativo.

Itens de saída	Componentes
Solo limpo	Argila _(s)
Gases de saída do forno rotativo	$\begin{array}{c} H_2O_{(g)} \ - \ C_2Cl_{6(g)} \ \ O_{2(g)} \ \ N_{2(g)} \\ CO_{2(g)} \end{array}$

Tabela 4.6 – Componentes de saída do forno rotativo.

• Balanço de massa para o oxigênio (O);

$$mO_{Solo\ Contaminado} + mO_{Ar\ F.R.} = mO_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{i}da\ do\ F.R.}$$
(4.1a)

$$mO_{Solo\ Contaminado} = \%O_{H2O} \times mH_2O_{Solo\ Contaminado}$$
(4.1b)

$$mO_{Ar F.R.} = \%O_{Ar} \times m_{Ar F.R.} \tag{4.1c}$$

 $mO_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{l}da\ do\ F.R.}$

$$= \% O_{H2O} \times mH_2 O_{Saida \ do \ F.R.} + mO_2 Saida \ do \ F.R.} + \% O_{CO2}$$
(4.1d)
$$\times mCO_{2Saida \ do \ F.R.}$$

• Balanço de massa para o Carbono (C);

$$mC_{Solo\ Contaminado} + mC_{Combustível\ doF.R.} = mC_{Gás\ de\ Saída\ do\ F.R.}$$
(4.2a)

$$mC_{Solo\ Contaminado} = \%C_{C_2Cl_6} \times mC_2Cl_{6Solo\ Contaminado}$$
(4.2b)

$$mC_{Combustivel \ do \ F.R.} = \%C_{Diesel} \times m_{Diesel \ F.R.}$$

$$(4.2c)$$

mC_{Gás de} Saída do F.R.

$$= \% C_{CO_2} \times mCO_{2Saida \ do \ F.R.} + \% C_{C_2Cl_6} \times mC_2Cl_{6Saida \ do \ F.R.}$$
(4.2d)

• Balanço de massa para o Hidrogênio (H);

 $mH_{Solo\ Contaminado} + mH_{Combustível\ doF.R.} = mH_{G\acute{a}s\ de\ Saída\ do\ F.R.}$ (4.3a)

$$mH_{Solo\ Contaminado} = \%H_{H_20} \times mH_2O_{Solo\ Contaminado}$$
(4.3b)

$$mH_{Combustivel \ do \ F.R.} = \%H_{Diesel} \times m_{Diesel \ F.R.}$$

$$(4.3c)$$

$$mH_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{i}da\ do\ F.R.} = \%H_{H_2O} \times mH_2O_{Sa\acute{i}da\ do\ F.R.}$$
(4.3d)

• Balanço de massa para o Nitrogênio (N);

$$mN_{Ar\ F.R.} = mN_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{i}da\ do\ F.R.}$$
(4.4a)

$$mN_{Ar F.R.} = \%N_{Ar} \times m_{Ar F.R.} \tag{4.4b}$$

$$mN_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{i}da\ do\ F.R.} = mN_{2Sa\acute{i}da\ do\ F.R.}$$
(4.4c)

• Balanço de massa para o Cloro (Cl);

$$mCl_{Solo\ Contaminado} = mCl_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{l}da\ do\ F.R.}$$
(4.5a)

$$mCl_{Solo\ Contaminado} = \%Cl_{C_2Cl_6} \times mC_2Cl_{6Solo\ Contaminado}$$
(4.5b)

$$mCl_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{i}da\ do\ F.R.} = \%Cl_{C_2Cl_6} \times mC_2Cl_{6Sa\acute{i}da\ do\ F.R.}$$
(4.5c)

No processo, o percentual de O_2 nos gases de saída do forno rotativo é igual a 6% em volume seco, conforme definido na Tabela 4.3.

$$mO_{2_{G\acute{a}s} de Saída do F.R.} = 0,06$$

$$\times (mO_{2 Saída do F.R.} + mN_{2 Saída do F.R.} + mCO_{2 Saída do F.R.} + mC_{2}Cl_{6_{Saída} do F.R.})$$

$$(4.6)$$

b. Balanço de energia no forno rotativo por substâncias:

No forno rotativo não ocorre nenhuma reação química além da combustão do diesel.

A queima do diesel é 100% completa e ocorre a 25°C e pressão atmosférica, sendo que os produtos de combustão são aquecidos até temperatura de equilíbrio do forno rotativo, 220°C.

A temperatura de entrada do solo contaminado, do diesel e do ar é a temperatura ambiente (25°C), conforme Tabela 4.3.

A geração de calor para aquecimento do solo e consequente dessorção dos compostos voláteis ocorre através da reação química de combustão do diesel, Equação 4.7:

$$C_{13}H_{28(l)} + 20O_{2(g)} \to 13CO_{2(g)} + 14H_2O_{(l)}$$
(4.7)

A Tabela 4.7 apresenta as Equações de Calor 4.8 a 4.14 para cada uma das substâncias presentes no forno rotativo:

Substância	Equação de calor - Q	Eq.
Diesel C13H28	$Q_{Diesel no F.R.} = m_{Diesel no F.R.} \times \Delta H^0_{Comb. Diesel}$	(4.8)
Solo argiloso	$Q_{Solo \ argiloso} = m_{Solo \ argiloso}$ $\times \int_{Tambiente}^{Tfinal \ do \ solo} CpSolo \ Argiloso \times dT$	(4.9)

Tabela 4.7 – Equações de calor no Forno Rotativo.

A única fonte de solo argiloso é o solo contaminado e o mesmo é aquecido da temperatura de entrada (Temperatura ambiente) até a temperatura de saída do solo do forno rotativo.

Continuação da Tabela 4.7: $Q_{Contaminante no F.R.} = mC_2Cl_6 Solo contaminado$ $Contaminante C_2Cl_6 \times \left(\int_{Tambiente}^{Tsublimação} do contaminante} CpContaminante_{(s)} \times dT + C_{Lsublimação} + \int_{Tsublimação}^{Tsublimação} do F.R. + \int_{Tsublimação}^{Tsublimação} do contaminante} Cp(T)Contaminante_{(g)} \times dT \right)$ (4.10)

A única fonte de Hexacloroetano é o solo contaminado e o mesmo é aquecido até sua temperatura de sublimação, sendo sublimado, e posteriormente, seu gás aquecido até a temperatura dos gases de saída do forno rotativo.

$$Q_{\text{Água no F.R.}} = mH_2 O_{\text{Saída do F.R.}} \times \left(\int_{Tawporação da água}^{Tevaporação da água} Cp(T) \text{Água}_{(l)} \times dT + C_{Lágua} + \int_{Tevaporação da água}^{Tsaída do F.R.} Cp(T) \text{Água}_{(g)} \times dT \right)$$

$$(4.11)$$

As fontes de água são o solo contaminado e a água gerada pela combustão do diesel. A reação de combustão ocorre a 25°C, ou seja, seus produtos estarão na mesma temperatura e são posteriormente aquecidos. Como a temperatura de geração da água de combustão e a temperatura de entrada da água do solo contaminado são a mesmas, podemos considerar que a massa total de água que sai do forno rotativo sofreu os mesmos fenômenos térmicos.

$$Q_{G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \ no \ F.R.} = mO_{2 \ Saída \ do \ F.R.}$$

$$\times \int_{Tambiente}^{Tsaída \ do \ F.R.} Cp(T) G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \times dT$$

$$(4.12)$$

A única fonte de Gás Oxigênio é o excesso para a queima total do Diesel.

Continuação da Tabela 4.7:

	$Q_{G{ m as }Nitrog{ m eno}noF.R.}$	
Gás nitrogênio	$= mN_{2 \text{ Saída do F.R.}}$ $\times \int_{-\infty}^{T \text{saída do F.R.}} Cp(T) G \text{ás Nitrogênio} \times dT$	(4.13)
	J _{Tambiente}	

A única fonte de Gás Nitrogênio é o Ar para combustão no Forno Rotativo e o mesmo é aquecido da temperatura da entrada (Temperatura Ambiente) até a temperatura de saída dos gases do Forno Rotativo.

	$Q_{Dióxido \ de \ Carbono \ no \ F.R.}$	
Gás carbônico	$= mCO_{2 \text{ saída do F.R.}}$ $\times \int_{TAmbiente}^{Tsaída do F.R.} Cp(T)Dióxido de carbono$ $\times dT$	(4.14)

A única fonte de Dióxido de Carbono é a combustão do diesel no Forno Rotativo que ocorre a 25°C, logo o mesmo é aquecido da temperatura de reação, que é igual à temperatura ambiente, até a temperatura dos gases de saída do Forno Rotativo.





Figura 4.4. Fluxo de entrada e saída do trocador de calor.

Durante a passagem das correntes fria e quente de gás no trocador de calor não ocorre reação química e nem adição ou remoção de massa, logo, pelo princípio da conservação de massa, as massas de cada elemento na entrada e na saída são as mesmas e com valores iguais aos que constituem os gases de saída do forno rotativo para a corrente fria e aos gases de saída do pós-combustão para a corrente quente.

As Tabelas 4.8 até 4.9, e as Equações 4.15 até 4.24 detalham o modelo matemático do trocador de calor.

a. Balanço de energia no trocador de calor por substâncias:

Neste caso, apenas ocorre transferência de calor sem haver alteração nas massas das correntes envolvida, assim como nas suas composições. A Tabela 4.8 apresenta as Equações de troca térmica no trocador de calor, corrente quente e corrente fria. A temperatura de saída da corrente fria (*Tsaída no TC f*) é uma incógnita e irá variar de acordo com o teor de contaminante e de umidade no solo, na entrada da UDT.

• Corrente quente:

Substância	Equação de calor - Q	Eq.
Gás Oxigênio	$Q_{G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \ no \ TC \ Q.}$ $= mO_{2 \ Sa\acute{a}da \ do \ P.C.}$ $\times \int_{Tentrada \ no \ TC \ Q.}^{Tsa\acute{a}da \ no \ TC \ Q.} Cp(T) G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \times dT$	(4.15)
Gás Nitrogênio	$Q_{G\acute{a}s \ Nitrog\acute{e}nio \ no \ TC \ Q.}$ $= mN_{2 \ Sa\acute{i}da \ do \ P.C.}$ $\times \int_{Tentrada \ no \ TC \ Q.}^{Tsa\acute{i}da \ no \ TC \ Q.} Cp(T) G\acute{a}s \ Nitrog\acute{e}nio \times dT$	(4.16)

Tabela 4.8 – Equações de calor no trocador de calor – Corrente quente.

	Continuação da Tabela 4.8:	
Ácido Clorídrico (g)	$Q_{HCl no TC Q.} = mHCl_{Saída do P.C.}$ $\times \int_{Tentrada no TC Q.}^{Tsaída no TC Q.} Cp(T)HCl_{(g)} \times dT$	(4.17)
Água (g)	$Q_{Agua no TC Q.} = mH_2 O_{Saida do P.C.}$ $\times \int_{Tentrada no TC Q.}^{Tsaida no TC Q.} Cp(T)H_2 O_{(g)} \times dT$	(4.18)
Gás carbônico	$\begin{split} Q_{Di\delta xido \ de \ Carbono \ no \ TC \ Q.} &= mCO_{2 \ Saída \ do \ P.C.} \\ &\times \int_{Tsaída \ no \ TC \ Q.}^{Tsaída \ no \ TC \ Q.} Cp(T) Di\delta xido \ de \ carbono \\ &\times \ dT \end{split}$	(4.19)

• Corrente fria:

Tabela 4.9 – Equações de calor	no trocador de calor – Corrente fria
---------------------------------------	--------------------------------------

Substância	Equação de calor - Q	Eq.
Gás Oxigênio	$Q_{Gås \; Oxigênio \; no \; TC \; F.}$ $= mO_{2 \; Saída \; do \; F.R.}$ $\times \int_{Tentrada \; no \; TC \; F.}^{Tsaída \; no \; TC \; F.} Cp(T) Gás \; Oxigênio \; \times \; dT$	(4.20)
Gás Nitrogênio	$Q_{G\acute{a}s \ Nitrog\acute{e}nio \ no \ TC \ F.}$ $= mN_{2 \ Sa\acute{i}da \ do \ F.R.}$ $\times \int_{Tentrada \ no \ TC \ F.}^{Tsa\acute{i}da \ no \ TC \ F.} Cp(T) G\acute{a}s \ Nitrog\acute{e}nio \times dT$	(4.21)
Hexacloroetano (g)	$Q_{Contaminante no TC F.}$ $= mC_2Cl_6 Saida do F.R.$ $\times \int_{Tentrada no TC F.}^{Tsaida no TC F.} Cp(T)Contaminante_{(g)}$ $\times dT$	(4.22)

Continuação da Tabela 4.9:			
Água (g)	$Q_{Agua no TCF.} = mH_2 O_{Saida do F.R.}$ $\times \int_{Tentrada no TCF.}^{Tsaida no TCF.} Cp(T)H_2 O_{(g)} \times dT$	(4.23)	
Gás carbônico	$Q_{Dióxido de Carbono no TC F.}$ $= mCO_{2 Saída do F.R.}$ $\times \int_{Tentrada no TC F.}^{Tsaída no TC F.} Cp(T)Dióxido de carbono$ $\times dT$	(4.24)	

4.1.2.3. Forno de pós combustão



Figura 4.5. Fluxo de entrada e saída do Forno de Pós-Combustão.

As Tabelas 4.10 até 4.12, e as Equações 4.15 até 4.39 detalham o modelo matemático do forno de pós-combustão.
a. Balanço de massa no forno de pós-combustão por elemento químico:

Itens de entrada	Componentes
Gases de entrada do PC	$O_{2(g)}$ - $N_{2(g)}$ - $CO_{2(g)}$ - $H_2O_{(g)}$ - $C_2Cl_{6(g)}$
Combustível (Diesel)	$C_{13}H_{28(l)}$
Ar	O _{2(g)} - N _{2(g)}

Tabela 4.10 – Componentes de entrada do Forno de Pós-Combustão.

Tabela 4.11 – Componentes de	e saída do	Forno de	Pós-Combustão
------------------------------	------------	----------	---------------

Itens de saída	Componentes
Gases de saída do P.C. quente	$O_{2(g)}$ - $N_{2(g)}$ - $CO_{2(g)}$ - $H_2O_{(g)}$ - $HCl_{(g)}$

• Balanço de massa para o oxigênio (O);

$mO_{G\acute{a}s\ de\ entrada\ do\ P.C.} + mO_{Ar\ P.C.} = mO_{G\acute{a}s\ de\ Saída\ do\ P.C.}$	(4.25a)
---	---------

$$mO_{G\acute{a}s\ de\ entrada\ do\ P.C.} = mO_{G\acute{a}s\ de\ Saída\ do\ F.R.} \tag{4.25b}$$

$$mO_{Ar P.C.} = \%O_{Ar} \times m_{Ar P.C.} \tag{4.25c}$$

 $mO_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{l}da\ do\ F.R.}$

$$= \% O_{H20} \times m H_2 O_{Saida \ do \ P.C.} + m O_{2 \ Saida \ do \ P.C.} + \% O_{C02}$$
(4.25d)

$$\times m C O_{2 \ Saida \ do \ P.C.}$$

• Balanço de massa para o Carbono (C);

$$mC_{G\acute{a}s\ de\ entrada\ do\ P.C.} + mC_{Combustivel\ doP.C.} = mC_{G\acute{a}s\ de\ Saída\ do\ P.C.}$$
(4.26a)

 $mC_{G\acute{a}s\ de\ entrada\ do\ P.C.} = mC_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{l}da\ do\ F.R.}$ (4.26b)

 $mC_{Combustivel\ do\ P.C.} = \% C_{Diesel\ } \times m_{Diesel\ P.C.}$ (4.26c)

$$mC_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{l}da\ do\ P.C.} = \%C_{CO_2} \times mCO_{2Sa\acute{l}da\ do\ P.C.}$$
(4.26d)

• Balanço de massa para o Hidrogênio (H);

$$mH_{G\acute{a}s\ de\ entrada\ do\ P.C.} + mH_{Combustivel\ do\ P.C.} = mH_{G\acute{a}s\ de\ Saída\ do\ P.C.}$$
(4.27a)

$mH_{G\acute{a}s\ de\ entrada\ do\ P.C.} = mH_{G\acute{a}s\ de\ Saída\ do\ F.R.}$ (4.27b)

$$mH_{Combustivel\ do\ P.C.} = \%H_{Diesel\ Y.C.} \times m_{Diesel\ P.C.} \tag{4.27c}$$

$$= \% H_{H_2O} \times m H_2 O_{Saida \ do \ P.C.} + \% H_{HCl} \times m HCl_{Saida \ do \ P.C.}$$
(4.27d)

• Balanço de massa para o Nitrogênio (N);

$mN_{G{top a}s}$ de entrada do P.C. \dashv	$mN_{Ar P.C.} = mN_{G\acute{a}s de Saída do P.C.}$	(4.28a)
--	--	---------

$$N_{G\acute{a}s\ de\ entrada\ do\ P.C.} = m N_{2G\acute{a}s\ de\ saída\ do\ F.R.}$$
(4.28b)

$$mN_{Ar P.C.} = \% N_{Ar} \times m_{Ar P.C.} \tag{4.28c}$$

$$mN_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{l}da\ do\ P.C.} = mN_{2}_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{l}da\ do\ P.C.}$$
(4.28d)

• Balanço de massa para o Cloro (Cl);

$mCl_{G\acute{a}s\ de\ entrada\ do\ P.C.}=mCl_{G\acute{a}s\ de\ Saída\ do\ P.C.}$	(4.29a)
---	---------

$$mCl_{G\acute{a}s \ de \ entrada \ do \ P.C.} = mCl_{G\acute{a}s \ de \ Saída \ do \ F.R.}$$
(4.29b)

$$mCl_{G\acute{a}s\ de\ Sa\acute{l}da\ do\ P.C.} = \%Cl_{HCl} \times mHCl_{Sa\acute{l}da\ do\ P.C.}$$
(4.29c)

No processo, o percentual de O_2 nos gases de saída do FPC é igual a 6% em volume seco, conforme definido na Tabela 4.3.

$$mO_{2_{G\acute{a}s} de Saída do P.C.} = 0,06$$

$$\times (mO_{2 Saída do P.C.} + mN_{2 Saída do P.C.} + mCO_{2_{Saída} do P.C.} + mHCl_{Saída do P.C.})$$

$$(4.30)$$

b. Balanço de energia no Forno de Pós-Combustão por substâncias:

No FPC ocorre somente às reações de combustão do diesel, oxidação total do Hexacloroetano e formação de HCl com 100% de rendimento em relação ao reagente limitante respectivo. Sendo que as duas últimas serão representadas e abordadas como uma única reação global de combustão do Hexacloroetano.

A queima do diesel ocorre a 25°C e os produtos de combustão são aquecidos até temperatura de equilíbrio do FPC.

A temperatura de entrada do diesel e do ar é a temperatura ambiente (25°C).

Para a reação de formação de HCl será considerado que os reagentes da reação serão resfriados da temperatura de equilíbrio do pós-combustão até 25°C aonde a reação irá ocorrer e seus produtos serão novamente aquecidos à temperatura de equilíbrio do FPC.

As reações químicas envolvidas são apresentadas no passo a passo das Equações 4.7, 4.31a, 4.31b e 4.31c:

• Combustão do diesel à 25°C e Pressão Atmosférica:

$$C_{13}H_{28(l)} + 20O_{2(g)} \to 13CO_{2(g)} + 14H_2O_{(l)}$$
(4.7)

• Oxidação total do Hexacloroetano à 25°C e Pressão Atmosférica:

$$C_2 Cl_{6(s)} + 2O_{2(g)} \to 2CO_{2(g)} + 3Cl_{2(g)}$$
 (4.31a)

• Formação de HCl à 25oC e Pressão Atmosférica:

$$2Cl_{2(g)} + 2H_2O_{(g)} \to O_{2(g)} + 4HCl_{(g)}$$
(4.31b)

Logo, a reação de oxidação completa do HCE à 25°C, em proporção estequiométricas e pressão atmosférica é:

$$2C_2Cl_{6(s)} + O_{2(g)} + 6H_2O_{(g)} \to 4CO_{2(g)} + 12HCl_{(g)}$$
(4.31c)

A Tabela 4.12 apresenta as Equações de calor 4.32 a 4.39 para cada uma das substâncias presentes no FPC:

Tabela 4.12 – Equações de calor no Forno de Pós-Combustão.

Substância	Equação de calor - Q	Eq.
Diesel C13H28	$Q_{Diesel no P.C.} = m_{Diesel no P.C.} \times \Delta H^0_{Comb. Diesel}$	(4.32)

Geração de calor pela combustão do diesel no Forno de Pós-Combustão.

Combustão	$Q_{\it Comb.\ contaminante\ no\ P.C.}$	
Contaminante	$= m_{C_2Cl_6 Entrada no P.C.}$	(4.33)
C ₂ Cl ₆	$\times \Delta H^0_{Comb. Contaminante}$	

Geração de calor pela combustão do HCE no FPC.



O HCE possui somente 1 fonte a ser considerado no balanço e será resfriado da temperatura de entrada do FPC até a temperatura padrão da sua reação de combustão.

$$Q_{\text{Ågua no P.C.}} = mH_2O_{Entrada do P.C.} \\ \times \left(\int_{Tentrada do P.C.}^{Tevaporação da água} Cp(T) \text{\AA}gua_{(g)} \times dT \right) \\ - C_{Lágua} \\ + \int_{Tevaporação da água}^{Tambiente} Cp(T) \text{\AA}gua_{(l)} \times dT \right) \\ + (mH_2O_{Entrada do P.C.} + mH_2O_{comb. do Diesel} \quad (4.35) \\ - mH_2O_{comb. do Cont.}) \\ \times \left(\int_{Tambiente}^{Tevaporação da água} Cp(T) \text{\AA}gua_{(l)} \times dT \right) \\ + C_{Lágua} \\ + \int_{Tevaporação da água}^{Tevaporação da água} Cp(T) \text{\AA}gua_{(g)} \times dT$$

A água possui 2 fontes a serem consideradas para o balanço, a que já entra na corrente de entrada do FPC e a que é gerada na combustão do diesel. Porém, é consumida na combustão do contaminante no FPC. Portanto, por não termos como mensurar se somente a água da combustão do diesel gera água suficiente para realizar a combustão do contaminante, iremos colocar a água que entra no FPC também na temperatura padrão das reações químicas e considera-la também como fonte de água para a reação e posteriormente o aquecimento até a temperatura de saída do FPC do seu excesso.

temperatura padrão de sua reação de combustão até a temperatura de saída do FPC.

Gás oxigênio

 $Q_{G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \ no \ P.C.} = mO_{2 \ Entrada \ do \ P.C.} \times \int_{Tentrada \ do \ P.C.}^{Tambiente} Cp(T)G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \times dT + (mO_{2 \ Entrada \ do \ P.C.} + mO_{2 \ Ar \ do \ P.C.} + (4.37) + (mO_{2 \ Entrada \ do \ P.C.} + mO_{2 \ Comb. \ do \ Cont.}) \times \int_{Tambiente}^{Tsa\acute{a}da \ do \ P.C.} Cp(T)G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \times dT$

O gás Oxigênio possui 2 fontes a serem consideradas para o balanço, o que já entra na corrente de entrada do FPC e o que é adicionado com o Ar de Combustão para o FPC. Porém, é consumido pela combustão do diesel e na do contaminante no FPC. Portanto, por não termos como mensurar se somente o Ar de Combustão é suficiente para realizar as reações químicas, iremos colocar o gás oxigênio que entra no FPC também na temperatura padrão das reações químicas e considera-lo também como fonte de gás oxigênio para as reações e posteriormente o aquecimento até a temperatura de saída do FPC do seu excesso.

O gás Nitrogênio possui 2 fontes a serem consideradas para o balanço, o que já entra com a corrente de entrada no FPC e o que é adicionado com o ar de combustão para o FPC.

.....

Continuação da Tabela 4.12: $Q_{Dióxido de Carbono no P.C.}$ $= mCO_{2 Entrada do P.C.}$ $\times \int_{Tentrada do P.C.}^{Tsaída do P.C.} Cp(T)Dióxido de Carbono$ $\times dT$ (4.39) $+ (mCO_{2 Comb. do Diesel} + mCO_{2 Comb. do Cont.})$ $_{C}Tsaída do P.C.$

Cp(T)Dióxido de Carbono

O Dióxido de Carbono possui 3 fontes a serem consideradas para o balanço, o que já entra na corrente de entrada do FPC e os que são gerados nas combustões do diesel e do contaminante.

, Tambiente

×

 $\times dT$



4.1.2.4. Resfriador

Gás

carbônico

Figura 4.6 – Fluxo de entrada e saída no resfriador.

O resfriamento abrupto de 750°C para 70°C se faz necessário para evitar a formação das dioxinas e furanos e é realizado com água a temperatura ambiente, 25°C.

Neste caso, ocorre apenas alteração na massa de água no produto final, visto que o resfriamento, e consequentemente, a transferência de calor é realizada com a água.

A Tabela 4.13 e as Equações 4.40 até 4.45 detalham o modelo matemático do resfriador.

a. Balanço de energia no resfriador por substâncias:

A Tabela 4.13 apresenta as Equações de troca de calor que ocorrem no Resfriador para reduzir a temperatura dos gases de saída do trocador de calor, corrente quente, de 750°C para 70°C.

Substância	Equação de calor - Q	Eq.
	$Q_{ m \AA gua\ de\ resfriamento}$	
Água de resfriamento	$= mH_2O_{resfriamento}$	(4.40)
	$\times \left(\int_{Tambiente} Cp(T) Agua_{(l)} \times dT \right)$	

Tabela 4.13 – Equações de calor no Resfriador.

Essa massa de água é a injetada no resfriador em massa suficiente para esfriar os gases de saída do trocador de calor, corrente quente, de 750°C para 70°C.

 $Q_{G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \ no \ Resfriador.}$ $= mO_{2 \ Sa\acute{a}da \ do \ P.C.}$ $X \int_{Tresfriamento \ dos \ gases}^{Tresfriamento \ dos \ gases} Cp(T) G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio$ $\times dT$ (4.41)

Quantidade de calor cedido do resfriamento do gás oxigênio na saída do trocador de calor, corrente quente, de 750°C para 70°C.

Continuação da Tabela 4.13: $Q_{Gás Nitrogênio no Resfriador.}$ Gás $mN_2 Saída do P.C.$ Mitrogênio $\times \int_{Tsaída no TC Q.}^{Tresfriamento dos gases} Cp(T)Gás Nitrogênio$ $\times dT$

Quantidade de calor cedido do resfriamento do gás nitrogênio na saída do trocador de calor, corrente quente, de 750°C para 70°C.

$$Q_{Dióxido \ de \ Carbono \ no \ Resfriador.}$$

$$Gás = mCO_{2 \ Saída \ do \ P.C.}$$

$$carbônico \times \int_{Tsaída \ no \ TC \ Q.}^{Tresfriamento \ dos \ gases} Cp(T)Dióxido \ de \ carbono \times dT$$

$$(4.43)$$

Quantidade de calor cedido do resfriamento do gás carbônico na saída do trocador de calor, corrente quente, de 750°C para 70°C.

$$\begin{aligned} Q_{HCl \ no \ Resfriador} \\ = mHCl_{Saida \ do \ P.C.} \\ \times \int_{Tsaida \ no \ TC \ Q.}^{Tresfriamento \ dos \ gases} Cp(T)HCl_{(g)} \times dT \end{aligned}$$
(4.44)

Quantidade de calor cedido do resfriamento do $HCL_{(g)}$ na saída do trocador de calor, corrente quente, de 750°C para 70°C.

$$Q_{\text{Agua no Resfriador}} = mH_2 O_{\text{Saída do P.C.}} \times$$

$$\left(\int_{\text{Tsaída no TC Q.}}^{\text{Tevaporação da água}} Cp(T) \text{Agua}_{(g)} \times dT - C_{\text{Lágua}} + (4.45) \right)$$

$$\int_{\text{Tevaporação da água}}^{\text{Tresfriamento dos gases}} Cp(T) \text{Agua}_{(l)} \times dT \right)$$

Quantidade de calor cedido do resfriamento da água na saída do trocador de calor, corrente quente, de 750°C para 70°C. Essa água é arrastada como vapor d'agua na chaminé após a lavagem dos gases.

4.2. CÁLCULOS PARA REAÇÕES QUÍMICAS

As duas variáveis que gerarão os dados de consumo de diesel, emissão de CO_2 e consumo de água são o teor de umidade do solo e o teor de contaminante. Para isso, o teor de

umidade foi variado de 0% a 20%, em intervalos de 5% e o teor de contaminante variado de 0% a 5%, em intervalos de 0,5%.

Por isso, como é conhecida a massa de solo na entrada da UDT, conforme Tabela 4.1, a massa de contaminante no solo e de umidade em cada simulação é conhecida.

Sendo assim, o cálculo dos calores de combustão, nas reações químicas de combustão do diesel no Forno Rotativo e no FPC, assim como, da oxidação do HCE, serão todos realizados em função da massa de contaminante e da massa de $C_{13}H_{28}$.

4.2.1. Combustão do C₂Cl₆ (HCE)

• Combustão do C₂Cl₆ à 25°C e Pressão Atmosférica:

$$2C_2Cl_{6(s)} + 4O_{2(g)} \to 4CO_{2(g)} + 6Cl_{2(g)}$$
(4.31d)

$$2Cl_{2(g)} + 2H_2O_{(g)} \to O_{2(g)} + 4HCl_{(g)}$$
(4.31e)

$$2C_2Cl_{6(s)} + O_{2(g)} + 6H_2O_{(g)} \to 4CO_{2(g)} + 12HCl_{(g)}$$
(4.31c)

A partir da reação de combustão da Equação 4.31c, as relações de geração e consumo de substâncias em relação a massa de contaminante são descritas nas Equações 4.46 a 4.49.

$$mO_{2 \ Comb. \ Cont.} = \left(\frac{(PMO_2)}{(2 \times PMC_2Cl_6)}\right) \times mC_2Cl_6 \tag{4.46}$$

$$mH_2O_{Comb.\ Cont.} = \left(\frac{(6 \times PMH_2O)}{(2 \times PMC_2Cl_6)}\right) \times mC_2Cl_6$$
(4.47)

$$mCO_{2 \ Comb. \ Cont.} = \left(\frac{(4 \times PMCO_2)}{(2 \times PMC_2Cl_6)}\right) \times mC_2Cl_6 \tag{4.48}$$

$$mHCl_{comb.\ Cont.} = \left(\frac{(12 \times PMHCl)}{(2 \times PMC_2Cl_6)}\right) \times mC_2Cl_6$$
(4.49)

Para determinação do calor gerado na reação de combustão do HCE, necessita-se calcular a entalpia padrão da reação de combustão. Nesse ponto, existem dois métodos para este cálculo, sendo um o método da Energia de Ligação e outro do Calor de Formação (ATKINS, 2001).

4.2.1.1. Método 1: Energia de ligação – C_2Cl_6

A Tabela 4.14 apresenta as energias de ligação dos compostos químicos presentes na reação de combustão do Hexacloroetano:

Ligações	Energia (kJ/mol)
C Cl	327,2
СС	346,8
О — Н	463,5
0 = 0	497,8
C = O	804,3
H Cl	431,8

Tabela 4.14 – Energias de ligação da combustão do Hexacloroetano.

Fonte: ATKINS (2001)

Neste método, verifica-se a quantidade de ligações químicas existentes entre as substâncias na reação e na geração, subtraindo a energia gasta para rompê-las da energia de formação dos novos compostos da reação, conforme Equações 4.50a até 4.50e.

$$\Delta H^{o}_{Comb. Contaminante 1} = \sum E_{Ligaçõoes rompidas} - \sum E_{Ligaçõoes formadas}$$
(4.50a)

 $\sum E_{Ligaçõoes rompidas} = 2 \times (C - C) + 12 \times (C - Cl) + 1 \times (0 = 0) + 12 \times (O - H)$ (4.50b)

$$\sum E_{Ligaçõoes formadas} = 8 \times (C = 0) + 12 \times (H - Cl)$$
(4.50c)

$$\Delta H^{o}_{Comb.\ Contaminante\ 1} = 10.679,8 - 11.616,0 = -936,2\frac{kJ}{mol}$$
(4.50d)

. .

$$\Delta H^{o}_{Comb.\ Contaminante\ 1} = -1,9773\frac{kJ}{g}\ de\ C_{2}Cl_{6} \tag{4.50e}$$

4.2.1.2. Método 2: Calor de formação – C_2Cl_6

A Tabela 4.15 apresenta os calores de formação de cada substância química presente na reação de combustão do Hexacloroetano:

Substância	ΔH^{0} _f (kJ/mol)	
C ₂ Cl ₆	-148,2	
H_2O	-241,83	
CO_2	-393,509	
O_2	0	
HCl	-92,307	

Tabela 4.15 – Calor de formação dos compostos envolvidos na combustão do Hexacloroetano.

Fonte: RUSSEL (1994)

Neste método, verifica-se o calor de formação de cada composto químico presente na reação de combustão do HCE e faz-se a diferença do somatório dos calores de formação dos produtos da reação química com os calores de formação dos reagentes. As Equações 4.51a – 4.51e apresentam o passo a passo para o cálculo do calor de combustão do HCE.

$$\Delta H^{o}_{Comb. Contaminante 2} = \sum \Delta H^{0}_{f}_{produtos} - \sum \Delta H^{0}_{f}_{reagentes}$$
(4.51a)

$$\sum \Delta H_{f \text{ produtos}}^{0} = 4 \times (CO_2) + 12 \times (HCl)$$
(4.51b)

$$\sum \Delta H_{f_{reagentes}}^{0} = 2 \times (C_2 C l_6) + 1 \times (O_2) + 6 \times (H_2 O)$$
(4.51c)

$$\Delta H^{o}_{Comb.\ Contaminante\ 2} = -2.681,72 + 1.747,38 = -934,34 \frac{kJ}{mol}$$
(4.51d)

$$\Delta H^{o}_{Comb. Contaminante 2} = -1,9734 \frac{kJ}{g} de C_{2}Cl_{6}$$
(4.51e)

Com base nos resultados dos dois métodos têm-se:

• Média =
$$-1,975352$$
kJ/g de C₂Cl₆;

• Desvio = 0,198851%

4.2.2. Combustão do Diesel (C13H28)

como referência para os cálculos da simulação.

$$C_{13}H_{28(l)} + 20O_{2(g)} \to 13CO_{2(g)} + 14H_2O_{(l)}$$
(4.7)

A partir da reação de combustão 4.7, seguem as Equações 4.52a, 4.52b e 4.52c de geração e consumo de substâncias em relação a massa de diesel:

$$mO_{2\ Comb.\ Diesel} = \left(\frac{(20 \times PMO_2)}{(1 \times PMC_{13}H_{28})}\right) \times mC_{13}H_{28}$$
(4.52a)

$$mH_2O_{comb.\ Diesel} = \left(\frac{(14 \times PMH_2O)}{(1 \times PMC_{13}H_{28})}\right) \times mC_{13}H_{28}$$
 (4.52b)

$$mCO_{2\ Comb.\ Diesel} = \left(\frac{(1 \times PMCO_2)}{(1 \times PMC_{13}H_{28})}\right) \times mC_{13}H_{28}$$
(4.52c)

Para determinação do calor gerado na reação de combustão do diesel, utilizam-se os métodos apresentados no cálculo do calor de combustão do contaminante.

4.2.2.1. Método 1: Energia de ligação – $C_{13}H_{28}$

A Tabela 4.16 apresenta as energias de ligação dos compostos químicos presentes na reação de combustão do $C_{13}H_{28}$.

Tabela 4.16 – Energias de ligação da combustão do $C_{13}H_{28}$.

Ligações	Energia (kJ/mol)
С — Н	413,4
C C	346,8
О Н	463,5
0=0	497,8
C = O	804,3

Fonte: ATKINS (2001).

$$\Delta H^{o}_{Comb. Diesel 1} = \sum E_{Ligaçõoes rompidas} - \sum E_{Ligaçõoes formadas}$$
(4.53a)

$$\sum E_{Ligaçõoes rompidas} = 12 \times (C - C) + 28 \times (C - H) + 20 \times (0 = 0)$$
(4.53b)

$$\sum E_{Ligaçõoes formadas} = 26 \times (C = 0) + 28 \times (0 - H)$$
(4.53c)

$$\Delta H^{o}_{Comb. Diesel 1} = 25.692,8 - 33.889,8 = -8.197,0 \frac{kJ}{mol}$$
(4.53d)

$$\Delta H^{o}_{Comb. Diesel 1} = -44, 4634 \frac{kJ}{g} de C_{13}H_{28}$$
(4.53e)

As Equações 4.53a até 4.53e apresentam o passo a passo para o cálculo do calor de combustão do $C_{13}H_{28}$.

4.2.2.2. Método 2: Calor de formação – $C_{13}H_{28}$

A Tabela 4.17 apresenta os calores de formação de cada substância química presente na reação de combustão do $C_{13}H_{28}$:

Tabela 4.17 – Calor de formação dos compostos envolvidos na combustão do C13H28.

Substância	ΔH ⁰ f (kJ/mol)	
$C_{13}H_{28}$	-376,1	
H ₂ O	-241,83	
CO_2	-393,509	
O_2	0	

Fonte: RUSSEL (2004).

Neste método, verifica-se o calor de formação de cada composto químico presente na reação de combustão do HCE e fazemos a diferença do somatório dos calores de formação dos produtos da reação química com os calores de formação dos reagentes.

$$\Delta H^{o}_{Comb. Diesel 2} = \sum \Delta H^{0}_{f}_{produtos} - \sum \Delta H^{0}_{f}_{reagentes}$$
(4.54a)

$$\sum \Delta H_{f_{produtos}}^{0} = 13 \times (CO_2) + 14 \times (H_2O)$$
(4.54b)

$$\sum \Delta H_{f \ reagentes}^{0} = 1 \times (C_{13}H_{28}) + 20 \times (O_{2})$$
(4.54c)

$$\Delta H^{o}_{Comb. Diesel 2} = -8.504,237 + 376,100 = -8.125,137 \frac{kJ}{mol}$$
(4.54d)

$$\Delta H^{o}_{Comb. Diesel 2} = -44,0736 \frac{kJ}{g} de C_{13}H_{28}$$
(4.54e)

Com base nos resultados dos dois métodos têm-se:

- $\circ \quad \text{Média} = -44,2684645 \text{ kJ/g de } C_{13}H_{28};$
- Desvio = 0,880557%

Pelo desvio da diferença encontrada nos calores de combustão do diesel pelos dois métodos, pode-se validar ambas metodologias. Portanto, será utilizado o valor da média como referência para os cálculos da simulação.

4.3. DADOS PARA A SIMULAÇÃO

As Tabelas 4.18 a 4.27 apresentam os dados, parâmetros e modelos termodinâmicos para a simulação.

Elemento	Simbologia	Massa (u)
Hidrogênio	Н	1,008
Oxigênio	О	15,9995
Carbono	С	12,01
Cloro	Cl	35,4525
Nitrogênio	Ν	14,007

Tabela 4.18 – Massas atômicas dos elementos químicos.

Fonte: ATKINS (2001).

Molécula	Fórmula molecular	Peso (g/mol)	
Água	H ₂ O	18,0155	
Gás Oxigênio	O_2	31,999	
Dióxido de Carbono	CO_2	44,009	
Hexacloroetano	C_2Cl_6	236,735	
Gás Nitrogênio	N_2	28,014	
Gás Cloro	Cl_2	70,905	
Diesel	$C_{13}H_{28}$	184,354	
Ácido Clorídrico	HCl	36,4605	
	Eante: ATKINS (2001)		

Tabela 4.19 – Peso molecular das substâncias.

Fonte: ATKINS (2001).

Elemento % Molécula 11,19% H_2O Hidrogênio C13H28 15,31% HCl 2,76% H₂O 88,81% Oxigênio O_2 100,00% CO_2 36,36% CO_2 27,29% Carbono C_2Cl_6 10,15% C13H28 84,69% C_2Cl_6 89,85% Cloro HCl 97,24% Nitrogênio N_2 100,00%

Tabela 4.20 – Porcentagem dos elementos químicos nas substâncias.

Fonte: ATKINS (2001).

Tabela 4.21 – Dados Termodinâmicos do CO₂.

Peso Molecular		44,009 g/mol
Calor Específico CO_{3}		J/kmol.K
	C1	0,2937x10 ⁵
$\begin{bmatrix} \frac{C3}{T} \end{bmatrix}^2 \begin{bmatrix} \frac{C5}{T} \end{bmatrix}^2$	C2	$0,3454 \times 10^5$
$C1 + C2 \times \left \frac{1}{\sinh\left(\frac{C3}{2}\right)} \right + C4 \times \left \frac{1}{\cosh\left(\frac{C5}{2}\right)} \right $	C3	$1,428 \times 10^3$
$\begin{bmatrix} \operatorname{Stitt}\left(\frac{1}{T}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \operatorname{COSH}\left(\frac{1}{T}\right) \end{bmatrix}$	C4	$0,264 \times 10^5$
	C5	588

Fonte: GREEN e PERRY (2007).

Calor Específico (s)	J/kg.K	938,56448
	Fonte: GREEN e PERRY (2007).	

Tabela 4.22 – Dados Termodinâmicos do Solo Argiloso.

Tabela 4.23 – Dados	Termodinâmicos do N ₂ .

Peso Molecular		28,014 g/mol
Calor Específico $N_{2(g)}$		J/kmol.K
	C1	0,2911x10 ⁵
$\begin{bmatrix} \underline{c3} \end{bmatrix}^2 \begin{bmatrix} \underline{c5} \end{bmatrix}^2$	C2	$0,861 \times 10^5$
$C1 + C2 \times \left \frac{T}{C^{2}} \right + C4 \times \left \frac{T}{C^{2}} \right $	C3	$1,7016 \times 10^3$
$\left\lfloor sinh\left(\frac{cs}{T}\right) \right\rfloor \qquad \left\lfloor cosh\left(\frac{cs}{T}\right) \right\rfloor$	C4	$0,001 \times 10^5$

Fonte: GREEN e PERRY (2007).

C5

Peso Molecular		31,999 g/mol
Calor Específico Ora	J/kmol.K	
	C1	$0,291 \times 10^5$
$C1 + C2 \times \left[\frac{\frac{C3}{T}}{\sinh\left(\frac{C3}{T}\right)}\right]^2 + C4 \times \left[\frac{\frac{C5}{T}}{\cosh\left(\frac{C5}{T}\right)}\right]^2$	C2	$0,1004 \times 10^5$
	C3	$2,5265 \times 10^3$
	C4	0,0936x10 ⁵
	C5	1153,88

Fonte: GREEN e PERRY (2007).

Peso Molecular		70,905 g/mol
Calor Específico HCl	J/kmol.K	
	C1	$0,2916 \times 10^5$
$\left \frac{C3}{T} \right ^2 \left \frac{C5}{T} \right ^2$	C2	$0,0905 \times 10^5$
$C1 + C2 \times \left \frac{1}{\sinh\left(\frac{C3}{2}\right)} \right + C4 \times \left \frac{1}{\cosh\left(\frac{C5}{2}\right)} \right $	C3	$2,0938 \times 10^3$
$\begin{bmatrix} stitt(\overline{T}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cost(\overline{T}) \end{bmatrix}$	C4	$0,0011 \times 10^5$
	C5	120

Fonte: GREEN e PERRY (2007).

909,79

Peso Molecular	236,735 g/mol	
Temperatura de Ebulição	185,85°C	
Calor Latente de Sublimação	248.780,3848 J/kg	
Calor Específico (s)	729,063478 J/kg.K	
Calor de Combustão	-1,975352x10 ⁶ J/kg	
		J/kmol.K
Calor Específico C ₂ Cl _{6(g)}	C1	130,4086
$C1 + C2 \times T + C3 \times T^2 + C4 \times T^3 - \frac{C5}{T^2}$	C2	119,9611
	C3	-100,8403
	C4	30,14271
	C5	-1,698060

Tabela 4.26 – Dados Termodinâmicos do C₂Cl₆.

Fonte: GREEN e PERRY (2007) e POHANISH (2005).

Peso Molecular	18,0155 g/mol			
Temperatura de Ebulição	100°C			
Entalpia de Vaporização	2.258.840 J/kg			
	J/kmol.K			
Calor Específico H ₂ O _(l)	C1 276,37x10 ⁵			
	C2	$-2,0901 \times 10^3$		
$C1 + C2 \times T + C3 \times T^2 + C4 \times T^3 + C5 \times T^4$	C3	$8,125 \times 10^{0}$		
	C4	-0,014116		
	C5	9,3701x10 ⁻⁶		
Calor Específico H ₂ O _(g)	J/kmol.K			
	C1	0,3336x10 ⁵		
$\begin{bmatrix} \underline{C3} \end{bmatrix}^2 \begin{bmatrix} \underline{C5} \end{bmatrix}^2$	C2	$0,2679 \times 10^5$		
$C1 + C2 \times \left \frac{T}{1 + C4} \right + C4 \times \left \frac{T}{1 + C5} \right $	C3	$2,6105 \times 10^3$		
$\left[\sinh\left(\frac{d}{T}\right)\right] \qquad \left[\cosh\left(\frac{d}{T}\right)\right]$	C4	$0,089 \times 10^5$		
	C5	$1,169 \times 10^3$		

Fonte: GREEN e PERRY (2007).

4.4. SIMULAÇÃO DA UNIDADE DE DESSORÇÃO TÉRMICA COM A MELHORIA DE PROCESSOS – UDT-CT

A partir da avaliação dos resultados que serão apresentados e discutidos no Capítulo 5 de consumo de diesel, emissão de CO_2 e consumo de água para resfriamento, se observou que a unidade já apresenta um conceito de reaproveitamento energético dos gases que são gerados no FPC e que pré-aquecem os gases com a contaminação que alimentam o FPC, por meio de um trocador de calor.

Entretanto, a UDT apresentou um grande consumo de água, para o resfriamento abrupto dos gases de saída do trocador de calor, corrente quente, de 750°C para 70°C. Ou seja, toda essa carga térmica necessitava de uma grande quantidade de *make-up* de água para o resfriamento. Logo, avaliou-se a possibilidade de aproveitar essa carga térmica para pré-aquecimento do solo contaminado que alimenta o Forno Rotativo. Isso, teoricamente, geraria uma redução no consumo de diesel no forno rotativo, diminuiria a temperatura dos gases de saída do trocador de calor, corrente quente, e consequentemente, diminuiria a quantidade de água de *make-up* a ser utilizada para resfriamento abrupto dos gases. Porém, para provar essa tese, utiliza-se a metodologia proposta para sugerir a implantação de um camisa de troca térmica, que revestiria o forno rotativo, pré-aquecendo o solo contaminado.

Todos esses resultados serão discutidos no capítulo 5, mas essa introdução se faz necessária para apresentação da simulação da "nova" UDT, com a inclusão de uma camisa de aquecimento no Forno Rotativo para o reaproveitamento energético.

Para fins de identificação durante as explicações, chamaremos essa "nova" UDT de UDT-CT (Unidade de Dessorção Térmica com Camisa Térmica).

4.4.1. Condições de processo

A Figura 4.7 ilustra o fluxograma de processo resumido da UDT-CT que servirá como base para os balanços de massa e energia



Figura 4.7. Fluxograma de processo resumido da UDT-CT.

Observa-se pela Figura 4.7, que a UDT-CT não altera o processo de tratamento. Incluise nela apenas um segundo equipamento de troca térmica, revestindo o forno rotativo.

Logo, os outros equipamentos, excetuando-se o Resfriador, se mantém nas mesmas condições de processo listadas nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Isso ocorre, pois, a inclusão dessa camisa aconteceu entre o trocador de calor e o resfriador. Logo, as únicas alterações de processos serão no resfriador e na camisa de troca térmica inserida, conforme Tabelas 4.28 e 4.29.

Tabela 4.26 – Novas condições de processo r	
Temperatura de entrada dos gases	550 °C
Temperatura de saída dos gases	70 °C

Tabela 4.28 - Novas condições de processo no resfriador da UDT-CT.

Fonte: ECOTECHNIEK BODEM BV (1998).

Temperatura de entrada dos gases	750 °C
Temperatura de saída dos gases	550 °C

Tabela 4.29 – Condições de processo no resfriador na Camisa do forno rotativo da UDT-CT.

A temperatura de saída dos gases baseou-se no limite definido Tabela 3.1.

Como os fluxos de entrada e saída no trocador de calor e no forno de pós combustão da UDT-CT são os mesmos apresentados nas seções 4.1.2.2 e 4.1.2.3, respectivamente, assim como as condições de processo, não há nenhuma variação nos modelos de balanços de massa e energia nesses equipamentos. Por isso serão apresentados na seção 4.2 apenas os modelos matemáticos dos equipamentos que ocorreram mudanças nas condições de processo.

4.4.2. Balanço de massa e energia da Unidade

4.4.2.1. Forno rotativo – UDT-CT



Figura 4.8. Fluxo de entrada e saída no forno rotativo e da camisa de troca térmica da UDT-CT.

a. Balanço de massa no forno rotativo da UDT-CT por elemento químico:

O balanço de massa no Forno Rotativo para a UDT-CT por elemento químico se mantém igual ao apresentado na seção 4.1.2.1 – item a, pois as entradas e saídas dos componentes são as mesmas conforme observado na Figura 4.8.

b. Balanço de energia no forno rotativo da UDT-CT por substâncias:

As Equações de calor no forno rotativo são as mesmas apresentadas na Tabela 4.7 da Seção 4.1.2.1 – item b.

Nesse caso há uma particularidade que diferencia o balando de energia da UDT-CT para a UDT apresentada no Capítulo 3, sendo esta a presenta da camisa de troca térmica no forno rotativo, que recupera calor proveniente dos gases de saída do trocador de calor – corrente quente.

4.4.2.1.1. Camisa de troca térmica

a. Balanço de massa na camisa de troca térmica por elemento químico:

Durante a passagem dos gases na camisa de troca térmica que reveste o forno rotativo, não ocorre reação química e nem adição ou remoção de massa, logo, pelo Princípio da Conservação de Massa, as massas de cada elemento na entrada e na saída são as mesmas e com valores iguais aos que constituem os gases de saída do trocador de calor – corrente quente.

b. Balanço de massa na camisa de troca térmica por elemento químico:

A Tabela 4.30 apresenta as Equações de calor 4.55 até 4.59 para cada uma das substâncias presentes na corrente de gases de saída do trocador de calor – corrente quente – que passam pela camisa de troca térmica cedendo calor para as substâncias presentes no solo do forno rotativo:

Substância	Equação de calor - Q	Eq.
Gás Oxigênio	$\begin{aligned} Q_{G\acute{a}s\ Oxig\acute{e}nio\ na\ C.T.} &= mO_{2\ Sa\acute{i}da\ do\ P.C-C.T} \\ &\times \int_{Tsa\acute{i}da\ na\ C.T.}^{Tsa\acute{i}da\ na\ C.T.} Cp(T) G\acute{a}s\ Oxig\acute{e}nio\ \times\ dT \end{aligned}$	(4.55)
Gás Nitrogênio	$Q_{G{ m as Nitrog{ m enio}na\ C.T.}}$ = $mN_{2Sa{ m i}da\ do\ P.C-C.T}$ $ imes \int_{Tentrada\ na\ C.T.}^{Tsa{ m i}da\ na\ C.T.}} Cp(T)G{ m as\ Nitrog{ m enio} imes}dT$	(4.56)
Ácido Clorídrico (g)	$Q_{HCl na C.T.} = mHCl_{Saida do P.CC.T.} \\ \times \int_{Tentrada na C.T.}^{Tsaida na C.T.} Cp(T)HCl_{(g)} \times dT$	(4.57)
Água (g)	$Q_{\text{Água na C.T.}} = mH_2 O_{\text{Saída do P.CC.T.}}$ $\times \int_{Tentrada na C.T.}^{Tsaída na C.T.} Cp(T)H_2 O_{(g)} \times dT$	(4.58)
Gás carbônico	$Q_{Di\acute{o}xido \ de \ Carbono \ na \ C.T.} = mCO_{2 \ Saída \ do \ P.CC.T.} \times \int_{Tsaída \ na \ C.T.}^{Tsaída \ na \ C.T.} Cp(T) Di\acute{o}xido \ de \ carbono \ x \ dT$	(4.59)

Tabela 4.30 – Equações de calor na camisa de troca térmica da UDT-CT.

4.4.2.2. Resfriador – UDT-CT

Assim como na UDT apresentada no Capítulo 3, esse resfriamento abrupto se faz necessário para evitar a formação das dioxinas e furanos e ele é realizado com água a temperatura ambiente, 25°C. A diferença agora é que os gases de saída do FPC estão entrando no resfriador com a temperatura de 550°C, conforme Figura 4.9. Logo, a massa de água necessária para esse resfriamento será menor.

Neste caso também, ocorre apenas alteração na massa de água no produto final, visto que o resfriamento é realizado com a água.



Figura 4.9 – Fluxo de entrada e saída no resfriador da UDT-CT.

b. Balanço de energia no resfriador da UDT-CT por substâncias:

A Tabela 4.31 apresenta as Equações de troca de calor 4.60 até 4.65 que ocorrem no resfriador para reduzir a temperatura dos gases de saída da camisa de troca térmica de 550°C para 70°C.

Substância	Equação de calor - Q	Eq.
	$Q_{\mathrm{\AA}gua\ de\ resfriamento-C.T.}$	
Água de	$= mH_2O_{resfriamento-C.T.}$	(4.60)
resfriamento	$\times \left(\int_{Tambiente}^{Tresfriamento\ dos\ gases} Cp(T) \acute{A}gua_{(l)} \times dT \right)$	(1.00)

Tabela 4.31 – Equações de calor no Resfriador da UDT-CT.

Essa massa de água é a injetada no resfriador em massa suficiente para esfriar os gases de saída da camisa de troca térmica de 550°C para 70°C.

$$Q_{G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio \ no \ Resfriador.-C.T.} = mO_{2 \ Sa\acute{a}da \ do \ P.C.-C.T.}$$

Gás
Oxigênio

$$\times \int_{Tsa\acute{a}da \ na \ C.T.}^{Tresfriamento \ dos \ gases} Cp(T) G\acute{a}s \ Oxig\acute{e}nio$$

$$\times dT$$

$$(4.61)$$

Quantidade de calor cedido do resfriamento do gás oxigênio na saída de saída da camisa de troca térmica de 550°C para 70°C.

	$Q_{G\acute{a}s\ Nitrog\acute{e}nio\ no\ ResfriadorC.T.}$	
Gás Nitrogênio	$= mN_{2 Saída do P.CC.T.}$ $\times \int_{Tsaída na C.T.}^{Tresfriamento dos gases} Cp(T)Gás Nitrogênio$ $\times dT$	(4.62)

Quantidade de calor cedido do resfriamento do gás nitrogênio na saída de saída da camisa de troca térmica de 550°C para 70°C.

	$Q_{Dióxido\ de\ Carbono\ no\ ResfriadorC.T.}$	
Gás	$= mCO_{2 \text{ Saída do P.CC.T.}}$	(4 63)
carbônico	$\times \int_{Tsaida na C.T.}^{Tresfriamento \ dos \ gases} Cp(T)Dióxido \ de \ carbono \times dT$	(1.03)

Quantidade de calor cedido do resfriamento do gás carbônico na saída de saída da camisa de troca térmica de 550°C para 70°C.

Continuação da Tabela 4.31: $Q_{HCl no Resfriador-C.T.}$ $= mHCl_{Saida do P.C.-C.T.}$ $\times \int_{Tsaida na C.T.}^{Tresfriamento dos gases} Cp(T)HCl_{(g)} \times dT$ (4.64)

Quantidade de calor cedido do resfriamento do $HCl_{(g)}$ na saída de saída da camisa de troca térmica de 550°C para 70°C.

$$Q_{\text{Água no Resfriador-C.T.}} = mH_2O_{Saída do P.C.-C.T.} \times \left(\int_{Tsaída na C.T.}^{Tevaporação da água} Cp(T) \text{Água}_{(g)} \times dT - C_{Lágua} + \int_{Tevaporação da água}^{Tresfriamento dos gases} Cp(T) \text{Água}_{(l)} \times dT \right)$$
(4.65)

Quantidade de calor cedido do resfriamento da água na saída de saída da camisa de troca térmica de 550°C para 70°C. Essa água é arrastada como vapor d'agua na chaminé após a lavagem dos gases.

4.5. DESENVOLVIMENTO DE ECOINDICADORES

A primeira etapa de cada projeto baseia-se na construção de métricas, denominada eco indicadores, para avaliação das Unidades de Dessorção Térmica antes e depois da instalação da camisa de troca térmica, a fim de avaliar de uma maneira simples o quanto a instalação dessa camisa no forno rotativo impacta na melhoria das variáveis ambientais da planta.

A metodologia deste trabalho traz o conceito de ecoindicador como sendo a relação entre uma variável ambiental: consumo de água para resfriamento dos gases, consumo de combustível e emissão de CO₂, e uma variável de produção, sendo esta a capacidade de tratamento da planta em toneladas, assim como descreve a Equação 4.66:

$$Ecoindicador = \frac{Quantidade \ consumida \ ou \ gerada - kg \ ou \ m^3}{Quantidade \ de \ solo \ tratado - t}$$
(4.66)

A normalização dos ecoindicadores é realizada a fim de adimensionar os valores onde cada variável é dividida por um valor de referência (o maior valor) na comparação entre os processos. Ou seja, é sempre dividido pelo maior valor do ecoindicador, que representa o pior cenário. Como divide-se valores com a mesma unidade de medida, garante-se que eles estarão na forma adimensional, apresentando-os em um intervalo entre 0 e 1, eliminando assim os efeitos de escala. O pior cenário ambiental, nesse caso, que é antes da melhoria de processo, será sempre 1 e quanto mais o valor se aproximar de 0, melhor será o cenário com a melhoria de processo. Sendo assim, quanto menor a área apresentada no gráfico radar (que representa o conjunto dos três indicadores), mais eficiente será o desempenho ambiental (PEREIRA, 2013).

No caso estudado, serão gerados três indicadores para a UDT antes e depois da melhoria de processo, com valores entre 0 e 1. Com isso, será analisado o quão mais ecoeficiente a planta ficou com a implantação da camisa de troca térmica no forno rotativo.

4.5.1. Construção do "RADAR"

Para os processos antes e depois da melhoria analisados nessa dissertação, são considerados os ecoindicadores de consumo de água, consumo energético e emissão de CO₂.

Sendo assim, a figura poligonal será um triângulo, subdividido em triângulos menores de mesmo centro na origem. Elas serão montadas no software EXCEL® da Microsoft, 2013, utilizando o subtipo "gráfico radar", nome dado pela semelhança da tela do equipamento. A área pode ser calculada analiticamente com base na lei dos senos, apresentada no item 2.4 dessa dissertação.

A Lei dos Senos pode ser utilizada para calcular a área formada pela figura poligonal do gráfico "radar", de modo que esta área é dada pela soma das áreas dos "n" triângulos formados no gráfico (PEREIRA, 2013).

Para este cálculo, é necessário conhecer os lados dos triângulos (aqui representados pelos valores dos ecoindicadores de cada eixo do gráfico e os respectivos eixos adjacentes) e o ângulo formado pelo eixo e seu eixo adjacente (de maneira que todos os ângulos dos triângulos são iguais e conhecidos de valor $2\pi/n$). A linha que limita o gráfico unindo os pontos dos eixos (valores dos eixos) representa o terceiro lado de cada triângulo, porém não tem significado para o cálculo.

A aplicação neste trabalho gera um gráfico que apresenta três eixos (n = 3), nos quais cada um representa um ecoindicador diferente (consumo de diesel, emissão de CO₂ e consumo de água para resfriamento), formando ângulos de 120° ($2\pi/3$). Logo, este gráfico é composto por três triângulos cuja soma resulta em um triângulo maior cujos lados não são necessariamente iguais.

A Figura 4.10 representa o triângulo formado pela plotagem do gráfico radar para o estudo da ecoeficiência com base nos três indicadores supracitados. Utiliza-se, portanto a Equação 4.67 que ilustra a Lei dos Senos para calcular a área de cada um dos três triângulos.



Figura 4.10 – Gráfico "radar" de 3 ecoindicadores.

Ou seja, nota-se pela Figura 4.10, que o ecoindicador 3 possui o menor valor absoluto, enquanto o ecoindicador 2 possui o maior valor absoluto.

$$S_{12} = \left(\frac{I_1 \times I_2}{2}\right) \times sen(\theta) \tag{4.67}$$

Na Equação 4.67, S_{12} representa a área do triângulo formado entre o ponto central e os pontos que representam os valores para os ecoindicadores 1 e 2. Neste estudo, como foram utilizados três ecoindicadores, o ângulo θ será igual a 120°, o que resume a Equação 4.67 à Equação 4.68 pois o seno de 120° é aproximadamente 0,866.

$$S_{12} = \left(\frac{I_1 \times I_2}{2}\right) \times 0,866 \tag{4.68}$$

Logo, a área do triângulo formado pelos 3 indicadores é a soma das áreas dos triângulos S₁₂, S₁₃ e S₂₃, conforme demonstrado na Equação 4.69.

$$S_T = S_{12} + S_{13} + S_{23} \tag{4.69}$$

Sendo assim, S_T representa o Índice de Ecoeficiência Global, representando a área total do triângulo formado no gráfico. A comparação entre as Unidades antes e depois da implantação da camisa de troca térmica acontece a partir do cálculo do Índice de Comparação de Ecoeficiência – ICE – onde quanto menor a área do triângulo formado melhor será o cenário ambiental. Isso permitirá saber qual a condição de concentração de contaminante e teor de umidade apresenta o melhor índice após a implantação da melhoria de processos.

Com tal conclusão, questionamentos podem ser realizados na avaliação da melhor condição de entrada de solo contaminado na Unidade de Dessorção Térmica.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos durante o estudo por meio de gráficos, tabelas e cálculos gerados a partir da metodologia e compilação de dados da Unidade de Dessorção Térmica apresentada antes e depois da melhoria de processos apresentada.

Além disso, foram desenvolvidos os ecoindicadores de consumo de combustível, emissão de CO₂ e consumo de água e a partir de tais valores justifica-se a montagem e instalação dessa tecnologia com o investimento na melhoria de processo identificada, atestando financeira e economicamente a viabilidade da solução.

5.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1.1. Unidade de Dessorção Térmica Tradicional

5.1.1.1. Dados da simulação UDT - Tradicional

As tabelas 5.1 a 5.5 apresentam os resultados das simulações para a variação de C_2Cl_6 de 0 até 5% para as porcentagens de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de umidade no solo, respectivamente.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	9,69	5,24	14,93	46,32	1,53	561,12	0,00	0,00
0,50	9,76	4,65	14,41	46,59	1,51	430,54	0,35	9,32
1,00	9,84	4,13	13,96	47,05	1,49	382,10	0,72	4,71
1,50	9,91	3,62	13,53	47,57	1,47	353,77	1,11	3,17
2,00	9,99	3,12	13,11	48,11	1,46	334,51	1,53	2,41
2,50	10,06	2,62	12,69	48,66	1,44	320,33	1,97	1,95
3,00	10,14	2,13	12,27	49,23	1,43	309,36	2,45	1,64
3,50	10,22	1,64	11,86	49,81	1,41	300,57	2,95	1,42
4,00	10,29	1,15	11,44	50,38	1,40	293,34	3,50	1,26
4,50	10,37	0,67	11,03	50,97	1,38	287,27	4,08	1,13
5,00	10,44	0,18	10,62	51,56	1,36	282,09	4,71	1,03

Tabela 5.1 – Dados da simulação com 0% de umidade no solo na UDT.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	13,06	9,49	22,55	69,97	3,33	564,70	0,00	0,00
0,50	13,13	8,89	22,03	70,22	3,30	469,94	0,23	14,04
1,00	13,21	8,35	21,56	70,63	3,28	425,06	0,46	7,06
1,50	13,29	7,83	21,11	71,10	3,26	396,43	0,71	4,74
2,00	13,36	7,32	20,68	71,61	3,24	375,90	0,97	3,58
2,50	13,44	6,81	20,25	72,13	3,23	360,17	1,23	2,89
3,00	13,51	6,31	19,82	72,67	3,21	347,60	1,51	2,42
3,50	13,59	5,81	19,40	73,22	3,20	337,26	1,80	2,09
4,00	13,66	5,32	18,98	73,78	3,18	328,57	2,11	1,84
4,50	13,74	4,83	18,56	74,34	3,17	321,12	2,42	1,65
5,00	13,82	4,33	18,15	74,91	3,15	314,66	2,75	1,50

Tabela 5.2 – Dados da simulação com 5% de umidade no solo na UDT.

C ₂ Cl ₆	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	16,43	13,73	30,16	93,61	5,12	566,08	0,00	0,00
0,50	16,51	13,13	29,64	93,85	5,09	491,19	0,17	18,77
1,00	16,58	12,58	29,16	94,23	5,07	450,52	0,34	9,42
1,50	16,66	12,05	28,71	94,67	5,05	423,09	0,52	6,31
2,00	16,73	11,53	28,26	95,15	5,04	402,71	0,71	4,76
2,50	16,81	11,02	27,83	95,65	5,02	386,72	0,90	3,83
3,00	16,89	10,51	27,39	96,17	5,01	373,68	1,10	3,21
3,50	16,96	10,00	26,97	96,70	4,99	362,78	1,30	2,76
4,00	17,04	9,50	26,54	97,24	4,98	353,48	1,51	2,43
4,50	17,11	9,00	26,12	97,78	4,97	345,42	1,72	2,17
5,00	17,19	8,51	25,70	98,34	4,96	338,35	1,95	1,97

Tabela 5.3 – Dados da simulação com 10% de umidade no solo na UDT.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	19,80	17,98	37,78	117,25	6,91	566,81	0,00	0,00
0,50	19,88	17,38	37,26	117,48	6,88	504,72	0,13	23,50
1,00	19,96	16,82	36,77	117,84	6,86	467,79	0,27	11,78
1,50	20,03	16,28	36,31	118,26	6,84	441,84	0,41	7,88
2,00	20,11	15,75	35,86	118,71	6,83	422,06	0,56	5,94
2,50	20,18	15,23	35,41	119,19	6,81	406,24	0,71	4,77
3,00	20,26	14,72	34,97	119,69	6,80	393,16	0,86	3,99
3,50	20,33	14,21	34,54	120,20	6,79	382,09	1,01	3,43
4,00	20,41	13,70	34,11	120,73	6,78	372,55	1,17	3,02
4,50	20,49	13,20	33,68	121,26	6,77	364,20	1,34	2,69
5,00	20,56	12,70	33,26	121,80	6,76	356,82	1,50	2,44

Tabela 5.4 – Dados da simulação com 15% de umidade no solo na UDT.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	23,18	22,22	45,40	140,90	8,71	567,26	0,00	0,00
0,50	23,25	21,62	44,87	141,12	8,67	514,16	0,11	28,22
1,00	23,33	21,05	44,38	141,46	8,65	480,44	0,23	14,15
1,50	23,40	20,51	43,91	141,86	8,63	455,95	0,34	9,46
2,00	23,48	19,97	43,46	142,29	8,62	436,91	0,46	7,11
2,50	23,56	19,45	43,01	142,76	8,60	421,44	0,58	5,71
3,00	23,63	18,93	42,56	143,24	8,59	408,50	0,70	4,77
3,50	23,71	18,42	42,12	143,73	8,58	397,45	0,83	4,11
4,00	23,78	17,90	41,69	144,24	8,57	387,84	0,96	3,61
4,50	23,86	17,40	41,26	144,76	8,56	379,38	1,09	3,22
5,00	23,93	16,89	40,83	145,29	8,55	371,85	1,22	2,91

Tabela 5.5 – Dados da simulação com 20% de umidade no solo na UDT.

Com os resultados das Tabelas 5.1 a 5.5, construiu-se os gráficos das Figuras 5.4 a 5.10, nos quais são apresentados o consumo de diesel, a emissão de CO_2 , o consumo de água para resfriamento, a quantidade de contaminante destruído por quilo de diesel, a quantidade de CO_2 emitido por quilo de contaminante destruído, a temperatura de entrada dos gases no FPC e uma comparação do consumo de diesel no forno rotativo e no FPC para as concentrações de C_2Cl_6 de 0% a 5%, com umidade variando em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%.
5.1.1.2. Gráficos da simulação da UDT



Figura 5.1 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de diesel.



Figura 5.2 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na emissão de $CO_{2(g)}$.



 $\label{eq:Figura 5.3-Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de H_2O_{(l)} para resfriamento.$



Figura 5.4 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na quantidade de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel.



Figura 5.5 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na quantidade de CO_2 emitido por 1 kg de C_2Cl_6 destruído.



Figura 5.6 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na temperatura de saída do trocador de calor – corrente fria.



Figura 5.7 – Impacto da concentração de C₂Cl₆ e de umidade no solo contaminado no consumo de diesel no forno rotativo e no forno de pós-combustão.

5.1.2. Unidade de Dessorção Térmica com Camisa de Troca Térmica

5.1.2.1. Dados da simulação da UDT-CT

As tabelas 5.1 a 5.5 apresentam os resultados das simulações da UDT-CT para a variação de C_2Cl_6 de 0 até 5% para as porcentagens de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de umidade no solo, respectivamente.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	7,95	4,30	12,26	38,04	0,91	561,12	0,00	0,00
0,50	8,05	3,74	11,79	38,44	0,90	417,25	0,42	7,69
1,00	8,14	3,23	11,37	39,00	0,89	368,56	0,88	3,90
1,50	8,23	2,73	10,96	39,60	0,88	340,91	1,37	2,64
2,00	8,32	2,24	10,56	40,21	0,88	322,46	1,89	2,01
2,50	8,41	1,75	10,16	40,84	0,87	309,07	2,46	1,63
3,00	8,50	1,27	9,77	41,47	0,86	298,83	3,07	1,38
3,50	8,59	0,79	9,38	42,11	0,85	290,69	3,73	1,20
4,00	8,67	0,31	8,98	42,75	0,85	284,05	4,45	1,07
4,50	8,76	-0,17	8,59	43,40	0,84	278,52	5,24	0,96
5,00	8,85	-0,65	8,20	44,04	0,83	273,83	6,10	0,88

Tabela 5.6 – Dados da simulação com 0% de umidade no solo na UDT-CT.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	9,94	7,80	17,74	55,04	565,49	0,00	0,00	2,21
0,50	10,04	7,23	17,26	55,43	458,47	0,29	11,09	2,20
1,00	10,13	6,70	16,83	55,96	411,78	0,59	5,60	2,19
1,50	10,22	6,20	16,42	56,53	382,89	0,91	3,77	2,18
2,00	10,31	5,70	16,01	57,12	362,55	1,25	2,86	2,18
2,50	10,40	5,21	15,60	57,72	347,19	1,60	2,31	2,17
3,00	10,49	4,72	15,20	58,34	335,06	1,97	1,94	2,16
3,50	10,58	4,23	14,81	58,96	325,16	2,36	1,68	2,16
4,00	10,66	3,74	14,41	59,59	316,90	2,78	1,49	2,15
4,50	10,75	3,26	14,01	60,22	309,88	3,21	1,34	2,14
5,00	10,84	2,78	13,62	60,85	303,83	3,67	1,22	2,14

Tabela 5.7 – Dados da simulação com 5% de umidade no solo na UDT-CT.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	11,92	11,29	23,21	72,04	3,51	567,17	0,00	0,00
0,50	12,02	10,72	22,74	72,43	3,49	481,34	0,22	14,49
1,00	12,11	10,19	22,30	72,93	3,49	438,09	0,45	7,29
1,50	12,21	9,67	21,88	73,48	3,48	409,81	0,69	4,90
2,00	12,30	9,17	21,46	74,05	3,48	389,22	0,93	3,70
2,50	12,39	8,67	21,06	74,64	3,48	373,27	1,19	2,99
3,00	12,48	8,17	20,65	75,24	3,48	360,42	1,45	2,51
3,50	12,57	7,68	20,25	75,85	3,48	349,77	1,73	2,17
4,00	12,65	7,19	19,85	76,46	3,47	340,75	2,02	1,91
4,50	12,74	6,70	19,45	77,08	3,47	332,99	2,31	1,71
5,00	12,83	6,22	19,05	77,71	3,47	326,23	2,62	1,55

Tabela 5.8 – Dados da simulação com 10% de umidade no solo na UDT-CT.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	13,91	14,79	28,69	89,04	4,80	568,06	0,00	0,00
0,50	14,00	14,21	28,22	89,42	4,79	496,18	0,18	17,88
1,00	14,10	13,67	27,77	89,91	4,78	456,28	0,36	8,99
1,50	14,19	13,15	27,35	90,44	4,78	429,10	0,55	6,03
2,00	14,28	12,64	26,93	91,00	4,78	408,80	0,74	4,55
2,50	14,37	12,14	26,51	91,57	4,78	392,78	0,94	3,66
3,00	14,46	11,64	26,10	92,16	4,78	379,69	1,15	3,07
3,50	14,55	11,14	25,70	92,75	4,79	368,71	1,36	2,65
4,00	14,64	10,65	25,29	93,36	4,79	359,32	1,58	2,33
4,50	14,73	10,16	24,89	93,97	4,79	351,17	1,81	2,09
5,00	14,82	9,67	24,49	94,58	4,79	344,00	2,04	1,89

Tabela 5.9 – Dados da simulação com 15% de umidade no solo na UDT-CT.

C2Cl6	Diesel F.R.	Diesel P.C.	Diesel total	Emissão CO _{2(g)}	Consumo de H2O	Temp. de entrada	C2Cl6 destruído por kg de	CO2 emitido por kg de C2Cl6
%	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	[kg/t de solo]	- [kg/t de solo]	[m³/t de solo]	no P.C. - [°C]	diesel - [kg]	destruído - [kg]
0,00	15,89	18,28	34,17	106,04	6,10	568,61	0,00	0,00
0,50	15,99	17,70	33,69	106,42	6,09	506,68	0,15	21,28
1,00	16,08	17,16	33,25	106,89	6,08	469,78	0,30	10,69
1,50	16,18	16,64	32,81	107,41	6,08	443,82	0,46	7,16
2,00	16,27	16,12	32,39	107,95	6,08	424,02	0,62	5,40
2,50	16,36	15,61	31,97	108,51	6,09	408,18	0,78	4,34
3,00	16,45	15,11	31,56	109,09	6,09	395,08	0,95	3,64
3,50	16,54	14,61	31,15	109,68	6,09	383,98	1,12	3,13
4,00	16,63	14,11	30,74	110,27	6,10	374,42	1,30	2,76
4,50	16,72	13,62	30,34	110,87	6,10	366,06	1,48	2,46
5,00	16,81	13,12	29,93	111,48	6,11	358,66	1,67	2,23

Tabela 5.10 – Dados da simulação com 20% de umidade no solo na UDT-CT.

Com os resultados das Tabelas 5.6 a 5.10, construiu-se os gráficos das Figuras 5.11 a 5.17, nos quais são apresentados o consumo de diesel, a emissão de CO_2 , o consumo de água para resfriamento, a quantidade de contaminante destruído por quilo de diesel, a quantidade de CO_2 emitido por quilo de contaminante destruído, a temperatura de entrada dos gases no FPC e uma comparação do consumo de diesel no forno rotativo e no FPC para as concentrações de C_2Cl_6 de 0% a 5%, com umidade variando em 0%, 5%, 10%, 15% e 20% para a UDT com a camisa de troca térmica instalada.

5.1.2.2. Gráficos da simulação da UDT-CT



Figura 5.8 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de diesel da UDT-CT.



Figura 5.9 – Impacto da concentração de C₂Cl₆ e de umidade no solo contaminado na emissão de CO_{2(g)} da UDT-CT.



 $\label{eq:Figura 5.10-Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de H_2O_{(1)} para resfriamento da UDT-CT.$



Figura 5.11 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na quantidade de C_2Cl_6 destruída por 1 kg de diesel da UDT-CT.



Figura 5.12 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na quantidade de CO_2 emitido por 1 kg de C_2Cl_6 destruído da UDT-CT.



Figura 5.13 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na temperatura de saída do trocador de calor – corrente fria – UDT-CT.



Figura 5.14 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado no consumo de diesel no forno rotativo e no forno de pós-combustão na UDT-CT.

5.1.3. Comparação entre as Unidades de Dessorção térmica antes e depois da melhoria de processo

5.1.3.1. Dados comparados

A partir dos dados obtidos nas tabelas 5.1 a 5.10, comparou-se os resultados obtidos realizando-se a diferença dos resultados encontrados para o consumo de diesel, emissão de CO₂, para o consumo de H₂O para resfriamento, para a diferença de temperatura na entrada do FPC, para a diferença da quantidade de contaminante que é destruído por quilo de diesel e para a diferença de CO₂ que é emitido por quilo de contaminante destruído para as concentrações de C₂Cl₆ de 0% a 5%, com umidade variando em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. O objetivo é avaliar quantitativamente o benefício gerado pela instalação da camisa de troca térmica. Com isso, obteve-se os dados das Tabelas 5.11 a 5.15.

C ₂ Cl ₆	∆ consu die	de mo de esel	∆ de e de C	missão O2(g)	Δ consu H_2	$\begin{array}{ccc} \Delta \ de & \Delta \ de \ temp. \\ \textbf{onsumo de} & \textbf{na entrada} \\ \textbf{H}_2 \textbf{O}_{(l)} & \textbf{do P.C.} \end{array}$		∆ de C2Cl6 destruído por kg de diesel	∆ de CO2 emitido por kg de C2Cl6 destruído	
%	kg/t de solo	⁰ ⁄0	kg/t de solo	%	m³/t de solo	⁰ ⁄0	°C	%	[kg]	[kg]
0,00	2,67	17,88	8,28	17,88	0,62	40,68	0,00	1,25	0,00	0,00
0,50	2,62	18,21	8,15	17,48	0,61	40,45	13,29	3,09	0,08	1,63
1,00	2,59	18,58	8,05	17,11	0,60	40,24	13,54	3,54	0,16	0,80
1,50	2,57	18,98	7,97	16,75	0,59	40,05	12,86	3,63	0,26	0,53
2,00	2,54	19,41	7,89	16,41	0,58	39,88	12,04	3,60	0,37	0,39
2,50	2,52	19,88	7,82	16,08	0,57	39,72	11,26	3,51	0,49	0,31
3,00	2,50	20,38	7,76	15,76	0,56	39,58	10,53	3,41	0,63	0,26
3,50	2,48	20,92	7,70	15,45	0,56	39,46	9,88	3,29	0,78	0,22
4,00	2,46	21,49	7,63	15,15	0,55	39,35	9,29	3,17	0,96	0,19
4,50	2,44	22,12	7,57	14,86	0,54	39,25	8,75	3,05	1,16	0,17
5,00	2,42	22,79	7,51	14,57	0,53	39,17	8,27	2,93	1,39	0,15

Tabela 5.11 – Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de
processos com umidade constante em 0%.

C ₂ Cl ₆	∆ consu di€	de mo de esel	∆ de ei de C	missão O2(g)	Δ consu H_2	$\begin{array}{c ccccccc} & \Delta \ de \ C_2Cl_6 \\ \Delta \ de & \Delta \ de \ temp. & destruído \\ consumo \ de & na \ entrada & por \ kg \ de \\ H_2O_{(l)} & do \ P.C. & diesel \\ & consumido \end{array}$		∆ de C2Cl6 destruído por kg de diesel	∆ de CO2 emitido por kg de C2Cl6 destruído	
%	kg/t de solo	⁰ ⁄0	kg/t de solo	%	m³/t de solo	%	°C	%	[kg]	[kg]
0,00	4,81	21,33	14,93	21,33	1,12	33,62	-0,78	-0,14	0,00	0,00
0,50	4,76	21,62	14,78	21,05	1,10	33,44	11,46	2,44	0,06	2,96
1,00	4,73	21,92	14,67	20,77	1,09	33,26	13,28	3,12	0,13	1,47
1,50	4,70	22,24	14,57	20,50	1,08	33,09	13,54	3,42	0,20	0,97
2,00	4,67	22,58	14,49	20,23	1,07	32,93	13,34	3,55	0,28	0,72
2,50	4,64	22,93	14,41	19,98	1,06	32,79	12,97	3,60	0,37	0,58
3,00	4,62	23,30	14,33	19,72	1,05	32,65	12,55	3,61	0,46	0,48
3,50	4,60	23,69	14,26	19,48	1,04	32,52	12,10	3,59	0,56	0,41
4,00	4,57	24,09	14,19	19,24	1,03	32,40	11,66	3,55	0,67	0,35
4,50	4,55	24,52	14,13	19,00	1,02	32,29	11,24	3,50	0,79	0,31
5,00	4,53	24,96	14,06	18,77	1,01	32,18	10,83	3,44	0,92	0,28

Tabela 5.12 – Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de
processos com umidade constante em 5%.

C ₂ Cl ₆	∆ consu di€	de mo de esel	∆ de ei de C	missão O2(g)	Δ consu H_2	de mo de O(1)	∆ de temp. le na entrada do P.C.		∆ de C2Cl6 destruído por kg de diesel	∆ de CO2 emitido por kg de C2Cl6 destruído
%	kg/t de solo	⁰ ⁄0	kg/t de solo	%	m³/t de solo	%	°C	%	[kg]	[kg]
0,00	6,95	23,04	21,57	23,04	1,62	31,56	-1,08	-0,19	0,00	0,00
0,50	6,90	23,28	21,42	22,82	1,60	31,39	9,84	2,00	0,05	4,28
1,00	6,86	23,53	21,30	22,60	1,58	31,21	12,43	2,76	0,11	2,13
1,50	6,83	23,79	21,19	22,39	1,57	31,04	13,27	3,14	0,16	1,41
2,00	6,80	24,05	21,10	22,17	1,55	30,88	13,50	3,35	0,22	1,05
2,50	6,77	24,33	21,01	21,97	1,54	30,72	13,45	3,48	0,29	0,84
3,00	6,74	24,62	20,93	21,76	1,53	30,57	13,26	3,55	0,36	0,70
3,50	6,72	24,92	20,85	21,56	1,52	30,42	13,01	3,59	0,43	0,60
4,00	6,69	25,22	20,77	21,36	1,51	30,27	12,73	3,60	0,51	0,52
4,50	6,67	25,54	20,70	21,17	1,50	30,13	12,43	3,60	0,59	0,46
5,00	6,65	25,87	20,63	20,98	1,49	30,00	12,12	3,58	0,68	0,41

Tabela 5.13 – Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de processos com umidade constante em 10%.

C ₂ Cl ₆	∆ consu di€	de mo de esel	∆ de en de C	missão O2(g)	Δ consu H_2	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		∆ de CO2 emitido por kg de C2Cl6 destruído		
%	kg/t de solo	⁰ ⁄0	kg/t de solo	%	m³/t de solo	⁰ ⁄0	°C	%	[kg]	[kg]
0,00	9,09	24,06	28,22	24,06	2,11	30,55	-1,24	-0,22	0,00	0,00
0,50	9,04	24,27	28,06	23,88	2,09	30,39	8,53	1,69	0,04	5,61
1,00	9,00	24,47	27,93	23,70	2,07	30,24	11,51	2,46	0,09	2,79
1,50	8,96	24,69	27,82	23,52	2,06	30,08	12,74	2,88	0,14	1,85
2,00	8,93	24,91	27,72	23,35	2,04	29,93	13,27	3,14	0,19	1,39
2,50	8,90	25,13	27,62	23,17	2,03	29,78	13,46	3,31	0,24	1,10
3,00	8,87	25,37	27,53	23,00	2,01	29,63	13,47	3,43	0,29	0,92
3,50	8,85	25,61	27,45	22,84	2,00	29,49	13,38	3,50	0,35	0,78
4,00	8,82	25,85	27,37	22,67	1,99	29,35	13,22	3,55	0,41	0,68
4,50	8,79	26,11	27,29	22,51	1,98	29,21	13,03	3,58	0,47	0,61
5,00	8,77	26,37	27,21	22,34	1,96	29,07	12,82	3,59	0,54	0,54

Tabela 5.14 – Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de processos com umidade constante em 15%.

C ₂ Cl ₆	∆ consu die	de mo de sel	∆ de ei de C	missão O2(g)	Δ consu H_2	de mo de O(1)	∆ de temp. na entrada do P.C.		∆ de C2Cl6 destruído por kg de diesel	∆ de CO2 emitido por kg de C2Cl6 destruído
%	kg/t de solo	%	kg/t de solo	%	m³/t de solo	%	°C	%	[kg]	[kg]
0,00	11,23	24,74	34,86	24,74	2,61	29,94	-1,34	-0,24	0,00	0,00
0,50	11,18	24,92	34,70	24,59	2,58	29,81	7,48	1,45	0,04	6,94
1,00	11,14	25,10	34,57	24,44	2,57	29,66	10,65	2,22	0,08	3,46
1,50	11,10	25,28	34,45	24,28	2,55	29,52	12,13	2,66	0,12	2,30
2,00	11,07	25,46	34,34	24,13	2,53	29,38	12,88	2,95	0,16	1,72
2,50	11,03	25,66	34,24	23,99	2,52	29,25	13,26	3,15	0,20	1,37
3,00	11,00	25,85	34,15	23,84	2,50	29,11	13,43	3,29	0,25	1,14
3,50	10,97	26,05	34,06	23,69	2,49	28,98	13,46	3,39	0,29	0,97
4,00	10,95	26,26	33,97	23,55	2,47	28,85	13,42	3,46	0,34	0,85
4,50	10,92	26,47	33,89	23,41	2,46	28,72	13,33	3,51	0,39	0,75
5,00	10,89	26,68	33,81	23,27	2,44	28,59	13,20	3,55	0,45	0,68
$\Delta = \text{Dif}$	erença.									

Tabela 5.15 – Comparativo de dados da simulação da UDT antes e depois da melhoria de
processos com umidade constante em 20%.

Além disso, os dados obtidos da diferença de consumo de diesel apresentados nas Tabelas 5.11 a 5.15, permitem encontrarmos a eficiência energética da planta em kW, a partir da Tabela 3.1, que apresenta a capacidade operacional da planta (10 t/h) e o calor de combustão do diesel (-44,2684645 kJ/g) apresentado na seção 4.2.2. Essa eficiência energética é calculada da seguinte forma:

Eficiência energética

$$= \left(\Delta \ de \ consumo \ de \ diesel \frac{kg}{t}\right) \times \left(\frac{1}{360} \frac{t}{s}\right)$$

$$\times \left(|-44.268,4645| \frac{kJ}{kg}\right)$$
(5.1)

A partir da Equação 5.1, construiu-se a Tabela 5.16 que apresenta os dados de eficiência energética após a instalação da Camisa de Troca Térmica.

C ₂ Cl ₆		Efici	ência Energética	a - kW	
- %	Umidade 0%	Umidade 5%	Umidade 10%	Umidade 15%	Umidade 20%
0,00	328,18	591,46	854,74	1.118,02	1.381,30
0,50	322,78	585,66	848,70	1.111,82	1.374,98
1,00	318,97	581,25	843,90	1.106,73	1.369,67
1,50	315,73	577,49	839,75	1.102,28	1.364,99
2,00	312,80	574,10	836,01	1.098,26	1.360,73
2,50	310,06	570,95	832,54	1.094,53	1.356,77
3,00	307,44	567,98	829,27	1.091,01	1.353,04
3,50	304,92	565,13	826,16	1.087,67	1.349,50

 Tabela 5.16 – Comparativo de eficiência energética entre as Unidades antes e depois da melhoria de processo.

Continuação da Tabela 5.16:										
4,00	302,47	562,37	823,16	1.084,46	1.346,10					
4,50	300,07	559,71	820,26	1.081,36	1.342,82					
5,00	297,71	557,11	817,44	1.078,35	1.339,64					

5.1.3.2. Gráficos das comparações

Com os resultados das Tabelas 5.11 a 5.16, avaliaram-se os resultados separadamente para cada indicador ambiental (consumo de diesel, emissão de CO_2 e consumo de água), para as concentrações de C_2Cl_6 variando de 0% a 5% e com a umidade variando em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, conforme designado abaixo:

- Diesel:
 - Variação do consumo de diesel (Figuras 5.18 até 5.28);
 - Massa de contaminante destruída por quilo de diesel (Figuras 5.29 até 5.34);
- Dióxido de Carbono:
 - Variação da emissão de CO₂ (Figuras 5.35 até 5.45);
 - Massa de CO₂ emitido por quilo de contaminante destruído (Figuras 5.46 a 5.51);
- Água:
 - Variação do consumo de água para resfriamento dos gases (Figuras 5.52 até 5.62);

Além disso, as variações desses três indicadores ambientais foram avaliadas de forma percentual a fim de se observar os visualmente os que sofreram maior impacto com a instalação da camisa de troca térmica no processo, conforme Figura 5.63.



• Análise do consumo:

Figura 5.15 – Comparação do impacto da concentração de C₂Cl₆ no consumo de diesel para casos de 0% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.16 – Impacto da concentração de C₂Cl₆ na diferença do consumo de diesel para casos de 0% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.17 – Comparação do impacto da concentração de C₂Cl₆ no consumo de diesel para casos de 5% de umidade no solo contaminado.



 $\label{eq:Figura 5.18} \textbf{Figura 5.18} - \textbf{Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 5% de umidade no solo contaminado.}$



Figura 5.19 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 no consumo de diesel para casos de 10% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.20 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 10% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.21 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 no consumo de diesel para casos de 15% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.22 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 15% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.23 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 no consumo de diesel para casos de 20% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.24 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença do consumo de diesel para casos de 20% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.25 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo na redução do consumo de diesel.



• Análise da massa de C₂Cl₆ destruída por 1 kg de diesel consumido:





Figura 5.27 – Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de C₂Cl₆ destruída por 1 kg de diesel para casos de 5% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.28 – Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de C₂Cl₆ destruída por 1 kg de diesel para casos de 10% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.29 – Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de C₂Cl₆ destruída por 1 kg de diesel para casos de 15% de umidade no solo contaminado.







Figura 5.31 – Impacto da concentração de contaminante e umidade no solo contaminado no ganho na massa de C₂Cl₆ destruída por 1 kg de diesel.

5.1.3.2.2. Dióxido de Carbono – $CO_{2(g)}$



• Análise da emissão de CO_{2(g)}:

Figura 5.32 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 0% de umidade no solo contaminado.



 $\label{eq:Figura 5.33} \mbox{-} Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 0% de umidade no solo contaminado.$



Figura 5.34 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 5% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.35 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 5% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.36 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 10% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.37 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 10% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.38 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 15% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.39 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 15% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.40 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 na emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 20% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.41 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$ para casos de 20% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.42 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo contaminado na diferença da emissão de $CO_{2(g)}$.

• Análise da massa de CO₂ emitida por 1 kg de contaminante tratado:



Figura 5.43 – Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO₂ emitida por 1 kg de C₂Cl₆ destruído para casos de 0% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.44 – Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO₂ emitida por 1 kg de C₂Cl₆ destruído para casos de 5% de umidade no solo contaminado.


Figura 5.45 – Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído para casos de 10% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.46 – Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído para casos de 15% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.47 – Comparação do impacto da concentração de contaminante na massa de CO_2 emitida por 1 kg de C_2Cl_6 destruído para casos de 20% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.48 – Impacto da concentração de contaminante e umidade no solo contaminado na redução da massa de CO₂ emitida por 1 kg de C₂Cl₆ destruído.

5.1.3.2.3. $\acute{A}gua - H_2O_{(l)}$





Figura 5.49 – Comparação do impacto da concentração de C₂Cl₆ no consumo de água para resfriamento para casos de 0% de umidade no solo contaminado.







Figura 5.51 – Comparação do impacto da concentração de C₂Cl₆ no consumo de água para resfriamento para casos de 5% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.52 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 5% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.53 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 no consumo de água para resfriamento para casos de 10% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.54 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 10% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.55 – Comparação do impacto da concentração de C_2Cl_6 no consumo de água para resfriamento para casos de 15% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.56 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 15% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.57 – Comparação do impacto da concentração de C₂Cl₆ no consumo de água para resfriamento para casos de 20% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.58 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 na redução do consumo de água para resfriamento nos casos de 20% de umidade no solo contaminado.



Figura 5.59 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo na redução do consumo de água para resfriamento.



5.1.3.2.4. Análise percentual da redução de consumo de diesel, emissão de CO₂ e do consumo de água antes e após a melhoria apresentada

Figura 5.60 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 e de umidade no solo no % de consumo de diesel, emissão de CO_2 e consumo de água para resfriamento.

5.1.4. Comparativo econômico entre as Unidades de Dessorção Térmica antes e depois da melhoria de processo

A partir dos dados da variação do consumo de diesel obtidos nas Tabelas 5.11 a 5.15, e dos dados fornecidos de custo do diesel, do número de horas de funcionamento da planta sem paradas por ano e da densidade do diesel, pelas Tabelas 5.18 e 5.19, gerou-se os dados da Tabela 5.17 que apresenta a economia gerada pela instalação da camisa de troca térmica, considerando-se a de variação de contaminante de 0% a 5% nas umidades de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%.

Os dados da Tabela 5.17 foram apresentados graficamente conforme Figuras 5.61 a 5.66.

5.1.4.1. Dados econômicos comparados

	Economia anual no consumo de diesel						
C ₂ Cl ₆			- R\$				
- %	Umidade 0%	Umidade 5%	Umidade 10%	Umidade 15%	Umidade 20%		
0,00	847.681,00	1.527.738,32	2.207.795,14	2.887.852,39	3.567.909,64		
0,50	833.754,24	1.512.759,25	2.192.193,05	2.871.835,81	3.551.597,13		
1,00	823.903,38	1.501.383,66	2.179.791,53	2.858.684,14	3.537.869,99		
1,50	815.546,18	1.491.670,11	2.169.087,63	2.847.208,66	3.525.771,19		
2,00	807.970,63	1.482.911,12	2.159.422,84	2.836.812,31	3.514.765,42		
2,50	800.884,51	1.474.777,68	2.150.464,78	2.827.172,28	3.504.545,65		
3,00	794.127,78	1.467.088,29	2.142.021,44	2.818.094,48	3.494.920,53		
3,50	787.612,29	1.459.731,34	2.133.971,20	2.809.452,66	3.485.762,60		

Tabela 5.17 – Comparativo econômico entre as Unidades antes e depois da melhoria de processo.

		Continuaç	ão da Tabela 5.1	17:	
4,00	781.274,69	1.452.593,89	2.126.231,74	2.801.159,76	3.476.982,38
4,50	775.079,71	1.445.741,47	2.118.744,56	2.793.153,00	3.468.514,52
5,00	768.997,37	1.439.019,27	2.111.466,43	2.785.385,47	3.460.309,68

Tabela 5.18 – Valor econômico de referência do diesel e horas anuais de funcionamento das
Unidades de Dessorção Térmica.

Valor do Diesel	R\$3,082 / Litro			
Horas anuais trabalhadas	8.760,00			
Fonte: ANP (2017)				

Tabela 5.19 – Densidade do diesel.

Densidade	0,85 kg/L	
Fonte: GREEN e PERRY (2007).		

Os valores de economia foram calculados conforme Equação 5.1:

$\left\{ \left[\Delta(consumo \ de \ diesel) \left(\frac{kg}{t_{processada}} \right) \right] \times \left[(Custo \ do \ diesel) \left(\frac{R\$}{Litro} \right) \right] \times \left[(horas \ anuais \ trabalhadas)(h) \right] \times \left[(toneladas \ procesadas \ por \ hora) \left(\frac{t_{processada}}{h} \right) \right] \right\}$	
$\left((densidade \ do \ disel) \left(\frac{kg}{Litro} \right) \right)$	(5.1)

5.1.4.2. Gráficos de Comparação econômica



Figura 5.61 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 0% na redução de custo com diesel.







Figura 5.63 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 10% na redução de custo com diesel.



Figura 5.64 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 15% na redução de custo com diesel.



Figura 5.65 – Impacto da concentração de C_2Cl_6 com umidade constante em 20% na redução de custo com diesel.



Figura 5.66 – Impacto da concentração de C₂Cl₆ e umidade na redução de custo com diesel.

192

5.1.5. Dados de ecoindicadores

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 5.1 até 5.10, realizou-se a normalização dos indicadores ambientais de consumo de combustível, emissão de CO_2 e consumo de água, conforme metodologia apresentada na seção 4.5, obtendo-se assim os dados das Tabelas 5.20 a 5.24.

C2Cl6	Consumo de combustível - Diesel		Emissão	Emissão de CO2		Consumo de água	
- %	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT	
0,00	1,00	0,8212	1,00	0,8212	1,00	0,5932	
0,50	1,00	0,8179	1,00	0,8252	1,00	0,5955	
1,00	1,00	0,8142	1,00	0,8289	1,00	0,5976	
1,50	1,00	0,8102	1,00	0,8325	1,00	0,5995	
2,00	1,00	0,8059	1,00	0,8359	1,00	0,6012	
2,50	1,00	0,8012	1,00	0,8392	1,00	0,6028	
3,00	1,00	0,7962	1,00	0,8424	1,00	0,6042	
3,50	1,00	0,7908	1,00	0,8455	1,00	0,6054	
4,00	1,00	0,7851	1,00	0,8485	1,00	0,6065	
4,50	1,00	0,7788	1,00	0,8514	1,00	0,6075	
5,00	1,00	0,7721	1,00	0,8543	1,00	0,6083	

Tabela 5.20 – Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 0% e variando o
teor de contaminante.

	Consun combustíve	no de el - Diesel	el Emissão de CO ₂ Consumo d		de água	
C2Cl6 - %	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT
0,00	1,00	0,7867	1,00	0,7867	1,00	0,6638
0,50	1,00	0,7838	1,00	0,7895	1,00	0,6656
1,00	1,00	0,7808	1,00	0,7923	1,00	0,6674
1,50	1,00	0,7776	1,00	0,7950	1,00	0,6691
2,00	1,00	0,7742	1,00	0,7977	1,00	0,6707
2,50	1,00	0,7707	1,00	0,8002	1,00	0,6721
3,00	1,00	0,7670	1,00	0,8028	1,00	0,6735
3,50	1,00	0,7631	1,00	0,8052	1,00	0,6748
4,00	1,00	0,7591	1,00	0,8076	1,00	0,6760
4,50	1,00	0,7548	1,00	0,8100	1,00	0,6771
5,00	1,00	0,7504	1,00	0,8123	1,00	0,6782

Tabela 5.21 – Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 5% e variando o teor de contaminante.

	Consun combustíve	Consumo de nbustível - Diesel Emissão de CO ₂		de CO ₂	Consumo de água	
C2Cl6 - %	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT
0,00	1,00	0,7696	1,00	0,7696	1,00	0,6844
0,50	1,00	0,7672	1,00	0,7718	1,00	0,6861
1,00	1,00	0,7647	1,00	0,7740	1,00	0,6879
1,50	1,00	0,7621	1,00	0,7761	1,00	0,6896
2,00	1,00	0,7595	1,00	0,7783	1,00	0,6912
2,50	1,00	0,7567	1,00	0,7803	1,00	0,6928
3,00	1,00	0,7538	1,00	0,7824	1,00	0,6943
3,50	1,00	0,7508	1,00	0,7844	1,00	0,6958
4,00	1,00	0,7478	1,00	0,7864	1,00	0,6973
4,50	1,00	0,7446	1,00	0,7883	1,00	0,6987
5,00	1,00	0,7413	1,00	0,7902	1,00	0,7000

Tabela 5.22 – Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 10% e variandoo teor de contaminante.

	Consun combustíve	no de el - Diesel	el Emissão de CO ₂ Cons		Consumo	nsumo de água	
- %	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT	
0,00	1,00	0,7594	1,00	0,7594	1,00	0,6945	
0,50	1,00	0,7573	1,00	0,7612	1,00	0,6961	
1,00	1,00	0,7553	1,00	0,7630	1,00	0,6976	
1,50	1,00	0,7531	1,00	0,7648	1,00	0,6992	
2,00	1,00	0,7509	1,00	0,7665	1,00	0,7007	
2,50	1,00	0,7487	1,00	0,7683	1,00	0,7022	
3,00	1,00	0,7463	1,00	0,7700	1,00	0,7037	
3,50	1,00	0,7439	1,00	0,7716	1,00	0,7051	
4,00	1,00	0,7415	1,00	0,7733	1,00	0,7065	
4,50	1,00	0,7389	1,00	0,7749	1,00	0,7079	
5,00	1,00	0,7363	1,00	0,7766	1,00	0,7093	

Tabela 5.23 – Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 15% e variandoo teor de contaminante.

	Consun combustíve	ımo de vel - Diesel Emissão de CO ₂		Consumo de água		
C2Cl6 - %	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT	UDT - Tradicional	UDT-CT
0,00	1,00	0,7526	1,00	0,7526	1,00	0,7006
0,50	1,00	0,7508	1,00	0,7541	1,00	0,7019
1,00	1,00	0,7490	1,00	0,7556	1,00	0,7034
1,50	1,00	0,7472	1,00	0,7572	1,00	0,7048
2,00	1,00	0,7454	1,00	0,7587	1,00	0,7062
2,50	1,00	0,7434	1,00	0,7601	1,00	0,7075
3,00	1,00	0,7415	1,00	0,7616	1,00	0,7089
3,50	1,00	0,7395	1,00	0,7631	1,00	0,7102
4,00	1,00	0,7374	1,00	0,7645	1,00	0,7115
4,50	1,00	0,7353	1,00	0,7659	1,00	0,7128
5,00	1,00	0,7332	1,00	0,7673	1,00	0,7141

Tabela 5.24 – Ecoindicadores normalizados com umidade do solo fixada em 20% e variando o teor de contaminante.

5.1.5.1. Gráficos do tipo radar

A partir dos dados normalizados apresentados nas Tabelas 5.20 até 5.24, são gerados gráficos do tipo radar, conforme Figuras 5.67 até 5.75. Eles foram analisados nos percentuais de contaminantes de 0% 2,5% e 5% para umidades constantes a 0%, 10% e 20% no solo contaminado. Limitou-se a esses dados, pois as variações eram mínimas ponto a ponto. Logo, utilizou-se os dados das medianas que são suficientes para uma análise da performance ecoambiental da planta.



Figura 5.67 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 0% e concentração de contaminante em 0% no solo.



Figura 5.68 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 0% e concentração de contaminante em 2,5% no solo.



Figura 5.69 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 0% e concentração de contaminante em 5% no solo.



Figura 5.70 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 10% e concentração de contaminante em 0% no solo.



Figura 5.71 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 10% e concentração de contaminante em 2,5% no solo.



Figura 5.72 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 10% e concentração de contaminante em 5% no solo.



Figura 5.73 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 20% e concentração de contaminante em 0% no solo.



Figura 5.74 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 20% e concentração de contaminante em 2,5% no solo.



Figura 5.75 – Gráfico de "radar" de ecoindicadores para a UDT antes e depois da instalação da camisa de troca térmica para umidade 20% e concentração de contaminante em 10% no solo.

5.1.5.2. Cálculo da área dos ecoindicadores e Comparação dos resultados

Para o cálculo da área dos gráficos de radar, utilizou-se a metodologia apresentada na seção 4.5.1 através das equações 4.68 e 4.69, a partir dos dados apresentados nas Tabelas 5.20 a 5.24. Com dos dados das áreas, calculou-se o ICE utilizando-se a Equação 2.6. Esses resultados foram apresentados nas Tabelas 5.25 a 5.29.

0% de UMIDADE							
% contaminante	St UDT - Tradicional	St UDT-CT	ICE - [%]				
0,00	1,2990381	0,7138584	45,0472				
0,50	1,2990381	0,7159093	44,8893				
1,00	1,2990381	0,7174620	44,7697				
1,50	1,2990381	0,7185173	44,6885				
2,00	1,2990381	0,7191372	44,6408				
2,50	1,2990381	0,7193430	44,6250				
3,00	1,2990381	0,7191397	44,6406				
3,50	1,2990381	0,7185203	44,6883				
4,00	1,2990381	0,7174717	44,7690				
4,50	1,2990381	0,7159728	44,8844				
5,00	1,2990381	0,7139974	45,0365				

Tabela 5.25 – Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 0%.

5% de UMIDADE							
% contaminante	S _t UDT - Tradicional	St UDT-CT	ICE - [%]				
0,00	1,2990381	0,7202035	44,5587				
0,50	1,2990381	0,7213955	44,4669				
1,00	1,2990381	0,7224683	44,3844				
1,50	1,2990381	0,7232950	44,3207				
2,00	1,2990381	0,7238893	44,2750				
2,50	1,2990381	0,7242610	44,2464				
3,00	1,2990381	0,7244144	44,2345				
3,50	1,2990381	0,7243506	44,2395				
4,00	1,2990381	0,7240719	44,2609				
4,50	1,2990381	0,7235626	44,3001				
5,00	1,2990381	0,7228301	44,3565				

Tabela 5.26 – Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 5%.

Tabela 5.27 – Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 10%.

10% de UMIDADE					
% contaminante	St UDT - Tradicional	St UDT-CT	ICE - [%]		
0,00	1,2990381	0,7125905	45,1448		
0,50	1,2990381	0,7135921	45,0677		
1,00	1,2990381	0,7145842	44,9913		
1,50	1,2990381	0,7154458	44,9250		
2,00	1,2990381	0,7161740	44,8689		
2,50	1,2990381	0,7167724	44,8228		
3,00	1,2990381	0,7172434	44,7866		
3,50	1,2990381	0,7175883	44,7600		
4,00	1,2990381	0,7178073	44,7432		
4,50	1,2990381	0,7178998	44,7360		
5,00	1,2990381	0,7178654	44,7387		

15% de UMIDADE					
% contaminante	S _t UDT - Tradicional	St UDT-CT	ICE - [%]		
0,00	1,2990381	0,7064329	45,6188		
0,50	1,2990381	0,7072821	45,5534		
1,00	1,2990381	0,7081575	45,4860		
1,50	1,2990381	0,7089524	45,4248		
2,00	1,2990381	0,7096738	45,3693		
2,50	1,2990381	0,7103055	45,3207		
3,00	1,2990381	0,7108541	45,2784		
3,50	1,2990381	0,7113205	45,2425		
4,00	1,2990381	0,7117050	45,2129		
4,50	1,2990381	0,7120078	45,1896		
5,00	1,2990381	0,7122286	45,1726		

Tabela 5.28 – Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a
concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 15%.

Tabela 5.29 – Cálculo da área dos ecoindicadores e comparação dos resultados variando a concentração de contaminante no solo e umidade fixada em 20%.

20% de UMIDADE					
% contaminante	St UDT - Tradicional	St UDT-CT	ICE - [%]		
0,00	1,2990381	0,7018568	45,9710		
0,50	1,2990381	0,7025892	45,9147		
1,00	1,2990381	0,7033597	45,8553		
1,50	1,2990381	0,7040854	45,7995		
2,00	1,2990381	0,7047544	45,7480		
2,50	1,2990381	0,7053650	45,7010		
3,00	1,2990381	0,7059173	45,6585		
3,50	1,2990381	0,7064118	45,6204		
4,00	1,2990381	0,7068489	45,5867		
4,50	1,2990381	0,7072288	45,5575		
5,00	1,2990381	0,7075513	45,5327		

5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.2.1. Consumo de diesel

O consumo do diesel é bem impactado pela concentração do contaminante e pela umidade, porém para se analisar esses impactos deve se levar em conta o equipamento impactado e a unidade antes e depois da instalação da camisa de troca térmica.

No Forno Rotativo, com o aumento da concentração do contaminante e da umidade no solo, o consumo de diesel aumenta proporcionalmente independente da unidade possuir ou não a camisa de troca térmica, conforme Figuras 5.1 e 5.8.

No Forno de Pós Combustão, a umidade e a concentração de contaminante possuem efeitos contrários, pois enquanto que o aumento da umidade aumenta o consumo de diesel, o aumento da concentração de contaminante o diminui, isso é visualizado nos gráficos das Figuras 5.7 e 5.14 para a UDT – tradicional e a UDT – com Camisa de Troca Térmica.

O aumento da umidade gera um aumento da carga térmica necessária para manter os *setpoints* de operação o que explica seu efeito de aumento no consumo de diesel. Como o contaminante pode ser comparado a um combustível, o aumento da sua concentração gera uma menor necessidade de utilização do diesel uma vez que se supre uma parte da carga térmica para manter os *setpoints* de operação com a própria energia liberada pela combustão do contaminante no FPC. Por isso, o aumento da concentração de contaminante gera uma queda mais acentuada no consumo de diesel no FPC se compararmos com o consumo de diesel no forno rotativo, cujo aumento é mais brando. Isso ocorre, pois, o aumento da concentração de contaminante não implica num aumento de diesel no FPC para a sua sublimação, entretanto, economiza acentuadamente a massa de diesel no FPC para a oxidação completa do contaminante pois essa reação de oxidação libera energia no sistema.

Vale mencionar nesse caso, conforme Equações 4.50 a 4.54, que a energia liberada na queima de 1 kg de diesel é 22,4 vezes maior que a energia liberada na queima de 1 kg de contaminante. Como o grande influenciador do consumo de diesel é o teor de umidade no solo, para casos de baixa umidade, o teor de contaminante passa a ter uma maior influência na carga térmica do sistema se comparado com sua influência nos casos de alta umidade.

Por isso, nota-se ao longo das simulações que para baixos valores de umidade e altos valores de concentração de contaminante na UDT-CT, a massa de diesel no Forno de Pós-Combustão é negativa, conforme Figura 5.14, para concentrações de contaminante acima de 4% e umidade do solo em 0,0%. Essa ocorrência representa que a quantidade de contaminante a ser destruída gera energia suficiente para atingir os *setpoints* de processo sem a necessidade de consumo do diesel. Porém, essa situação na prática não ocorre, já que chegar próximo a essa faixa implica em operar em uma zona de instabilidade do processo, uma vez que não há como realizar os devidos controles de temperatura e pressão que garantem a segurança e eficiência de destruição térmica.

Devido ao exposto acima, existe uma limitação de concentração de contaminante que pode ser tratada nas unidades para esse tipo de contaminação. Essa limitação está exposta na Tabela 3.3, cuja concentração máxima ideal de contaminante é de 0,5% em base seca.

Logo, esses resultados nos levam a conclusão de que podemos utilizar a umidade como ferramenta para controle de processo. Com o aumento da umidade no solo a ser tratado, promove-se um aumento carga térmica necessária para manter os *setpoints* de operação e com isso consegue-se alcançar uma zona de estabilidade de processo para solos com maiores graus de contaminação.

O controle do efeito combinado da concentração de contaminante e da umidade além de permitir uma operação mais estável, acaba definindo o principal equipamento consumidor de diesel da unidade. Quando a carga térmica para dessorção é maior que a carga para garantir os *setpoints* de operação, o principal equipamento consumidor de diesel é o Forno Rotativo, porém quando essa situação se inverter, o principal equipamento consumidor de diesel é o Forno de Pós-Combustão.

Quando se observa os gráficos 5.15 a 5.25, que fazem comparações entre as Unidades com a umidade constante e variando a concentração de contaminante, nota-se que, embora as curvas de consumo de diesel pareçam paralelas, elas não são. A curva da diferença de consumo de diesel à umidade constante e variando a concentração do contaminante entre as unidades não é uma reta e sim uma curva com características exponenciais, o que pode ser observado nos gráficos individuais das curvas de diferença de consumo de diesel para cada valor de umidade ou no gráfico com as umidades plotadas juntas. Essa diferença exponencial, na redução do consumo de combustível, decresce conforme temos o aumento da concentração de contaminante, pois a camisa de troca térmica instalada no forno rotativo tem mais influência na

redução da massa de diesel quando o teor de contaminante é mais baixo, pois conforme o teor de contaminante aumenta e ajuda a suprir a necessidade de queima de diesel.

5.2.2. Quantidade de C₂Cl₆ destruída por 1 kg de diesel:

O aumento da concentração de contaminante aumenta à proporção da massa de C_2Cl_6 destruída por kg, ou seja, quanto maior a concentração do contaminante no solo a ser tratado mais eficiente será o consumo de diesel. Isso ocorre, pois, o contaminante em sua combustão supri uma parte da carga térmica necessária para o tratamento e consequentemente uma menor quantidade de diesel é usada para se alcançar os *setpoints* de operação.

Porém, o aumento da umidade diminui a proporção da massa de C_2Cl_6 destruída por kg de diesel, ou seja, quanto maior a concentração de umidade no solo a ser tratado maior o consumo de diesel. Isso ocorre, pois, o aumento da massa de água no sistema implica no aumento da carga térmica necessária para o tratamento e consequentemente uma maior quantidade de diesel é usada para se alcançar os *setpoints* de operação.

A curva de massa C_2Cl_6 destruída por concentração de contaminante (Figuras 5.4 e 5.11) possui um comportamento exponencial, de forma que com o aumento da umidade gere um aspecto mais linear na curva. A UDT-CT possui um comportamento exponencial mais expressivo e com isso, é necessário, valores de umidades maiores para a curva ter um aspecto linear do que na UDT-convencional.

Quando se observam os gráficos comparativos entre as unidades com a umidade constante e variando a concentração de contaminante (Figuras 5.15 a 5.25), nota-se que a curva da diferença de consumo de diesel à umidade constante e variando a concentração do contaminante entre as unidades também tem um comportamento exponencial, porém pouco expressivo se comparado as unidades antes e depois da melhoria de processos. Isso acontece, pois, o percentual de redução no consumo de diesel, apesar de existir, não é tão alto, chegando no máximo a 26,68%. Logo, a diferença entre as curvas não é tão notória o que faz ela ter esse comportamento.

5.2.3. Emissão de CO₂

Conforme Figuras 5.2 e 5.9, a emissão de CO_2 possui um comportamento padrão, aumenta com o aumento da umidade e da concentração do contaminante. Esse comportamento ocorre devido a maior carga térmica com o aumento da massa de água do sistema e como um dos produtos finais da combustão do contaminante é o próprio CO_2 , com o aumento de massa do contaminante aumenta-se a produção de CO_2 . Além disso, mesmo sabendo que o aumento do teor de contaminante reduz o consumo de diesel em ambas as Unidades, era de se imaginar que a emissão de CO_2 poderia cair pela menor queima de diesel. Entretanto, a quantidade de CO_2 gerada na oxidação do contaminante é maior que a redução de emissão de CO_2 proporcionada pela menor queima de diesel, conforme aumentamos o teor de contaminante no solo. Ou seja, avaliando-se a estequiometria das reações (Equações 4.52 e 4.48), nota-se que a massa de CO_2 gerado na combustão do contaminante é 55,7% maior que a massa de CO_2 gerada na combustão do diesel. Por isso temos o aumento global da emissão de CO_2 , com aumento do teor de contaminante a umidade constante.

Quando se observa os gráficos comparativos entre as Unidades com a umidade constante e variando a concentração de contaminante (Figuras 5.32, 5.34, 5.36, 5.38 e 5.40) nota-se que, embora as curvas de emissão de CO_2 pareçam paralelas, elas não são. A curva da diferença de emissão de CO_2 à umidade constante e variando a concentração do contaminante entre as unidades não é uma reta e sim uma curva com características exponenciais, o que pode ser observado nos gráficos individuais das curvas de diferença de emissão de CO_2 para cada valor de umidade (Figuras 5.33, 5.35, 5.37, 5.39 e 5.41) ou no gráfico com as umidades plotadas juntas (Figura 5.42).

5.2.4. CO2 emitido por 1 kg de contaminante tratado

Conforme gráficos das Figuras 5.5 e 5.12, o aumento da concentração de contaminante reduz à proporção da massa de CO₂ emitida pela massa de contaminante tratado, ou seja, quanto maior a concentração do contaminante no solo a ser tratado menor será o impacto ambiental causado pela emissão de CO₂, proporcionalmente. Isso ocorre, pois mesmo que a emissão de CO₂ aumente em termos absolutos com o aumento da concentração de contaminante, a

proporção de aumento da emissão não é maior que a proporção de aumento de contaminante a ser tratado. O aumento de CO_2 não ocorre proporcionalmente ao aumento de concentração de contaminante pois o contaminante em sua combustão supri uma parte da carga térmica necessária para o tratamento diminuindo assim o consumo de diesel no FPC.

Porém, o aumento da umidade aumenta a proporção da massa de CO_2 emitida pela massa de contaminante tratado, ou seja, quanto maior a concentração de umidade no solo a ser tratado maior será o impacto ambiental causado pela emissão CO_2 . Isso ocorre, pois, o aumento da massa de água no sistema implica em uma carga térmica adicional que não tem relação com a destruição do contaminante e sim ao aquecimento da massa de água adicional e consequentemente há um maior consumo de diesel e produção de CO_2 .

A umidade em si exerce uma influência de modo que a partir de um determinado valor de umidade, a carga térmica no sistema é tão grande que o aumento da concentração de contaminante não influencia significativamente na proporção da quantidade de diesel por massa de C_2Cl_6 a ser tratada, conforme Figuras 5.5 e 5.12.

Quando se observam os gráficos comparativos entre as unidades com a umidade constante e variando a concentração de contaminante, (Figuras 5.32 a 5.42), nota-se que a curva da diferença de emissão de CO_2 à umidade constante e variando a concentração do contaminante entre as unidades também tem um comportamento exponencial, porém pouco expressivo quando comparamos as Unidades antes e depois da instalação da camisa de troca térmica.

5.2.5. Consumo de água

A água nas Unidades é utilizada com o princípio de resfriamento abrupto dos gases de saída do FPC para evitar a faixa de temperatura de formação de dioxinas e furanos. Como ela tem apenas esse princípio, o que influencia o seu consumo é a massa de gases total na saída desse equipamento e a diferença de temperatura a ser reduzida.

A massa de total de saída dos gases é praticamente constante, variando em menos de 1% conforme aumentamos o teor de contaminante, por isso os gráficos de consumo de água (Figuras 5.3 e 5.10) aparentam esse comportamento de constante. Isso faz com que os gráficos de comparação da redução do consumo de água entre as Unidades variando a concentração de contaminante e mantendo a umidade constante (Figuras 5.49, 5.51, 5.53, 5.55 e 5.57), apresentem um comportamento praticamente linear

A instalação do equipamento de troca térmica, poupa em 200°C a energia necessária para abatimento dos gases, que antes precisavam ser resfriados de 750°C para 70°C e agora são resfriados de 550°C para 70°C. Isso representa uma economia no consumo de água que varia de 28,59% a 40,68%, para casos de 20% de umidade com 5% de contaminante no solo e 0% de umidade com 0% de contaminante no solo, conforme Tabelas 5.11 a 5.15 e gráficos das Figuras (5.50, 5.52, 5.54, 5.56 e 5.58).

Ou seja, a instalação do equipamento de troca térmica, apresenta no consumo de água a maior economia se comparado as emissões de CO₂ e consumo de combustível.

5.2.6. Comportamento das reduções % de emissão de CO₂ e do consumo de diesel:

Quando se avaliam os dados em sua forma percentual tem-se a vantagem de poder comparar grandezas distintas, como a diferença entre o consumo de diesel e a diferença de emissão de CO_2 e a diferença entre o consumo de água na Unidade antes e depois da instalação da camisa de troca térmica.

Neste caso podemos observar um comportamento inverso entre o consumo de diesel comparando-o com a emissão de CO₂ e consumo de água, quando aumentamos a concentração de contaminante para umidade constante, conforme gráfico da Figura 5.60.

Enquanto o consumo de diesel é cada vez mais eficiente na unidade com a camisa térmica, a emissão de CO_2 possui comportamento contrário, diminuindo a eficiência no processo de redução da emissão de CO_2 , conforme aumentamos o teor de contaminante no solo. O consumo de água, apesar de também apresentar uma diminuição na eficiência como no caso da emissão de CO_2 , tem um decréscimo suave, com uma tendência mais constante.

Em relação à umidade, a influência é a mesma para o consumo de diesel e emissão de CO₂, aumentando a sua eficiência, porém é diferente da influência no consumo de água, pois quanto maior o teor de umidade no solo, menor é a eficiência da redução de consumo de água na comparação das unidades antes e depois da instalação da camisa de troca térmica.

Esse comportamento nos três casos acontece de forma decrescente, ou seja, a diferença entre o valor máximo e mínimo nas análises a umidade constante, para cada grandeza reduz com o aumento da concentração da umidade pois, a carga térmica na unidade começa a ser basicamente oriunda do aquecimento da água e não da destruição do contaminante. Logo, avaliamos que a umidade provoca uma estabilidade no processo caso haja perturbações devido a concentrações de contaminante heterogêneas no solo a ser tratado.

Uma outra forma de avaliar a melhoria de processo apresentada foi através do cálculo de eficiência energética com dados apresentados na Tabela 5.16. Como ela é função da redução de consumo de diesel, e sabendo que a redução do consumo de diesel, com a instalação da camisa de troca térmica, cresce com o aumento da umidade e diminuição da concentração de contaminante, analisamos nessa Tabela que os maiores índices de eficiência energética ocorrem para elevados valores de umidade e baixos valores de contaminante no solo. No caso estudado, o maior índice de eficiência energética é de: 1.381,30 kW, ou seja, 0% de contaminante e 20% de umidade.

5.2.7. Redução do custo com diesel

Por ser uma grandeza proveniente de uma multiplicação do valor do diesel pela diferença do consumo de diesel entre as unidades com e sem reaproveitamento energético o comportamento deste indicador é análogo ao do consumo de diesel já discutido anteriormente.

Porém, para estudarmos o investimento no equipamento de troca térmica e verificar a possibilidade de montagem industrial dessa planta para tratamento de solo, deve-se avaliar que em qualquer tratamento térmico, o principal custo operacional é o proveniente do consumo de diesel e por isso uma análise da economia gerada pela instalação do equipamento e melhoria do processo, se faz necessário. Fica evidente ao observar que uma unidade que opera 24h por dia sem interrupções, a economia gerada pela redução do consumo de diesel, em nosso caso variando de aproximadamente 0,85 a 3,46 milhões de reais anuais, é significativa, conforme Figura 5.66.

Essa análise de custos é importante para avaliar a decisão de instalação do equipamento de troca térmica, pois esse custo pode ser decisivo na hora de se escolher a melhor tecnologia de tratamento de solos.

5.2.8. Análise de Ecoindicadores

A partir dos dados de consumo total de diesel, emissão de CO_2 e consumo de água na UDT antes da melhoria de processo (UDT – Tradicional) – Tabelas 5.1 a 5.5 e UDT com a camisa de troca térmica (UDT-CT) – Tabelas 5.6 a 5.10, obteve-se os dados normalizados para cada um dos ecoindicadores. Esses resultados foram apresentados nas Tabelas 5.20 a 5.24.

A metodologia de adimensionamento dos ecoindicadores foi exposta no Capítulo 4, apresentando o porquê dos resultados se apresentarem no intervalo de 0 a 1, para todas as Unidades.

As Figuras 5.76, 5.77 e 5.78 apresentam os ecoindicadores normalizados do consumo de diesel, emissão de CO₂ e consumo de água variando a concentração de contaminante e o percentual de umidade.



Figura 5.76 – Ecoindicadores do consumo de diesel normalizado da UDT-CT.



Figura 5.77 – Ecoindicadores da emissão de CO₂ normalizado da UDT-CT.



Figura 5.78 – Ecoindicadores do consumo de água normalizado da UDT-CT.
O gráfico da Figura 5.76 mostra uma tendência diferente do ecoindicador de consumo de diesel, quando comparado com os ecoindicadores de emissão de CO_2 e consumo de água a umidade constante. Nele, quando a umidade é constante, o sistema tende a ser mais ecoeficiente no consumo de combustível, conforme aumenta-se a concentração de contaminante, pois o valor dos ecoindicadores decrescem. Isso foi observado na discussão dos resultados no item 5.2.1, pois o C_2Cl_6 supre parte da demanda térmica do processo, diminuindo o consumo de combustível quando aumentamos o teor de contaminante.

Entretanto, os ecoindicadores de consumo de diesel na UDT-CT possuem um comportamento similar aos ecoindicadores da emissão de CO_2 quando variamos a umidade e fixamos o valor da concentração de contaminante, conforme gráficos das Figuras 5.76 e 5.77. Ou seja, para uma mesma concentração de contaminante, a UDT-CT torna-se mais ecoeficiente conforme aumentamos o teor de umidade no solo, quando analisamos apenas os ecoindicadores emissão de CO_2 e consumo de diesel, pois os valores deles decrescem. Esse decréscimo é bem suave, sendo no máximo de 8,36% para o ecoindicador de consumo de diesel, comparando o percentual de contaminante em 0% para a umidades em 0% e 20%, e no máximo de 10,18% para o ecoindicador de emissão de CO_2 , comparando o percentual de contaminante em 5% para a umidades em 0% e 20%.

As Tabelas 5.20 a 5.24 e o gráfico da Figura 5.78 mostram que o ecoindicador de consumo de água é notavelmente o que apresenta melhor ecoeficiência proporcionada pela instalação da camisa de troca térmica no forno rotativo, pois ele apresenta os menores valores se comparados com os ecoindicadores consumo de diesel e emissão de CO₂, em todos os percentuais de umidade e de concentração de contaminante. Isso é explicado pelo fato de que a camisa de troca térmica economiza a energia necessária para o resfriamento abrupto em 200°C, o que é bem significativo na redução da temperatura dos gases de saída do trocador de calor – corrente quente.

Entretanto, esse ecoindicador é o que possui maior variação quando aumentamos o teor de umidade e concentração de contaminante chegando a 20,39%, comparando o percentual de contaminante em 0% e 5% para a umidades em 0% e 20%, respectivamente. Ou seja, quanto maior a massa e água no sistema e de contaminante, mais gases são gerados para o resfriamento abrupto dos gases, o que aumenta o consumo de água.

Outro ponto importante de análise são os gráficos do tipo "radar" apresentados nas Figuras 5.67 a 5.75. Como a variação da ecoeficiência é pequena, em termos relativos, fica difícil analisar visualmente qual configuração apresentou melhor ecoeficiência após a instalação da camisa de troca térmica no forno rotativo. Por isso, optou-se por analisar essa configuração através das Tabelas 5.25 a 5.29, que apresentam os dados do cálculo da área dos gráficos "radar" e o Índice de Comparação de Ecoeficiência – ICE.

Essas Tabelas mostram que o ganho médio de sustentabilidade com a instalação da camisa de troca térmica na Unidade de Dessorção Térmica estudada é de aproximadamente 45,0131%. Além disso, a configuração que apresenta a melhor ecoeficiência quando há contaminação no solo é de 0,5% de contaminante e 20% de umidade, ou seja, exatamente o que diz o dossiê técnico do equipamento nos parâmetros de processo para tratamento, conforme Tabela 3.3. (ECOTECHNIEK BODEM BV, 1998). Isso corrobora a explicação apresentada na análise gráfica dos itens 5.2.1 a 5.2.7, de que a umidade provoca uma estabilidade no processo caso haja perturbações devido a concentrações de contaminante heterogêneas no solo a ser tratado.

Os resultados apresentados aqui mostram que a instalação da camisa de troca térmica é necessária pois além de melhorar os ecoindicadores do processo, geram uma economia financeira nos custos de tratamento, por causa da redução do consumo de diesel.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões referentes aos dados obtidos da simulação por balanços de massa e energia no *Maple*, para o consumo de combustível, emissão de CO₂ e consumo de água para a Unidade de Dessorção Térmica antes e depois da instalação da camisa de troca térmica. São também apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Este trabalhou apresentou problemas de contaminação de solo no Brasil por contaminantes orgânicos e inorgânicos, mostrando que muitos casos graves se encontram em condições de descaso e sem alternativa de tratamento. A partir disso, apresentou-se técnicas existentes de remediação de solo com foco no tratamento térmico por dessorção, pois este era um tema de estudo pouco difundido no Brasil, mas com *cases* de sucesso no mundo. A intenção foi de apresentar a viabilidade técnica desse tipo de solução e mostrando as etapas mais importantes a serem seguidas para o licenciamento e instalação desse tipo de planta no Brasil.

Para a viabilidade técnica, estudou-se uma Unidade de Dessorção Térmica específica e se realizou uma simulação por balanços de massa e energia variando dois parâmetros de extrema relevância para o tratamento: o teor de contaminante no solo e o teor de umidade no solo. Isso possibilitou a geração de dados de performance ambiental da planta e a partir deles, sugeriu-se uma melhoria no processo de tratamento, com a instalação de um equipamento de processos, que permitiria a planta ser mais ecoeficiente e reduziria os gastos com combustíveis, sendo estes fatos relevantes que podem definir a decisão de instalação do equipamento de melhoria do processo.

Com as premissas acima de dados de ecoindicadores gerados e o modelo de simulação apresentado foram gerados dois tipos de análises para o processo antes e depois da melhoria: um por análise de gráficos de performance e outra através da metodologia de ICE – Índice de Comparação de Ecoeficiência. Com isso, concluímos algumas relações entre as variáveis de entrada do solo e os ecoindicadores de processo:

- O aumento da umidade causa aumento no consumo de diesel e da emissão de CO₂ independente do equipamento analisado (forno rotativo e forno de pós combustão) antes e depois da instalação da camisa de troca térmica;
- O aumento da concentração do contaminante influencia diferentes comportamentos nos equipamentos analisados, aumento de consumo de diesel no Forno Rotativo e redução do consumo de diesel no Forno de Pós Combustão, porém, de forma geral, reduz o consumo de diesel na unidade, pelo fato de o contaminante, em sua oxidação, fornecer energia térmica para o sistema, economizando o consumo de diesel;
- A concentração do contaminante limita a operação das unidades, uma vez que o contaminante se comporta como um combustível no Forno de Pós Combustão e com isso é necessário regular a quantidade de contaminante a ser tratado com a carga térmica adequada que garanta um processo estável e controlável.
- A umidade pode ser utilizada como ferramenta para se alcançar uma condição de processo estável, uma vez que, por possui alta capacidade calorífera. Sendo assim, evita aumentos bruscos de temperatura devido a uma possível heterogeneidade de concentração de contaminantes.

Outro ponto observado concluído é o de que as influências inversas da umidade e da concentração de contaminante garantem ao processo de tratamento uma flexibilidade quanto ao foco da operação. Essa flexibilidade é essencial quando no caso de tratamento de resíduos desconhecidos ou não bem definidos pela investigação ambiental da contaminação do solo a ser tratado. Em uma etapa inicial da operação, pode se operar com segurança e com um custo operacional maior aumentando a umidade do solo para conhecer as particularidades do solo a ser tratado. Em uma etapa mais madura da operação onde já se conhece o comportamento do solo nas unidades consegue-se operar com segurança e com um custo operacional menor reduzindo a umidade do solo a ser tratado. Essa possibilidade inicial reduz o risco de um acidente na planta.

A geração dos dados de ecoindicadores normalizados permitiu concluir que a instalação da camisa de troca térmica no forno rotativo gera influência mais positiva no ecoindicador de consumo de água, pois foi o que apresentou os valores mais próximos a zero.

O ganho médio de sustentabilidade com a instalação da camisa de troca térmica na Unidade de Dessorção Térmica estudada é de aproximadamente 45,0131%, o que se entende como positivo a decisão de instalação de tal equipamento. Isso fica ainda mais evidente economicamente quando mostramos que a redução de custos que esse equipamento pode proporcionar pode variar de 0,85 a 3,46 milhões de reais anuais, dependendo da concentração de contaminante e de umidade no solo.

Além disso, a análise através de ecoindicadores e determinação da área dos gráficos do tipo "radar" gerados, possibilitou identificarmos o ponto ótimo da relação de teor de contaminante e teor de umidade no solo a ser tratado, que foi o cruzamento que apresentou o melhor índice de ICE após a instalação da camisa de troca térmica no forno rotativo, ou seja, identificamos o percentual de contaminante em 0,5% e o teor de umidade em 20% com ICE igual a 45,9147%, exatamente como sugere o dossiê técnico do equipamento. Para essa mesma combinação, a eficiência energética foi de 1.374,98 kW.

Como sugestões para trabalhos futuros recomendam-se:

- Validação dos dados obtidos com a simulação no Maple em um software de simulação de processos;
- Simulação da Unidade realizando a troca da matriz energética de diesel para gás natural ou combustíveis de resíduos, por exemplo, comparando os resultados através da metodologia de ICE apresentada;
- Pesquisas bibliográficas para obtenção de dados de ecoindicadores ambientais de outras tecnologias de tratamento de solo (biorremediação, fitorremediação, etc.) para comparar a ecoeficiência com o tratamento térmico por dessorção;
- Utilizar a métrica definida na metodologia de ICE para comparar os ecoindicadores ambientais em etapas anteriores ao tratamento térmico, como na montagem e instalação da planta, avaliando-se a geração de resíduos na obra por hora, consumo de água, etc. pois encontra-se muitos estudos de métricas para análise de indicadores de construção e montagem, mas dificilmente avaliamos eles no caráter ambiental;

Finalmente, acredita-se que esta dissertação venha a contribuir e agregar valor ao tema de instalação e tratamento de solos contaminados por dessorção térmica e de ecoindicadores desse tipo de processo industrial. Essa simulação pode servir como um acervo técnico podendo ser utilizada para outros tipos de contaminantes de solo

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11175: Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho. Rio de Janeiro, 1990.
- ALBUQUERQUE, Letícia. *Poluentes orgânicos persistentes Uma análise da Convenção de Estocolmo*. Juruá Editora, Curitiba, 2006.
- ANDERSON, W. C. Innovative Site Remediation Technology: Thermal Desorption. v. 6, p. 16-26, 1993.
- ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F., Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclética química*, v. 35, p. 17–43, 2010.
- ACPO Associação de Combate aos Poluentes Orgânicos Persistentes. *Caso Rhodia*.
 Disponível em: http://www.acpo.org.br/caso_rhodia.htm.> Acesso em: 23/03/2016.
- ACPO Associação de Combate aos Poluentes Orgânicos Persistentes. *Relatório de Avaliação de Risco à Saúde por Exposição a Resíduos Perigosos em áreas de Itanhaém e São Vicente/SP*. Disponível em: http://www.acpo.org.br/saudeambiental/CGVAM/02_Avaliacao_de_Risco/01_baixada_santista_sp/02_introducao.pdf. Acesso em: 23/03/2016.
- ATKINS, P. Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- BAIRD, C. Química Ambiental. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

- BARBOSA, V. 4 casos trágicos de contaminação de solo. *Portal Exame*. Disponível em: http://exame.abril.com.br/mundo/noticias/4-casos-chocantes-de-contaminacao-de-solo-no-pais. Acesso em: 22/03/2016.
- BENTO, F. M., Bioremediation of soil contaminated by diesel oil. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 34, p. 65-68, 2003.
- BRAGA, S. L. Redução das Emissões em Motores Diesel-gás. Tese de Doutorado. Puntífice Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ). Rio de Janeiro, 2006.
- BRAGATO, M. Tratamento 'in-situ' de solo contaminado por derivado de petróleo e metais. 194 f. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006.
- BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, p. 292, 1988.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002. – In: Resoluções, 2002. Disponível em: http://www.mma.gov.br> Acesso em: 20/05/2016.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 420, de 29 de dezembro de 2009. – In: Resoluções, 2009. Disponível em: http://www.mma.gov.br> Acesso em: 23/05/2016.
- CARVALHO, D. F. P. Estudo Epidemiológico na População Residente na Baixada Santista –
 Estuário de Santos: Avaliação e Indicadores de Efeito e de Exposição a Contaminantes
 Ambientais com enfoque em doenças hepáticas. Tese de Doutorado. Faculdade de
 Medicina. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2011.
- CECA Comissão Estadual de Controle Ambiental. Secretaria de Estado do Ambiente, Diretriz, DZ. DZ-1314.R-0, de 14 de setembro de 1993, 1993. Disponível em: http://www.inea.rj.gov.br> Acesso em: 23/05/2016.
- CETESB COMPANHIA, DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo, 2010.

- COELHO, M. R.; FIDALGO, E.; DOS SANTOS, H. G.; BREFIN, M., & PEREZ, D. Solos: tipos, suas funções no ambiente, como se formam e sua relação com o crescimento das plantas. Embrapa. Solos-Artigo em anais de congresso. UFLA, 2013.
- CUDAHY, J. J.; TROXLER, W. J. 1991 Thermal Treatment Remediation Industry Contractor Survey. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 42, p. 844-849, 1992.
- DA SILVA, E. C. F.; ROHLFS, D. B. Eficácia dos Instrumentos Jurídicos em Áreas Contaminadas: Cidade dos Meninos – Rio de Janeiro, Um Estudo de Caso. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biociências Forenses. Puntífice Universidade Católica de Goiás (PUC – GO). Goiás, 2010.
- DE LUCENA TAVARES, S. R.; DE OLIVEIRA, S. A.; SALGADO, C. M. Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. *HOLOS*, v. 5, p. 80-97, 2013.
- DE SOUZA, J. A. P. O Gerenciamento de Riscos na Cidade dos Meninos–Um Sítio Contaminado por Pesticidas Organoclorados, no Estado do Rio de Janeiro. Tese de Mestrado em Ciências na área de Saúde Pública. Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ). Rio de Janeiro. 2003.
- DIAS, C. L. Estabelecimento de Valores de Alerta e Limites Máximos no Lodo de Esgoto. Relatório técnico interno – CETESB. 2004.
- DYMINSKI, A. S. Contaminação de solos e águas subterrâneas. v. 19, Curitiba. 2008.

ECOTECHNIEK BODEM BV. Technical Dossier METTS. 1998.

- EPA Environmental Protection Agency. A citizen's guide to thermal desorption. Office of Solid Waste and Emergency Response. 2012.
- EPA Environmental Protection Agency. Air emissions from the treatment of soils contaminated with petroleum fuels and other substances. Control Technology Center. 1997.
- EPA Environment Protection Agency. *The inventory of sources of dioxin in the United States* (*External Review Draft*), 1998.
- FERREIRA, A. C.; LOPES, A.; DOURADO, B.; PEREIRA, D. R.; COSTA, M.; TOLEDO, N. A. O Caso Rhodia: Como a falta do entendimento das Leis Ambientais Brasileiras e

dos Conceitos de Desenvolvimento Sustentável podem gerar Casos de Contaminação de Recursos Naturais e da Sociedade. 3º CONTEXMOD. v. 1, 2015.

- FIEMG Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. Gerenciamento de Áreas Contaminadas: Conceitos e Informações. Minas Gerais. 2011.
- GRACIANO, V. A., DE SOUZA PIRES, C., TEIXEIRA, S. C. G., ZIOLLI, R. L., Pérez, D. V.; Remediação de um solo contaminado com petróleo por oxidação química. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(5), 1656-1660, 2012.
- GREEN, D. W.; PERRY, R. H. Perry's Chemical Engineers' Handbook Seventh Edition. New York: McGraw-Hill, 2007.
- HERCULANO, S. Exposição a riscos químicos e desigualdade social: o caso do HCH (hexaclorociclohexano) na Cidade dos Meninos, RJ. *Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente: riscos coletivos - ambiente e saúde*, p. 61 – 71. 2002.
- INEA Instituto Estadual do Ambiente. *Avaliação de áreas contaminadas*. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Licenciamento/GestaodeRiscoAm bientalTec/AvaliacaodeAreasContaminadas/index.htm&lang=PT-BR.> Acesso em: 26/04/2016.
- KASTANEK, F.; KASTANEK, P. Combined decontamination processes for wastes containing PCBs. *Journal of Hazardous Materials*, v. 117, p. 185–205, Jan. 2005.
- KASTANEK, F.; KASTANEK, P.; HAJEK, M. Microwave–enhanced thermal desorption of polyhalogenated biphenyls from contaminated soil. *Journal of Environmental Engineering*, v. 126, p. 295–300, mar. 2010.
- KENNA, B. T.; CONBOY, D.; LEITHNER, J.; AVERETT, D. E.; YAKSICH, S. Pilot-scale demonstrations of thermal desorption for the treatment of contaminated river sediment. *Water Quality* '94. American Society of Civil Engineers, p. 474 – 483. 1996.
- LEMMING, G.; NIELSEN, S. G.; WEBER, K.; HERON G.; BAKER, R. S.; FALKENBERG, J. A.; BJERG, P. L. Optimizing the Environmental Performance of In Situ Thermal Remediation Technologies Using Life Cycle Assessment. *Ground Water Monitoring & Remediation*, v. 33, p. 38–51, 2013.

- MMA Ministério do Meio Ambiente. Áreas contaminadas. Brasília. Disponível em: http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas. Acesso em: 19/03/2016.
- MMA Ministério do Meio Ambiente. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília. Disponível em: http://www.mma.gov.br/política-de-resíduos-sólidos. Acesso em: 26/04/2016.
- MPRJ Ministério Público do Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.mprj.mp.br/areas-de-atuacao/meio-ambiente/orgaos-ambientais. Acesso em: 26/04/2016.
- OLIVEIRA, R. M. Cidade dos Meninos, Duque de Caxias, RJ, linha do tempo sobre a contaminação ambiental e humana. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública. Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ). Rio de Janeiro. 2008
- OLIVEIRA, R. M.; BASTOS, L. H. P.; DIAS, A. E. X. O.; SILVA, S. A.; MOREIRA, J. C. Concentração residual de hexaclorociclohexano em área contaminada na Cidade dos Meninos, Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil, após tratamento com óxido de cálcio. *Cad Saúde Pública*, v. 19, p. 447-453, 2003.
- OPPELT, E. T. Incineration of hazardous waste. JAPCA, v. 37, 1987.
- PAL, D.; FANN, S.; WIGHT, S. *Application Guide for Thermal Desorption Systems*. Naval Facilities Engineering Service Center Port Hueneme CA, 1998.
- PEREIRA, C. P., Desenvolvimento e Avaliação de Índice de Comparação de Ecoindicadores em uma Unidade Industrial. 213 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.
- PIRES, P. J. M. Desenvolvimento de um Sistema de Dessorção Térmica In Situ para Remediação de Materiais Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC – Rio). Rio de Janeiro, 2004.
- POHANISH, R. P. *HazMat Data*: For First Response, Transportation, Storage, and Securit. 2^a.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

- RIFKIN, J. A Terceira Revolução Industrial: Como o poder latera está transformando a energia, a economia e o mundo. V.l., M Books, 2012.
- RUIZ, M. S.; OIH YU, A. S.; MARTINS, F. E.; GONÇALVES, L. R. Tecnologias de remediação de áreas contaminadas com organoclorados: Uma avaliação preliminar visando possíveis aplicações no sítio da rua Cápua, Santo André – SP. *Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS*, v.1, p. 102–123, 2012.
- RUSSEL, J. B. Química Geral. 2ª. ed. São Paulo: Pearson Makron Boos, v. I, 1994.
- SIITONEN, S.; TUOMAALA, M.; AHTILA, P., "Variables affecting energy efficiency and CO₂ emissions in the steel industry". *Energy Policy*, v. 38, p.2477–2485, 2010.
- STUBBS, David L.; EMES, P. Derek. Modularization: Prefabricating a Process Plant. *Mechanical Engineering*, v. 112, p. 63, 1990.
- SULLIVAN, T. P. *Thermal desorption: a technology review*. San Antonio Air Logistics Center Kelly AFB TX, 1997.
- TROXLER, W. L.; CUDAHY, J. J.; ZINK, R. P.; YEZZI JR, J. J., ROSENTHAL, S. I. Treatment of Nonhazardous Petroleum–Contaminated Soils by Thermal Desorption Technologies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 43, p. 1512– 1525, 1993.
- TROXLER, W. L.; GOH, S. K.; Treatment of Pesticide–Contaminated Soils with Thermal Desorption Technologies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 43, p. 1610–1617, 1993.
- UNCTAD United Nations Conference on Trade and Development. A Manual for the Preparers and Users of Eco-efficiency Indicators, 2004.
- U.S. DEPARTMENT OF LABOR. Remediation Technology Health and Safety Hazards: Thermal Desorption. 2003.
- WATTS, R. J. Treatment of contaminated soils and groundwater using ISCO. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, v.10, p. 2–9, 2006.

WEITZMAN, L.; JEFCOAT, I. A.; KIM, B. R. Innovative Site Remediation Technology: Thermal desorption. *American Academy of Environmental Engineers*, 1997.

ZODROW, J. J.; Recent applications of phytoremediation technologies. *Remediation*. 1999.

APÊNDICE A

Códigos da simulação no Maplesoft antes e depois da melhoria de processo

A.1. Código da simulação na UDT - Tradicional

Dados de Entrada:

$$\begin{split} mSoloContaminado &:= 10000 : \\ \% Umidade &:= \frac{20.0}{100} : \\ \% C2Cl6 &:= \frac{1.0}{100} : \end{split}$$

% dos Elementos em uma Molécula:

$$\label{eq:heads} \begin{split} & \% HH2O \coloneqq 0.111904: \\ & \% HDiesel \coloneqq 0.153097: \\ & \% HHCl \coloneqq 0.027646: \\ & \% OH2O \coloneqq 0.888096: \\ & \% OCO2 \coloneqq 0.727101: \\ & \% CCO2 \coloneqq 0.272899: \\ & \% CC2Cl6 \coloneqq 0.101464: \\ & \% CDiesel \coloneqq 0.846903: \\ & \% Cl2Cl6 \coloneqq 0.898536: \\ & \% ClHCl \coloneqq 0.972354: \\ \end{split}$$

% dos Oxigênio e Nitrogênio no Ar:

%OAr := 0.232915: %NAr := 1 - %OAr:

Pesos Moleculares:

 $\begin{array}{l} PMH2O := 18.0155:\\ PMO2 := 31.999:\\ PMCO2 := 44.009:\\ PMC2Cl6 := 236.735:\\ PMN2 := 28.014:\\ PMDiesel := 184.354:\\ PMHCl := 36.4605:\\ PMAr := 28.85085: \end{array}$

Equações Complementares:

 $\begin{array}{l} mH2OSoloContaminado := \%Umidade \cdot mSoloContaminado :\\ mC2Cl6 := \%C2Cl6 \cdot mSoloContaminado :\\ mSoloArgiloso := mSoloContaminado - mH2OSoloContaminado - mC2Cl6 :\\ mN2EntradadoPC := mN2SaídadoFR :\\ mH2OEntradadoPC := mH2OSaídadoFR :\\ mO2EntradadoPC := mC2Cl6:\\ mCO2EntradadoPC := mC2Cl6:\\ mHClSaídadoPC := mHClCombdoCont :\\ \end{array}$

Entalpia Padrão de Reação:[J/Kg]

 $\Delta H0CombDiesel := -44.073560 \cdot 10^{6}$: $\Delta H0CombContaminante := -1.975352 \cdot 10^{6}$:

Calor Específico, Latente e Sublimação dos Compostos: CpSoloArgiloso := 938.56448 : [J/kgK]CpContaminante.s := 729.063478 : [J/kgK] *CLsublimação* ≔ 248780.3848 : [J/Kg] $\left(130.4086 + 119.9611 \cdot \mathrm{T} - 100.8403 \cdot T^{2} + 30.14271 \cdot T^{3} - \frac{-1.698060}{T^{2}}\right)$ CpContaminante.g := -PMC2Cl6.1000 [J/kg.K] $CpAgual := \frac{(2.7637 \cdot 10^5 - 2.0901 \cdot 10^3 \cdot T + 8.125 \cdot 10^0 \cdot T^2 - 1.4116 \cdot 10^{-2} \cdot T^3 + 9.3701 \cdot 10^{-6} \cdot T^4)}{PMH2O} :$ CLÁgua := 2258840 : [J/kg] CpAguag $:= \frac{1}{PMH2O} \left[0.3336 \cdot 10^5 + 0.2679 \cdot 10^5 \left(\frac{\frac{2.6105 \cdot 10^5}{T}}{\sinh\left(\frac{2.6105 \cdot 10^3}{T}\right)} \right] + 0.089 \cdot 10^5 \right]$ $\cdot \left(\frac{\frac{1169}{T}}{\cosh\left(\frac{1169}{T}\right)} \right)^2 :$ $CpG\acute{asOxigênio} := \frac{1}{PMO2} \left| 0.291 \cdot 10^5 + 0.1004 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\frac{2.5265 \cdot 10^3}{T}}{\sinh\left(\frac{2.5265 \cdot 10^3}{T}\right)} \right)^2 + 0.0936 \cdot 10^5 \right|^2$ $\cdot \left(\frac{\frac{1153.88}{T}}{\cosh\left(\frac{1153.88}{T}\right)} \right)^2 \right]:$ CpGásNitrogênio $:= \frac{1}{PMN2} \left| 0.2911 \cdot 10^5 + 0.0861 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\frac{1.7016 \cdot 10^3}{T}}{\sinh\left(\frac{1.7016 \cdot 10^3}{T}\right)} \right)^2 + 0.001 \cdot 10^5 \right|^2$ $\left. \left(\frac{\frac{909.79}{T}}{\cosh\left(\frac{909.79}{T}\right)} \right| :$ CpDióxidodeCarbond $:= \frac{1}{PMCO2} \left[0.2937 \cdot 10^5 + 0.3454 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\frac{1.428 \cdot 10^3}{T}}{\sinh\left(\frac{1.428 \cdot 10^3}{T}\right)} \right)^2 + 0.264 \cdot 10^5 \right]$

$$\cdot \left(\frac{\frac{588}{T}}{\cosh\left(\frac{588}{T}\right)}\right)^2 \right):$$

$$CpHCl$$

$$:= \frac{1}{PMHCl} \left(0.2916 \cdot 10^5 + 0.0905 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\frac{2.0938 \cdot 10^3}{T}}{\sinh\left(\frac{2.0938 \cdot 10^3}{T}\right)}\right)^2 - 0.0011 \cdot 10^5$$

$$\cdot \left(\frac{\frac{120}{T}}{\cosh\left(\frac{120}{T}\right)}\right)^2 \right):$$

Temperaturas:

Tambiente := 25 + 273.15:T final dosolo := 400 + 273.15: Tevaporação da água := 100 + 273.15: Tsublimação do contaminante := 185.85 + 273.15: TsaidadoFR := 220 + 273.15: TsaidadoPC := 950 + 273.15: TentradanoTCQ := TsaidadoPC: TsaidanoTCQ := 750 + 273.15: TentradanoTCF := TsaidadoFR: *TentradadoPC* := *TsaidanoTCF assume*(200 < *TsaidanoTCF*) assume(200 < TentradadoPC)

Relações Estequiométricas:

Relações Estequiometricas.
$mO2CombdoCont := \left(\frac{PMO2}{2 \cdot PMC2Cl6}\right) \cdot mC2Cl6:$
$mH2OCombdoCont := \left(\frac{6 \cdot PMH2O}{2 \cdot PMC2Cl6}\right) \cdot mC2Cl6:$
$mCO2CombdoCont := \left(\frac{4 \cdot PMCO2}{2 \cdot PMC2Cl6}\right) \cdot mC2Cl6:$
$mHClCombdoCont := \left(\frac{12 \cdot PMHCl}{2 \cdot PMC2Cl6}\right) \cdot mC2Cl6:$
$mO2CombdoDieselPC := \left(\frac{20 \cdot PMO2}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoPC :$
$mCO2CombdoDieselPC := \left(\frac{13 \cdot PMCO2}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoPC:$
$mH2OCombdoDieselPC := \left(\frac{14 \cdot PMH2O}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoPC:$
$mO2CombdoDieselFR := \left(\frac{20 \cdot PMO2}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoFR$:
$mCO2CombdoDieselFR := \left(\frac{13 \cdot PMCO2}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoFR$:

 $\textit{mH2OCombdoDieselFR} := \left(\frac{14 \cdot \textit{PMH2O}}{\textit{PMDiesel}}\right) \cdot \textit{mDieselnoFR}:$

Balanço de Massa no Forno Rotativo por Elemento Químico:

 $BMfO := \% OH2O \cdot mH2OSoloContaminado + \% OAr \cdot mArFR = \% OH2O \cdot mH2OSaidadoFR + mO2SaidadoFR + \% OCO2 \cdot mCO2SaidadoFR :$

 $BMfC := \%CC2Cl6 \cdot mC2Cl6 + \%CDiesel \cdot mDieselnoFR = \%CCO2 \cdot mCO2SaidadoFR + \%CC2Cl6 \cdot mC2Cl6SaidadoFR :$

 $BMfH := \%HH2O \cdot mH2OSoloContaminado + \%HDiesel \cdot mDieselnoFR = \%HH2O \cdot mH2OSaídadoFR : BMfN := \%NAr \cdot mArFR = mN2SaídadoFR :$

 $BMfCl := \%ClC2Cl6 \cdot mC2Cl6 = \%ClC2Cl6 \cdot mC2Cl6SaidadoFR$:

Caracecterística do Processo:

 $%O2f := mO2SaidadoFR = 0.06 \cdot (mO2SaidadoFR + mN2SaidadoFR + mCO2SaidadoFR + mCO2SaidadoFR)$:

Arf := mArFR = mN2SaidadoFR + mO2SaidadoFR + mO2CombdoDieselFR:

Balanço de Massa no Pós-Combustção por Elemento Químico:

 $BMpO := \%OH2O \cdot mH2OSaidadoFR + mO2SaidadoFR + \%OCO2 \cdot mCO2SaidadoFR + \%OAr \cdot mArPC = \%OH2O \cdot mH2OSaidadoPC + mO2SaidadoPC + \%OCO2 \cdot mCO2SaidadoPC :$

 $BMpC := \%CCO2 \cdot mCO2SaidadoFR + \%CC2Cl6 \cdot mC2Cl6SaidadoFR + \%CDiesel \cdot mDieselnoPC = \%CCO2 \cdot mCO2SaidadoPC :$

$$\begin{split} BMpH &:= \% HH2O \cdot mH2OSaidadoFR + \% HDiesel \cdot mDieselnoPC = \% HH2O \cdot mH2OSaidadoPC \\ &+ \% HHCl \cdot mHClSaidadoPC : \end{split}$$

 $BMpN := mN2SaidadoFR + \%NAr \cdot mArPC = mN2SaidadoPC$:

 $BMpCl := \%ClC2Cl6 \cdot mC2Cl6SaidadoFR = \%ClHCl \cdot mHClSaidadoPC :$

Caracecterística do Processo:

 $%O2p := mO2SaidadoPC = 0.06 \cdot (mO2SaidadoPC + mN2SaidadoPC + mCO2SaidadoPC + mHClSaidadoPC) :$

$$\begin{split} Arp &:= mArPC = (mN2SaidadoPC - mN2SaidadoFR) + ((mO2SaidadoPC - mO2SaidadoFR) \\ &+ mO2CombdoDieselPC + mO2CombdoCont): \end{split}$$

Balanço de Calor no Forno Rotativo por Substâncias:

 $QDieselnoFR := mDieselnoFR \cdot \Delta H0CombDiesel$:





Balanço de Calor no Trocador de Calor por Substâncias:

Corrente Quente:



Corrente Fria

$$\begin{aligned} & QG{a}sOxig{\hat{e}n}ionoTCF := mO2Sa{i}dadoFR \cdot \int_{TentradanoTCF}^{Tsa{i}danoTCF} CpG{a}sOxig{\hat{e}n}io dT : \\ & TentradanoTCF \\ & QG{a}sNitrog{\hat{e}n}ionoTCF := mN2Sa{i}dadoFR \cdot \int_{TentradanoTCF}^{Tsa{i}danoTCF} CpG{a}sNitrog{\hat{e}n}io dT : \\ & Tsa{i}danoTCF \\ & QContaminantenoTCF := mC2Cl6 \cdot \int_{TentradanoTCF}^{Tsa{i}danoTCF} CpContaminante.gdT : \\ & QAguanoTCF := mH2OSa{i}dadoFR \cdot \int_{TentradanoTCF}^{Tsa{i}danoTCF} CpAguag dT : \\ & QDioxidodeCarbononoTCF := mC02Sa{i}dadoFR \cdot \int_{TentradanoTCF}^{Tsa{i}danoTCF} CpDioxidodeCarbono dT : \\ & BTtc := QGasOxig{\hat{e}n}ionoTCQ + QGasNitrog{\hat{e}n}ionoTCP + QGasNitrog{\hat{e}n}ionoTCF + QGasNitrog{\hat$$

+ QContaminantenoTCF + QAguanoTCF + QDioxidodeCarbononoTCF = 0:

Balanço de Energia no Forno de Pós-Combustão por Substâncias:

 $QDieselnoPC := mDieselnoPC \cdot \Delta H0CombDiesel$: $QCombContaminantenoPC := mC2Cl6 \cdot \Delta H0CombContaminante :$ TsaidadoPC $QG\acute{asNitrog\acute{e}nionoPC} :=$ $mN2EntradadoPC \cdot$ CpGásNitrogênio dI $\cdot mArPC \cdot$ TentradadoPC TsaidadoPC CpGásNitrogênio dT Tambient TsaídadoPC $QDi \acute{o} xi do de Carbonono PC :=$ mCO2EntradadoPC· CpDióxidodeCarbono dT TentradadoPC TsaidadoPC (mCO2CombdoDieselPC + mCO2CombdoCont). CpDióxidodeCarbono dI Tamhiente Tambiente $QG\acute{a}sOxig\acute{e}nionoPC :=$ CpGásOxigênio dT (mO2EntradadoPC mO2EntradadoPC entradadoPC TsaídadoPC + %OAr·mArPC - mO2CombdoDieselPC - mO2CombdoCont) · CpGásOxigênio dT Tamhiente Tambiente QContaminantenoPC := mC2Cl6CpContaminante.g dT: TentradadoPC TsaídadoPC QHClnoPC := mHClSaidadoPCCpHCl dT: Tambiente Tevaporaçãodaágua CpAguag dT - CLÁgua + QAguanoPC :=mH2OEntradadoPC TentradadoPC Tambiente (mH2OEntradadoPC + mH2OCombdoDieselPCCpAgual dT Tevaporacãodaágua "evaporaçãodaágua $\int Cp Agual \, dT + CL Agua + \int_{T}$ -mH2OCombdoCont CpAguag l'ambiente vaporaçãodaágua dTBTp := QDieselnoPC + QCombContaminantenoPC + QGasNitrogenionoPC+ QDi oxido de Carbonono PC + QG as Oxigêniono PC + QC ontaminanteno PC + QHC lno PC+ QAguanoPC = 0:

fsolve({BMfO, BMfC, BMfH, BMfN, BMfCl, BMpO, BMpC, BMpH, BMpN, %O2p, %O2f, BTf, BTp, BTtc});

{mArFR = 4688.481172, mArPC = 4247.117549, TsaidanoTCF~ = 753.5854428,

```
mCO2SaídadoFR = 723.9846106, mCO2SaídadoPC = 1414.571700, mDieselnoFR
= 233.2907975, mDieselnoPC = 210.5484645, mH2OSaídadoFR = 2319.167512,
mH2OSaídadoPC = 2584.391417, mN2SaídadoFR = 3596.463580, mN2SaídadoPC
= 6854.363745, mO2SaídadoFR = 282.1562675, mO2SaídadoPC = 533.7027979,
mC2Cl6SaídadoFR = 100.0000000 }
fsolve(BMpCl);
```

100.0000744

A.2. Código da simulação na UDT com Camisa de Troca Térmica

restart : **Dados de Entrada:** mSoloContaminado := 10000 : $%Umidade := \frac{20}{100} :$ $%C2Cl6 := \frac{1.0}{100} :$

% dos Elementos em uma Molécula:

 $\label{eq:heads} \begin{array}{l} \% HH2O \coloneqq 0.111904: \\ \% HDiesel \coloneqq 0.153097: \\ \% HHCl \coloneqq 0.027646: \\ \% OH2O \coloneqq 0.888096: \\ \% OCO2 \coloneqq 0.727101: \\ \% CCO2 \coloneqq 0.272899: \\ \% CC2Cl6 \coloneqq 0.101464: \\ \% CDiesel \coloneqq 0.846903: \\ \% ClC2Cl6 \coloneqq 0.898536: \\ \% ClHCl \coloneqq 0.972354: \\ \end{array}$

% dos Oxigênio e Nitrogênio no Ar:

%OAr := 0.232915: %NAr := 1 - %OAr:

Pesos Moleculares:

 $\begin{array}{l} PMH2O := 18.0155:\\ PMO2 := 31.999:\\ PMCO2 := 44.009:\\ PMC2Cl6 := 236.735:\\ PMN2 := 28.014:\\ PMDiesel := 184.354:\\ PMHCl := 36.4605:\\ PMAr := 28.85085:\\ \end{array}$

Equações Complementares:

 $\begin{array}{l} mH2OSoloContaminado := \%Umidade \cdot mSoloContaminado :\\ mC2Cl6 := \%C2Cl6 \cdot mSoloContaminado :\\ mSoloArgiloso := mSoloContaminado - mH2OSoloContaminado - mC2Cl6 :\\ mN2EntradadoPC := mN2SaídadoFR :\\ mH2OEntradadoPC := mH2OSaídadoFR :\\ mO2EntradadoPC := mO2SaídadoFR :\\ mCO2EntradadoPC := mCO2SaídadoFR :\\ mHClSaídadoPC := mHClCombdoCont :\\ \end{array}$

Entalpia Padrão de Reação:[J/Kg]

 $\Delta H0CombDiesel := -44.073560 \cdot 10^6 :$ $\Delta H0CombContaminante := -1.975352 \cdot 10^6 :$

Calor Específico, Latente e Sublimação dos Compostos: CpSoloArgiloso := 938.56448 : [J/kgK]

$$\begin{split} & CpContaminante s := 729.063478 : [J/kgC]\\ & Clsublimação := 248780.3848 : [J/Kg]\\ & CpContaminante g := \frac{\left(130.4086 + 119.9611 \cdot T - 100.8403 \cdot T^2 + 30.14271 \cdot T^3 - \frac{-1.698060}{T^2}\right)}{PMC2CI6\cdot1000} : \\ & [J/kg.C]\\ & Cp/gual := \frac{\left(2.7637 \cdot 10^5 - 2.0901 \cdot 10^3 \cdot T + 8.125 \cdot 10^0 \cdot T^2 - 1.4116 \cdot 10^{-2} \cdot T^3 + 9.3701 \cdot 10^{-6} \cdot T^4\right)}{PMH2O} : \\ & CL/gua := 2258840 : [J/kg]\\ & CpAgsag\\ & := \frac{1}{PMH2O} \left(0.3336 \cdot 10^5 + 0.2679 \cdot 10^5 \left(\frac{2.6105 \cdot 10^3}{T} \right) \right)^2 + 0.089 \cdot 10^5 \\ & \cdot \left(\frac{\frac{1169}{T}}{\cosh\left(\frac{1169}{T}\right)} \right)^2 \right] : \\ & CpGasOxigênio := \frac{1}{PMO2} \left(0.291 \cdot 10^5 + 0.1004 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\frac{2.5265 \cdot 10^3}{T}}{\sinhh\left(\frac{2.5265 \cdot 10^3}{T}\right)} \right)^2 + 0.0936 \cdot 10^5 \\ & \cdot \left(\frac{\frac{1153.88}{T}}{\cosh\left(\frac{1153.88}{T}\right)} \right)^2 \right] : \\ & CpGasNitrogênio \\ & := \frac{1}{PMN2} \left(0.2911 \cdot 10^5 + 0.0861 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\frac{1.7016 \cdot 10^3}{T}}{\sinhh\left(\frac{1.7016 \cdot 10^3}{T}\right)} \right)^2 + 0.001 \cdot 10^5 \\ & \cdot \left(\frac{\frac{909.79}{T}}{\cosh\left(\frac{90.79}{T}\right)} \right)^2 \right] : \\ & CpDióxidodeCarbono \\ & := \frac{1}{PMCO2} \left(0.2937 \cdot 10^5 + 0.3454 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\frac{1.428 \cdot 10^3}{T}}{\sinh\left(\frac{1.428 \cdot 10^3}{T}\right)} \right)^2 + 0.264 \cdot 10^5 \end{split}$$

$$\cdot \left(\frac{\frac{588}{T}}{\cosh\left(\frac{588}{T}\right)}\right)^2 \right):$$

$$CpHCl$$

$$:= \frac{1}{PMHCl} \left(0.2916 \cdot 10^5 + 0.0905 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\frac{2.0938 \cdot 10^3}{T}}{\sinh\left(\frac{2.0938 \cdot 10^3}{T}\right)}\right)^2 - 0.0011 \cdot 10^5$$

$$\cdot \left(\frac{\frac{120}{T}}{\cosh\left(\frac{120}{T}\right)}\right)^2 \right):$$
To more the set

Temperaturas:

 $\begin{array}{l} Tambiente := 25 + 273.15: \\ Tfinaldosolo := 400 + 273.15: \\ Tevaporaçãodaágua := 100 + 273.15: \\ Tsublimaçãodocontaminante := 185.85 + 273.15: \\ \end{array}$

TsaidadoFR := 220 + 273.15: Tentradanacamisa := 750 + 273.15: Tsaidadacamisa := 550 + 273.15: TsaidadoPC := 950 + 273.15: TentradanoTCQ := TsaidadoPC: TsaidanoTCQ := 750 + 273.15: TentradanoTCF := TsaidadoFR: TentradadoPC := TsaidanoTCF assume(200 < TsaidanoTCF)assume(200 < TentradadoPC)

Relações Estequiométricas:

$$mO2CombdoCont := \left(\frac{PMO2}{2 \cdot PMC2Cl6}\right) \cdot mC2Cl6 :$$

$$mH2OCombdoCont := \left(\frac{6 \cdot PMH2O}{2 \cdot PMC2Cl6}\right) \cdot mC2Cl6 :$$

$$mCO2CombdoCont := \left(\frac{4 \cdot PMCO2}{2 \cdot PMC2Cl6}\right) \cdot mC2Cl6 :$$

$$mHClCombdoCont := \left(\frac{12 \cdot PMHCl}{2 \cdot PMC2Cl6}\right) \cdot mC2Cl6 :$$

$$mO2CombdoDieselPC := \left(\frac{20 \cdot PMO2}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoPC :$$

$$mCO2CombdoDieselPC := \left(\frac{13 \cdot PMCO2}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoPC :$$

$$mH2OCombdoDieselPC := \left(\frac{14 \cdot PMH2O}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoPC :$$

$$mH2OCombdoDieselPC := \left(\frac{14 \cdot PMH2O}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoPC :$$

$$\begin{split} mO2CombdoDieselFR &:= \left(\frac{20 \cdot PMO2}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoFR : \\ mCO2CombdoDieselFR &:= \left(\frac{13 \cdot PMCO2}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoFR : \\ mH2OCombdoDieselFR &:= \left(\frac{14 \cdot PMH2O}{PMDiesel}\right) \cdot mDieselnoFR : \end{split}$$

Balanço de Massa no Forno Rotativo por Elemento Químico:

 $BMfO := \%OH2O \cdot mH2OSoloContaminado + \%OAr \cdot mArFR = \%OH2O \cdot mH2OSaidadoFR + mO2SaidadoFR + \%OCO2 \cdot mCO2SaidadoFR :$

 $BMfC := \%CC2Cl6 \cdot mC2Cl6 + \%CDiesel \cdot mDieselnoFR = \%CCO2 \cdot mCO2SaidadoFR + \%CC2Cl6 \cdot mC2Cl6SaidadoFR :$

Caracecterística do Processo:

%O2f := mO2SaidadoFR = 0.06 · (mO2SaidadoFR + mN2SaidadoFR + mCO2SaidadoFR + mC2Cl6SaidadoFR) : Arf := mArFR = mN2SaidadoFR + mO2SaidadoFR + mO2CombdoDieselFR :

Balanço de Massa no Pós-Combustção por Elemento Químico:

BMpO := %OH2O·mH2OSaídadoFR + mO2SaídadoFR + %OCO2·mCO2SaídadoFR + %OAr ·mArPC = %OH2O·mH2OSaídadoPC + mO2SaídadoPC + %OCO2·mCO2SaídadoPC : BMpC := %CCO2·mCO2SaídadoFR + %CC2Cl6·mC2Cl6SaídadoFR + %CDiesel·mDieselnoPC = %CCO2·mCO2SaídadoFC : BMpH := %HH2O·mH2OSaídadoFR + %HDiesel·mDieselnoPC = %HH2O·mH2OSaídadoPC

BMpH := %*HH2O*·*mH2OSaidadoFR* + %HDiesel·mDieselnoPC = %HH2O·mH2OSaidadoPC + %HHCl·mHClSaidadoPC :

 $BMpN := mN2SaidadoFR + \%NAr \cdot mArPC = mN2SaidadoPC :$ $BMpCl := \%ClC2Cl6 \cdot mC2Cl6SaidadoFR = \%ClHCl \cdot mHClSaidadoPC :$

Caracecterística do Processo:

 $%O2p := mO2SaidadoPC = 0.06 \cdot (mO2SaidadoPC + mN2SaidadoPC + mCO2SaidadoPC + mHClSaidadoPC) :$

$$\begin{split} Arp &:= mArPC = (mN2SaidadoPC - mN2SaidadoFR) + ((mO2SaidadoPC - mO2SaidadoFR) \\ &+ mO2CombdoDieselPC + mO2CombdoCont): \end{split}$$

Balanço de Energia no Forno Rotativo por Substâncias:

 $\begin{aligned} & QDieselnoFR \coloneqq mDieselnoFR \cdot \Delta H0CombDiesel : \\ & QGásOxigênionaCamisadoFR \coloneqq mO2SaídadoPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpGásOxigênio dT : \\ & QGásNitrogênionaCamisadoFR \coloneqq mN2SaídadoPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpGásNitrogênio dT : \\ & QHClnaCamisadoFR \coloneqq mHClSaídadoPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpGásNitrogênio dT : \\ & Traidadacamisa \\ & CpGásNitrogênionaCamisadoFR = mHClSaídadoPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpGásNitrogênio dT : \\ & PHClnaCamisadoFR = mHClSaídadoPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadoFR = mHClSaídadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOFR = mHClSaídadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOFR = mHClSaídadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOFR = mHClSaídadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOFR = mHClSaídadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOFR = mHClSaídadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOFR = mHClSaídadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOFR = mHClSaídadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT : \\ & PHClnaCamisadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHCl dT \cdot \\ & PHClnaCamisadOPC \cdot \int_{Tentradanacamisa}^{Tsaídadacamisa} CpHClnaCamisa \\ & PHClnaCamisa + PHClnaC$



Balanço de Calor no Trocador de Calor por Substâncias:

Corrente Quente:



 $QDi\acute{o}xidodeCarbononoTCQ := mCO2SaídadoPC \cdot \int_{TentradanoTCQ}^{TsaídanoTCQ} CpDi\acute{o}xidodeCarbono\,dT:$

Corrente Fria



Balanço de Calor no Forno de Pós-Combustão por Substâncias:



$$\begin{aligned} Q\acute{a}guanoPC &:= \left(mH2OEntradadoPC \cdot \left(\int_{TentradadoPC}^{Tevaporaçãodaágua} Cp\acute{a}guag dT - CL\acute{a}gua + \int_{TentradadoPC}^{Tambiente} Cp\acute{a}gual dT \right) \right) + \left((mH2OEntradadoPC + mH2OCombdoDieselPC - mH2OCombdoCont) \cdot \left(\int_{Tevaporaçãodaágua}^{Tevaporaçãodaágua} Cp\acute{a}gual dT + CL\acute{a}gua + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag dT - CL\acute{a}gua - mH2OCombdoCont) \cdot \left(\int_{Tambiente}^{Tevaporaçãodaágua} Cp\acute{a}gual dT + CL\acute{a}gua + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag dT - CL\acute{a}gua + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tambiente}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tambiente}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tambiente}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tambiente}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tevaporaçãodaágua}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}guag + \int_{Tambiente}^{TsaidadoPC} Cp\acute{a}$$

fsolve(BMpCl);

mC2Cl6SaidadoFR = 100.0000000 }

100.0000744

= 5149.946278, mO2SaidadoFR = 197.0360622, mO2SaidadoPC = 402.8464513,

A.3. Código da simulação para cálculo da massa de água de resfriamento para a UDT – Tradicional e UDT-CT

restart : Dados de Entrada:

Pesos Moleculares:

PMH2O := 18.0155 : PMO2 := 31.999 : PMCO2 := 44.009 : PMC2Cl6 := 236.735 : PMN2 := 28.014 : PMDiesel := 184.354 : PMHCl := 36.4605 : PMAr := 28.85085 :

Calor Específico, Latente e Sublimação dos Compostos:



$$\left(\frac{\frac{909.79}{T}}{\cosh\left(\frac{909.79}{T}\right)}\right)^{2} \right)^{2} :$$

$$CpDióxidodeCarbono$$

$$:= \frac{1}{PMCO2} \left(0.2937 \cdot 10^{5} + 0.3454 \cdot 10^{5} \cdot \left(\frac{\frac{1.428 \cdot 10^{3}}{T}}{\sinh\left(\frac{1.428 \cdot 10^{3}}{T}\right)}\right)^{2} + 0.264 \cdot 10^{5} \cdot \left(\frac{\frac{588}{T}}{\cosh\left(\frac{588}{T}\right)}\right)^{2} \right)^{2} :$$

$$CpHCl$$

$$:= \frac{1}{PMHCl} \left(0.2916 \cdot 10^{5} + 0.0905 \cdot 10^{5} \cdot \left(\frac{\frac{2.0938 \cdot 10^{3}}{T}}{\sinh\left(\frac{2.0938 \cdot 10^{3}}{T}\right)}\right)^{2} - 0.0011 \cdot 10^{5} \cdot \left(\frac{\frac{120}{T}}{\cosh\left(\frac{120}{T}\right)}\right)^{2} \right)^{2} :$$

$$Temperaturas:$$

$$TI := 70 + 273.15 :$$

$$T3 := 950 + 273.15 :$$

T4 := 750 + 273.15: Tevaporaçãodaágua := 100 + 273.15 : T5 := 25 + 273.15:

Balanço de Calor para resfriamento abrupto do gás:

$$\begin{aligned} QG\acute{a}sNitrog\acute{e}nioCRE &:= \left(1 \cdot \int_{T^2}^{T^1} CpG\acute{a}sNitrog\acute{e}nio~dT\right) \\ QG\acute{a}sNitrog\acute{e}nioSRE &:= \left(1 \cdot \int_{T^3}^{T^1} CpG\acute{a}sNitrog\acute{e}nio~dT\right) \\ QG\acute{a}sNitrog\acute{e}nioCREParcial &:= \left(1 \cdot \int_{T^4}^{T^1} CpG\acute{a}sNitrog\acute{e}nio~dT\right) \end{aligned}$$

$$\begin{split} & QDi \acute{o}xido de Carbono CRE := \left(1 \cdot \int_{T_{2}}^{T_{1}} CpDi \acute{o}xido de Carbono dT\right) \\ & QDi \acute{o}xido de Carbono SRE := \left(1 \cdot \int_{T_{3}}^{T_{1}} CpDi \acute{o}xido de Carbono dT\right) \\ & QDi \acute{o}xido de Carbono CREParcial := \left(1 \cdot \int_{T_{4}}^{T_{1}} CpDi \acute{o}xido de Carbono dT\right) \\ & QG \acute{a}sOxig \acute{e}nio CRE := \left(1 \cdot \int_{T_{2}}^{T_{1}} CpG \acute{a}sOxig \acute{e}nio dT\right) \\ & QG \acute{a}sOxig \acute{e}nio SRE := \left(1 \cdot \int_{T_{3}}^{T_{1}} CpG \acute{a}sOxig \acute{e}nio dT\right) \\ & QG \acute{a}sOxig \acute{e}nio CREParcial := \left(1 \cdot \int_{T_{4}}^{T_{1}} CpG \acute{a}sOxig \acute{e}nio dT\right) \\ & QG \acute{a}sOxig \acute{e}nio CREParcial := \left(1 \cdot \int_{T_{4}}^{T_{1}} CpG \acute{a}sOxig \acute{e}nio dT\right) \\ & QG \acute{a}sOxig \acute{e}nio CREParcial := \left(1 \cdot \int_{T_{4}}^{T_{1}} CpG \acute{a}sOxig \acute{e}nio dT\right) \\ & QHCICRE := \left(1 \cdot \int_{T_{2}}^{T_{1}} CpHCl dT\right) : \\ & QHCICREParcial := \left(1 \cdot \int_{T_{4}}^{T_{1}} CpHCl dT\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{2}}^{Tevaporaç \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{Tevaporaç \acute{a}od aigua}^{T_{1}} CpAgual dT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{3}}^{Tevaporaç \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{Tevaporaç \acute{a}od aigua}^{T_{1}} CpAgual dT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{3}}^{Tevaporaç \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{Tevaporaç \acute{a}od aigua}^{T_{1}} CpAgual dT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{3}}^{Tevaporaç \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{Tevaporaç \acute{a}od aigua}^{T_{1}} CpAgual dT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{3}}^{Tevaporaç \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{Tevaporaç \acute{a}od aigua}^{T_{1}} CpAgual dT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{3}}^{Tevaporaç \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{Tevaporaç \acute{a}od aigua}^{T_{1}} CpAgual dT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{4}}^{Tevaporaç \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{Tevaporaç \acute{a}od aigua}^{T_{1}} CpAgual dT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{4}}^{Tevaporac \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{Tevaporac \acute{a}od aigua}^{T_{1}} CpAguad dT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{4}}^{Tevaporac \acute{a}od aigua} CpAguag dT - CLAgua + \int_{T_{4}}^{T_{4}} CpAguad AT\right)\right) \\ & QAguaCRE := \left(1 \cdot \left(\int_{T_{4}}^{Tevaporac \acute{a}od aigua} CpAg$$

UDT COM CAMISA DE TROCA TÉRMICA

QÁguaderesfriamento I := mH2Oderesfriamento $I \cdot \int_{T5}^{T1} Cp$ Águal dT:

 $\textit{BTCRE} \coloneqq \textit{QG}asNitrog \hat{e}nioCRE + \textit{QDi}oxidodeCarbonoCRE + \textit{QG}asOxig \hat{e}nioCRE + \textit{QHClCRE}$ + QAguaCRE + QAguaderes friamento1 = 0:

QGásNitrogênioCRE	
	-5.163586435 10 ⁵
QDióxidodeCarbonoCRE	
	-5.059851692 10 ⁵
QGásOxigênioCRE	
	$-4.776984507 10^{5}$

OHClCRE $-3.902729650 \, 10^5$ QÁguaCRE $-3.293399274\ 10^{6}$

UDT TRADICIONAL

 $QAguaderes friamento3 := mH2Oderes friamento3 \cdot \int_{T5}^{T1} CpAgual dT$:

 $BTCREParcial := QG'asNitrog^{\hat{e}nio}CREParcial + QDi'oxido de Carbono CREParcial$ $+ QG{asOxig{enio}CREParcial} + QHClCREParcial + QAguaCREParcial + QAguaderes friamento3$ = 0 :

QGásNitrogênioCREParcial

	-7.464400162 10 ⁵
QDióxidodeCarbonoCREParcial	-7.472716623 10 ⁵
QGásOxigênioCREParcial	6 020672861 105
QHClCREParcial	- 6.930672861 10
0 ÁguaCREParcial	-5.614027893 10 ⁵
2	-3.740493368 10 ⁶