

Optimização da sedimentação primária no tratamento de águas residuais: Simulação e aplicação de técnicas estatísticas

DANIELA MARIA DE ALMEIDA MARTINS
(Licenciada em Engenharia Química e Biológica – Ramo Ambiente)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientadores:

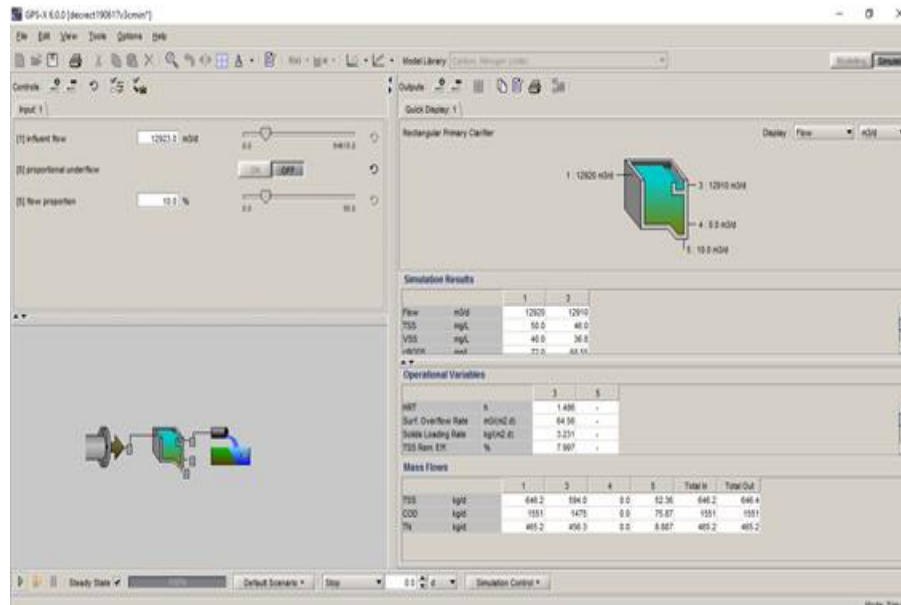
Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos
Doutora Isabel Maria da Silva João

Júri:

Presidente: Doutor João Miguel Alves da Silva
Vogais:

Doutor Teodoro José Pereira Trindade
Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

Dezembro de 2017



Optimização da sedimentação primária no tratamento de águas residuais: Simulação e aplicação de técnicas estatísticas

DANIELA MARIA DE ALMEIDA MARTINS
(Licenciada em Engenharia Química e Biológica – Ramo Ambiente)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientadores:

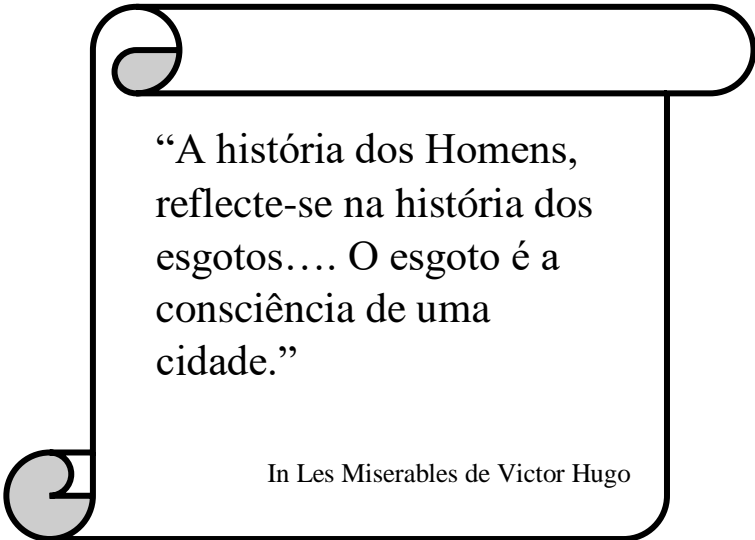
Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos
Doutora Isabel Maria da Silva João

Júri:

Presidente: Doutor João Miguel Alves da Silva
Vogais:

Doutor Teodoro José Pereira Trindade
Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

Dezembro de 2017



“A história dos Homens,
reflecte-se na história dos
esgotos.... O esgoto é a
consciência de uma
cidade.”

In Les Miserables de Victor Hugo

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho:

Aos meus orientadores, professora Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos e professora Doutora Isabel Maria da Silva João, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Eng. Luís Gomes e a todas as Entidades Gestoras do saneamento de águas residuais.

À empresa Hydromantis, por ter cedido a licença do software de simulação numérica GPS-X na versão 6.0.

Resumo

O tratamento de águas residuais (AR) visa a protecção da saúde pública, pelo que nas ETAR a AR é submetida a uma fileira de tratamento com diversas operações e processos unitários (exemplo decantação primária). Esta operação de separação sólido-líquido é essencialmente aplicada na remoção de sólidos suspensos totais (SST) da AR.

O planeamento factorial é uma técnica aplicada no desenvolvimento e optimização de processos, onde são seleccionados vários factores, com os quais se efectuam diversas combinações, de forma a determinar qual a sua influência na(s) variável(eis) de resposta.

No presente trabalho simulou-se e optimizou-se a influência de algumas variáveis no desempenho de decantadores primários, para tal, foram seleccionadas duas ETAR (X e Y) da região de Lisboa. As experiências foram realizadas recorrendo ao *software* de simulação GPS-X, implementando a corrente afluyente, o decantador primário (circular e rectangular), a corrente efluente e a de lamas. As cinco variáveis estudadas foram o caudal (A) e a concentração de SST à entrada (B), as alturas de alimentação (C) e de saída (D) e a razão entre o caudal de lamas e o caudal efluente (E).

O planeamento factorial e a análise estatística foram efectuados no *software* Minitab17. Os modelos do efeito das variáveis em estudo foram: eficiência de remoção de SST (%) = $73,726 - 4,025A + 6,635B - 8,127C + 2,122E$ e eficiência de remoção de SST (%) = $47,129 - 4,071A + 33,041B - 2,755C + 1,606E - 2,381BC$, para as ETAR X e Y respectivamente. Os valores previstos obtidos através dos modelos apresentam uma elevada concordância com os valores simulados. Para a ETAR X foi comparada a eficiência de remoção de SST prevista pelo modelo com a real.

Palavras-chave:

Sedimentação; Decantação primária; Simulação; Eficiência de remoção; Optimização; Planeamento factorial

Abstract

Wastewater (WW) treatment aimed the protection of public health, therefore in a WWTP the WW is subjected to a treatment scheme with several operations and processes units (e.g. primary sedimentation). This solid-liquid separation operation is essentially applied in the removal of total suspended solids (TSS) from the WW.

Factorial planning is a technique applied in the development and optimization of processes. Several factors are selected and combined in order to determine its influence on the response variable(s).

In the present work, the influence of some variables on the performance of primary clarifiers were simulated and optimized. For this purpose, two WWTP (X and Y) of the Lisbon region were selected. The experiments were carried out using the GPS-X simulation software, implementing the influent stream, the primary clarifier (circular and rectangular), the effluent and sludge streams. The five variables studied were the flow rate (A), the TSS concentration at the inlet (B), the feed (C) and outlet (D) heights and the ratio between sludge and effluent flows (E).

Factorial planning and statistical analysis were performed in Minitab software¹⁷. The models of the effect of the variables under study were: TSS removal efficiency (%) = $73,726 - 4,025A + 6,635B - 8,127C + 2,122E$ and removal efficiency of SST (%) = $47,129 - 4,071A + 33,041B - 2,755C + 1,606E - 2,381BC$, for the X and Y WWTP, respectively. The predicted values obtained through the models show a high agreement with the simulated values. For the WWTP X, the TSS efficiency removal predicted by the model and the real values were compared.

Keywords:

Sedimentation; Primary Clarifier; Simulation; TSS removal; Optimization; Factorial planning

Lista de abreviaturas e acrónimos

AR– Água Residual

ANOVA – Análise de Variância

CBO – Carência Bioquímica de Oxigénio

Ch – Carga Hidráulica

COT – Carbono Orgânico Total

CQO – Carência Química de Oxigénio

E.P. – Equivalente Populacional

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

H_{alim} – Altura de Alimentação

H_{dec+Des} – Altura do Decantador mais Descarregador

NKT – Azoto Kjeldahl Total

NMP – Numero Mais Provável

N-NH₄ - Azoto Amoniacal

N-NO₂ – Nitritos

N-NO₃ – Nitratos

N-Org – Azoto Orgânico

N-Tot – Azoto Total

OFAT – One Factor At A Time

PEAASAR- Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais

P-Org – Fosforo Orgânico

P-Ort – Fosforo Inorgânico

P-Tot – Fosforo Total

Q_{afllu} – Caudal Afluente

Q_{eflu} – Caudal Efluente

Q_{lamas} – Caudal de Lamas

SDF – Sólidos Dissolvidos Fixos

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

SDV – Sólidos Dissolvidos Voláteis

SS – Sólidos Suspensos

Ssed – Sólidos Sedimentáveis

SSF – Sólidos Suspensos Fixos

SST – Sólidos Suspensos Totais

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

ST – Sólidos Totais

Trh – Tempo de Retenção Hidráulico

TSS - Total Suspended Solids

$[SST]_{\text{Aflu}}$ – Concentração de SST Afluente

Índice

Lista de abreviaturas e acrónimos	XIII
1. Introdução ao TFM	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objectivo e metodologia	2
1.3. Estrutura de TFM	2
2. Águas Residuais	5
2.1. Caracterização das águas residuais	5
2.1.1. Parâmetros físicos das águas residuais	6
2.1.2. Parâmetros químicos das águas residuais	8
2.1.4. Parâmetros microbiológicos das águas residuais	9
2.1.5. Composição típica das águas residuais em Portugal	9
2.2. Saneamento em Portugal	10
2.3. Estação de Tratamento de Águas Residuais	11
2.4. Tratamentos de águas residuais	13
2.4.1. Tratamento preliminar	14
2.4.2. Tratamento primário	14
2.4.3. Tratamento secundário	16
2.4.4. Tratamento terciário	17
2.4.5. Tratamento avançado	17
2.4.6. Tratamento de lamas	17
3. Sedimentação	19
3.1. Sedimentação discreta	19
3.2. Sedimentação floculenta	20
3.3. Sedimentação em manto	20
3.4. Sedimentação através de compressão	21
4. Decantação	23
4.1. Tipologia de decantadores	23
4.1.1. Decantadores circulares	23
4.1.2. Decantadores rectangulares	24
4.2. Considerações de dimensionamento de decantadores	25
4.2.1. Estrutura da alimentação do afluente	25
4.2.2. Estrutura e taxa de descarga	27

4.2.3.	Carga hidráulica.....	27
4.2.4.	Tempo de retenção hidráulico	28
4.2.5.	Velocidade de fluxo linear.....	28
4.2.6.	Profundidade.....	29
5.	Modelação e simulação	31
5.1.	Modelo unidimensional não reactivo – “simple1d”	33
5.2.	Tipologia de decantadores primários	36
6.	Desenho de experiências	39
6.1.	Procedimento de desenho experiências.....	40
6.2.	Planeamento factorial	41
6.2.1.	Planeamento factorial 2^2	41
6.2.2.	Planeamento factorial 2^k	43
6.3.	Análise de variância (ANOVA)	43
6.3.1.	Procedimento ANOVA	44
6.3.2.	Análise de resíduos e modelo de regressão	45
6.3.3.	Pressupostos da ANOVA	45
7.	Caso de estudo	47
7.1.	Caracterização das ETAR	47
7.2.	Apresentação e discussão de resultados	48
7.2.1.	Codificação das variáveis e variável de resposta	48
7.2.2.	Planeamento factorial.....	49
7.2.3.	Efeitos dos factores e interacções	59
7.2.4.	ANOVA	60
7.2.5.	Modelo de regressão	62
7.2.6.	Verificação dos pressupostos da ANOVA	63
7.2.7.	Avaliação do modelo	69
7.2.8.	Teste para condições reais de funcionamento.....	75
7.2.9.	Optimização da eficiência de remoção de SST (%).....	76
8.	Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros	81
	Referências Bibliográficas	85
	ANEXOS.....	89
	ANEXO I – Caudais ETAR X e Y	91

ANEXO II – Exemplo de implementação de teste no GPS-X	93
ANEXO III – Gráficos de efeitos ETAR X.....	97
➤ Efeitos Principais	97
➤ Efeitos das interacções de 2 factores	98
ANEXO IV – Gráficos de efeitos ETAR Y	101
➤ Efeitos Principais	101
➤ Efeitos das interacções de 2 factores	102
ANEXO V – Gráficos de efeitos factor B fixo nível baixo.....	107
➤ Efeitos Principais	107
➤ Efeitos das interacções de 2 factores	108
ANEXO VI – Gráficos de efeitos factor B fixo nível alto	111
➤ Efeitos Principais	111
➤ Efeitos das interacções de 2 factores	112
ANEXO VII – Verificação dos pressupostos da ANOVA modelo com factor B nível baixo ..	115
ANEXO VIII – Verificação dos pressupostos da ANOVA modelo com factor B nível alto	119
ANEXO IX – Balanço ao decantador Primário – ETAR X	123
ANEXO X – Resumo e Poster da comunicação apresentada no Encontro Luso-Galego de Química 2017	125

Índice de Tabelas

Tabela 1. Tipos de sólidos existentes nas AR.....	7
Tabela 2. Principais constituintes químicos das AR	8
Tabela 3. Concentrações de patogénicos em AR não tratadas	9
Tabela 4. Composição típica das AR urbanas não tratadas em Portugal	10
Tabela 5. Requisitos para as descargas das estações de tratamento de AR urbanas	12
Tabela 6. Níveis de tratamento, operações e objectivos	13
Tabela 7. Tipo operações de separação de SS no tratamento de AR	19
Tabela 8. Dimensões típicas para decantadores primários	23
Tabela 9. Parâmetros de dimensionamento para decantadores primários	25
Tabela 10. Matriz de teste	42
Tabela 11. Matriz de planeamento ou tabela de sinais para factorial 2^2 e	43
Tabela 12. Observações das amostras para teste ANOVA.....	44
Tabela 13. Estrutura genérica do teste ANOVA.....	44
Tabela 14. Caracterização das ETAR X e Y	47
Tabela 15. Variáveis experimentais com respectivos níveis de funcionamento e níveis codificados para as ETAR X e Y.....	49
Tabela 16. Planeamento factorial 2^5 factores com níveis codificados, de funcionamento e resposta – ETAR X.....	55
Tabela 17. Planeamento factorial 2^5 factores com níveis codificados, de funcionamento e resposta – ETAR Y.....	57
Tabela 18. Contrastes e efeitos para os factores principais e interacções para as ETAR X e Y ..	59
Tabela 19. Análise de Variância (ANOVA) aos factores considerados relevantes – ETAR X...61	
Tabela 20. Análise de Variância (ANOVA) aos factores considerados relevantes – ETAR Y...62	
Tabela 21. Valores simulados e previstos através do modelo de regressão – ETAR X.....63	
Tabela 22. Valores simulados e previstos através do modelo de regressão – ETAR Y.....64	
Tabela 23. Contribuição líquida dos factores ETAR X.....	70
Tabela 24. Contribuição líquida dos factores ETAR Y.....	70
Tabela 25. Contrastes e efeitos para os factores principais e interacções para o planeamento com o factor B fixo no nível baixo e no nível alto	71
Tabela 26. Análise de Variância (ANOVA) aos factores considerados relevantes quando B está no nível baixo – ETAR Y.....	72
Tabela 27. Análise de Variância (ANOVA) aos factores considerados relevantes quando B está no nível baixo – ETAR Y.....	73

Tabela 28. Contribuição líquida dos factores dos modelos de regressão com factor B com nível fixo – ETAR Y	75
Tabela 29. Variáveis com respectivos níveis de funcionamento reais e codificados para condições verificadas na ETAR X.....	75
Tabela 30. Valores de eficiência prevista e real e intervalos de confiança e de previsão nas condições de funcionamento	76
Tabela 31. Condições óptimas de funcionamento – ETAR X.....	77
Tabela 32. Condições óptimas de funcionamento de acordo com o modelo completo – ETAR Y	77
Tabela 33. Condições óptimas de funcionamento de acordo com o modelo para o factor B fixo – ETAR Y	78
Tabela 34. Valores de eficiência prevista e simulada e intervalos de confiança e de previsão para cada modelo nas condições óptimas	79

Índice de Figuras

Figura 1. Sólidos existentes nas AR.....	7
Figura 2. Evolução da cobertura dos serviços de drenagem e tratamento das AR em Portugal (2002-2013).....	11
Figura 3. Esquema de Flotação com ar dissolvido sem reciclo	15
Figura 4. Esquema de Flotação por ar disperso	16
Figura 5. Esquema de Decantador Circular.....	24
Figura 6. Esquema de Decantador Rectangular.....	24
Figura 7. Estruturas de alimentação do efluente	26
Figura 8. Decantador circular com estrutura de alimentação central	26
Figura 9. Decantador circular com estrutura de alimentação periférica.....	27
Figura 10. Esquema de descarregador com entalhe em “V”	27
Figura 11. Modelo de divisão do decantador em 10 camadas	33
Figura 12. Função de sedimentação por zonas	34
Figura 13. Entrada do efluente no decantador em condições normais	35
Figura 14. Entrada do efluente no decantador para caudais elevados.....	36
Figura 15. Entrada do efluente no decantador para caudais baixos	36
Figura 16. Configurações dos decantadores circulares	37
Figura 17. Representação esquemática de um processo.....	39
Figura 18. Esquema simplificado da linha de tratamento da fase líquida da ETAR X.....	47
Figura 19. Esquema simplificado da linha de tratamento da fase líquida da ETAR Y	47
Figura 20. Esquema utilizado para realizar os testes para as ETAR X e Y.....	50
Figura 21. Janela “Influent Advisor” – caracterização do afluente	50
Figura 22. Escolha do modelo “simple1d” no decantador primário	51
Figura 23. Características do decantador circular – ETAR X	52
Figura 24. Condições operacionais do decantador primário – ETAR X.....	53
Figura 25. Ambiente de simulação, com parâmetros adicionados na janela de controlo e “quick display” do decantador circular – ETAR X.....	54
Figura 26. Representação seminormal dos efeitos –ETAR X	61
Figura 27. Representação seminormal dos efeitos –ETAR Y	62
Figura 28. Distribuição normal dos resíduos – ETAR X	66
Figura 29. Distribuição normal dos resíduos – ETAR Y	66

Figura 30. Distribuição dos resíduos em função da eficiência de remoção de SST (%) prevista – ETAR X	67
Figura 31. Distribuição dos resíduos em função da eficiência de remoção de SST (%) prevista – ETAR Y	67
Figura 32. Distribuição dos resíduos em função da ordem de experimentação – ETAR X	68
Figura 33. Distribuição dos resíduos em função da ordem de experimentação – ETAR Y	68
Figura 34. Relação entre a eficiência de remoção de SST (%) prevista através do modelo e simulada nos testes – ETAR X	69
Figura 35. Relação entre a eficiência de remoção de SST (%) prevista através do modelo e simulada nos testes – ETAR Y	69
Figura 36. Representação seminormal dos efeitos com factor B fixo no nível baixo –ETAR Y	71
Figura 37. Representação seminormal dos efeitos com factor B fixo no nível alto –ETAR Y ...	72
Figura 38. Relação entre a eficiência de remoção de SST (%) simulada nos testes e prevista através do modelo de regressão com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	74
Figura 39. Relação entre a de eficiência de remoção de SST (%) simulada nos testes e prevista através do modelo de regressão com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	74
Figura 40. Optimização da eficiência de remoção (%) – ETAR X	76
Figura 41. Optimização da eficiência de remoção (%) de acordo com o modelo completo – ETAR Y	77
Figura 42. Optimização da eficiência de remoção (%) de acordo com o factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	78
Figura 43. Optimização da eficiência de remoção (%) de acordo com o factor B fixo no nível alto – ETAR Y	78
Figura II. 1. Características do decantador circular – ETAR Y	85
Figura II. 2. Condições operacionais do decantador primário – ETAR Y	85
Figura II. 3. Ambiente de simulação, com parâmetros adicionados na janela de controlo e “quick display” do decantador rectangular – ETAR Y	86
Figura II. 4. Ficheiro excel obtido pelo GPS-X com o “quick display” de um teste – ETAR X.	87
Figura II. 5. Ficheiro excel obtido pelo GPS-X com o “quick display” de um teste – ETAR Y.	87
Figura III. 1. Representação gráfica do efeito do caudal afluyente (A) na eficiência de remoção de SST – ETAR X	88
Figura III. 2. Representação gráfica do efeito da concentração de SST afluyente (B) na eficiência de remoção de SST – ETAR X	88
Figura III. 3. Representação gráfica do efeito da altura de alimentação (C) na eficiência de remoção de SST – ETAR X	88
Figura III. 4. Representação gráfica do efeito da altura do decantador mais descarregador (D) na eficiência de remoção de SST – ETAR X	88

Figura III. 5. Representação gráfica do efeito da razão de Qlomas/Qefluente (E) na eficiência de remoção de SST – ETAR X	89
Figura III. 6. Representação gráfica do efeito da interação AB na eficiência de remoção de SST – ETAR X	89
Figura III. 7. Representação gráfica do efeito da interação AC na eficiência de remoção de SST – ETAR X	89
Figura III. 8. Representação gráfica do efeito da interação AD na eficiência de remoção de SST – ETAR X	89
Figura III. 9. Representação gráfica do efeito da interação AE na eficiência de remoção de SST – ETAR X	90
Figura III. 10. Representação gráfica do efeito da interação BC na eficiência de remoção de SST – ETAR X.....	90
Figura III. 11. Representação gráfica do efeito da interação BD na eficiência de remoção de SST – ETAR X.....	90
Figura III. 12. Representação gráfica do efeito da interação BE na eficiência de remoção de SST – ETAR X.....	90
Figura III. 13. Representação gráfica do efeito da interação CD na eficiência de remoção de SST – ETAR X.....	91
Figura III. 14. Representação gráfica do efeito da interação CE na eficiência de remoção de SST – ETAR X.....	91
Figura III. 15. Representação gráfica do efeito da interação DE na eficiência de remoção de SST – ETAR X.....	91
Figura IV. 1. Representação gráfica do efeito do caudal afluente (A) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	92
Figura IV. 2. Representação gráfica do efeito da concentração de SST afluente (B) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y.....	92
Figura IV. 3. Representação gráfica do efeito da altura de alimentação (C) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	92
Figura IV. 4. Representação gráfica do efeito da altura do decantador mais descarregador (D) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y.....	92
Figura IV. 5. Representação gráfica do efeito da razão de Qlomas/Qefluente (E) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	93
Figura IV. 6. Representação gráfica do efeito da interação AB na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	93
Figura IV. 7. Representação gráfica do efeito da interação AC na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	93
Figura IV. 8. Representação gráfica do efeito da interação AD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y.....	93
Figura IV. 9. Representação gráfica do efeito da interação AE na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	94

Figura IV. 10. Representação gráfica do efeito da interacção BC na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	94
Figura IV. 11. Representação gráfica do efeito da interacção BD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	94
Figura IV. 12. Representação gráfica do efeito da interacção BD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	94
Figura IV. 13. Representação gráfica do efeito da interacção BD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	95
Figura IV. 14. Representação gráfica do efeito da interacção BE na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	95
Figura IV. 15. Representação gráfica do efeito da interacção CD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	95
Figura IV. 16. Representação gráfica do efeito da interacção CE na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	95
Figura IV. 17. Representação gráfica do efeito da interacção DE na eficiência de remoção de SST – ETAR Y	96
Figura V. 1. Representação gráfica do efeito do caudal afluente (A) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	97
Figura V. 2. Representação gráfica do efeito da altura de alimentação (C) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	97
Figura V. 3. Representação gráfica do efeito da altura do decantador mais descarregador (D) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	97
Figura V. 4. Representação gráfica do efeito da razão de Qlamas/Qefluente (E) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	97
Figura V. 5. Representação gráfica do efeito da interacção AC na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	98
Figura V. 6. Representação gráfica do efeito da interacção AD na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	98
Figura V. 7. Representação gráfica do efeito da interacção AE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	98
Figura V. 8. Representação gráfica do efeito da interacção CD na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	98
Figura V. 9. Representação gráfica do efeito da interacção CE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	99
Figura V. 10. Representação gráfica do efeito da interacção DE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	99
Figura VI. 1. Representação gráfica do efeito do caudal afluente (A) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	100
Figura VI. 2. Representação gráfica do efeito da altura de alimentação (C) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	100

Figura VI. 3. Representação gráfica do efeito da altura do decantador mais descarregador (D) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	100
Figura VI. 4. Representação gráfica do efeito da razão de Qlamas/Qefluente (E) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	100
Figura VI. 5. Representação gráfica do efeito da interacção AC na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	101
Figura VI. 6. Representação gráfica do efeito da interacção AD na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	101
Figura VI. 7. Representação gráfica do efeito da interacção AE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	101
Figura VI. 8. Representação gráfica do efeito da interacção CD na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	101
Figura VI. 9. Representação gráfica do efeito da interacção CE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	102
Figura VI. 10. Representação gráfica do efeito da interacção DE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	102
Figura VII. 1. Distribuição normal dos resíduos com factor B fixo no nível baixo– ETAR Y .	104
Figura VII. 2. Distribuição dos resíduos em função da eficiência de remoção de SST (%) prevista com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	104
Figura VII. 3. Distribuição dos resíduos em função do teste (tempo) com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	105
Figura VIII. 1. Distribuição normal dos resíduos com factor B fixo no nível alto– ETAR Y...	107
Figura VIII. 2. Distribuição dos resíduos em função da eficiência de remoção de SST (%) prevista com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y	107
Figura VIII. 3. Distribuição dos resíduos em função do teste (tempo) com factor B fixo no nível alto – ETAR Y	108
Figura IX. 1. Esquema para balanço ao decantador primário.....	109

1. Introdução ao TFM

1.1. Enquadramento e motivação

A humanidade enfrenta um saneamento deficitário, especialmente em países em desenvolvimento, tornando-se uma ameaça ao bem-estar das populações. Desta forma o acesso ao saneamento básico é essencial, sendo igualmente um veículo para o desenvolvimento humano. A falta de saneamento básico dificulta o acesso a água limpa, aumentando as desigualdades de saúde. Na ausência de saneamento básico as populações perdem acesso a águas limpas de qualidade, e aumentam as desigualdades na saúde e diminuem os avanços na educação, na erradicação da pobreza e no aumento da criação de riqueza (Watkins *et al.* 2006).

Em meados do século XIX, a evolução da medicina permitiu, estabelecer uma relação entre a qualidade da água, as condições de saneamento e o aparecimento de surtos infecto-contagiosos que se disseminavam pelos aglomerados populacionais (Ribeiro 2010).

O desenvolvimento económico de um país torna-se inseparável da protecção do meio ambiente. O tratamento de AR surge como forma de protecção da saúde pública, não descuidando os cuidados ambientais e atendendo às preocupações económicas, sociais e políticas.

A água começa por ser captada no meio hídrico e encaminhada para estações de tratamento de águas (ETA), passando a ser designada por água para consumo humano, sendo distribuída para consumo humano e industrial. Depois da água ser utilizada esta passa a ser designada por AR e são conduzidas para estações de tratamento de águas residuais (ETAR).

Nas ETAR as AR são sujeitas a diversos níveis de tratamento: preliminar (pré-tratamento), primário, secundário, terciário e de afinação. No tratamento primário, onde se recorre à operação de decantação, promove-se a remoção dos sólidos suspensos totais (SST) da AR, que contribui para a diminuição da carência bioquímica de oxigénio (CBO). Assim a sedimentação constituiu uma solução de tratamento e ao mesmo tempo protege os equipamentos a jusante, proporcionando um maior retorno sobre o investimento. Esta operação tem elevada importância atendendo a que a legislação em vigor (decreto-lei n.º 152/97, de 19 de Junho de Ministério do Ambiente, 1997) permite em casos excepcionais que as AR sejam apenas sujeitas ao tratamento primário.

Estas razões conduzem ao interesse em estudar a optimização da sedimentação primária no tratamento de AR, para tal, recorreu-se à simulação numérica do funcionamento de um decantador primário. A simulação permite testar diversas condições de forma idêntica ao que acontece em sistemas reais, através da aplicação de modelos numéricos. Devido à existência de diversos

factores que podem influenciar a optimização da sedimentação é necessário recorrer a técnicas de planeamento experimental, tais como o desenho de experiências.

1.2. Objectivo e metodologia

Pretendeu-se com o presente trabalho final de mestrado optimizar a eficiência de remoção de SST, na decantação primária, em duas ETAR da região de Lisboa, que apresentam populações servidas e tipologia de decantadores distintas. Consistiu no estudo de diversas combinações das variáveis recorrendo ao *software* de simulação GPS-X e com os resultados nele obtidos aplicou-se técnicas de planeamento factorial. Este ponto envolveu vários factores, de modo a determinar as variáveis que mais influenciam a eficiência de remoção de SST. Os dados obtidos foram analisados com recurso a métodos estatísticos (e.g. ANOVA), tendo sido testada a validade do modelo.

1.3. Estrutura de TFM

O presente trabalho final de mestrado divide-se em 8 capítulos incluindo o presente capítulo, em que se apresenta o enquadramento do tema, os objectivos e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 aborda a temática das AR, estando dividido em 4 subcapítulos. No primeiro é abordada a caracterização das AR, estando subdividido em parâmetros físicos, químicos e microbiológicos e a composição típica das AR em Portugal. No subcapítulo 2 e 3 encontra-se o saneamento em Portugal e o funcionamento das ETAR, respectivamente. O último subcapítulo aborda o tratamento das AR, estando dividido de acordo com o tratamento preliminar, primário, secundário, terciário e o tratamento das lamas.

No capítulo 3 são expostos os fundamentos de sedimentação, sendo dividido em 4 subcapítulos, um para cada tipo de sedimentação, discreta, flocculenta, em manto e através de compressão.

No capítulo 4 foi efectuada uma abordagem da decantação, onde se apresenta um subcapítulo para a tipologia de decantadores e um para as considerações necessárias ao seu dimensionamento.

No capítulo 5 encontra-se o tema da modelação e simulação, onde se efectua uma descrição dos modelos utilizados na decantação primária e da tipologia dos decantadores existentes no *software* GPS-X.

No capítulo 6 encontra-se o desenho de experiências, que é subdividido em 3, abordando o procedimento do desenho de experiências, o planeamento factorial, que está dividido em planeamento factorial 2^2 e em planeamento factorial 2^k , e o último subcapítulo sobre a análise de

variância (ANOVA), onde se descreve o procedimento, a análise de resíduos, o modelo de regressão e os pressupostos da ANOVA

No capítulo 7 é realizado o caso de estudo, onde é efectuada uma caracterização das ETAR e são apresentados e discutidos os resultados.

Por fim, as conclusões e perspectivas futuras encontram-se no capítulo 8.

2. Águas Residuais

2.1. Caracterização das águas residuais

As AR são um factor importante para a qualidade da água e para a saúde humana. Estas são uma mistura de sólidos e líquidos, que provêm do consumo de água pela comunidade e podem conter nutrientes e outras substâncias. As AR quando são enviadas para o meio receptor sem serem tratadas podem causar danos, tanto no ambiente como na saúde pública (Watkins *et al.* 2006).

De forma a proteger o ambiente e a saúde pública as AR são colectadas em sistemas de drenagem que conduzem a ETAR, que têm como finalidade reduzir os poluentes presentes nas AR.

As AR apresentam diferentes composições de acordo com a sua origem e sistema de drenagem utilizado (Tchobanoglous *et al.* 2013).

As AR tem as origens definidas segundo o decreto-lei n.º 152/97, de 19 de Junho (Ministério do Ambiente 1997), sendo classificadas em:

“Águas residuais domésticas: as águas residuais de serviços e de instalações residenciais, essencialmente provenientes do metabolismo humano e de actividades domésticas”;

“Águas residuais industriais: as águas residuais provenientes de qualquer tipo de actividade que não possam ser classificadas como águas residuais domésticas nem sejam águas pluviais”;

“Águas residuais urbanas: as águas residuais domésticas ou a mistura destas com águas residuais industriais e ou com águas pluviais”.

De acordo com o decreto regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto (Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações 1995), os sistemas de drenagem pública de AR são de quatro tipos:

“Separativos: constituídos por duas redes de colectores distintas, uma destinada às águas residuais domésticas e industriais e outra à drenagem das águas pluviais ou similares”;

“Unitários: constituídos por uma única rede de colectores onde são admitidas conjuntamente as águas residuais domésticas, industriais e pluviais”;

“Mistos: constituídos pela conjugação dos dois tipos anteriores, em que parte da rede de colectores funciona como sistema unitário e a restante como sistema separativo”;

“Separativos parciais ou pseudo-separativos: em que se admite, em condições excepcionais, a ligação de águas pluviais de pátios interiores ao colector de águas residuais domésticas”.

É necessário e de grande importância conhecer as diversas características das AR, pois vão delimitar a eficiência do tratamento das ETAR. As características qualitativas das águas residuais dividem-se em: físicas, químicas e biológicas.

2.1.1. Parâmetros físicos das águas residuais

A cor e o odor são duas características que variam conforme a idade das AR, pois estão associados à degradação dos compostos orgânicos presentes (Davis 2010).

Uma das características físicas que manipula todo o tratamento de AR é a temperatura, uma vez que influencia as velocidades de reacção químicas e biológicas (Tchobanoglous *et al.* 2013). A temperatura das AR varia entre 10 e 20 °C, uma vez que o sistema de saneamento recebe águas domésticas quentes (Davis 2010). As gamas de temperatura são influenciadas consoante o local de funcionamento da ETAR, por exemplo as zonas sul da Europa apresentam gamas de valor mais elevadas que as zonas do Norte.

As AR apresentam partículas suspensas ou dissolvidas, que são denominados por sólidos. Os sólidos são divididos em diversas fracções, tal como apresentado na Figura 1 e descrito na Tabela 1 (APHA/AWWA/WEF, 2012).

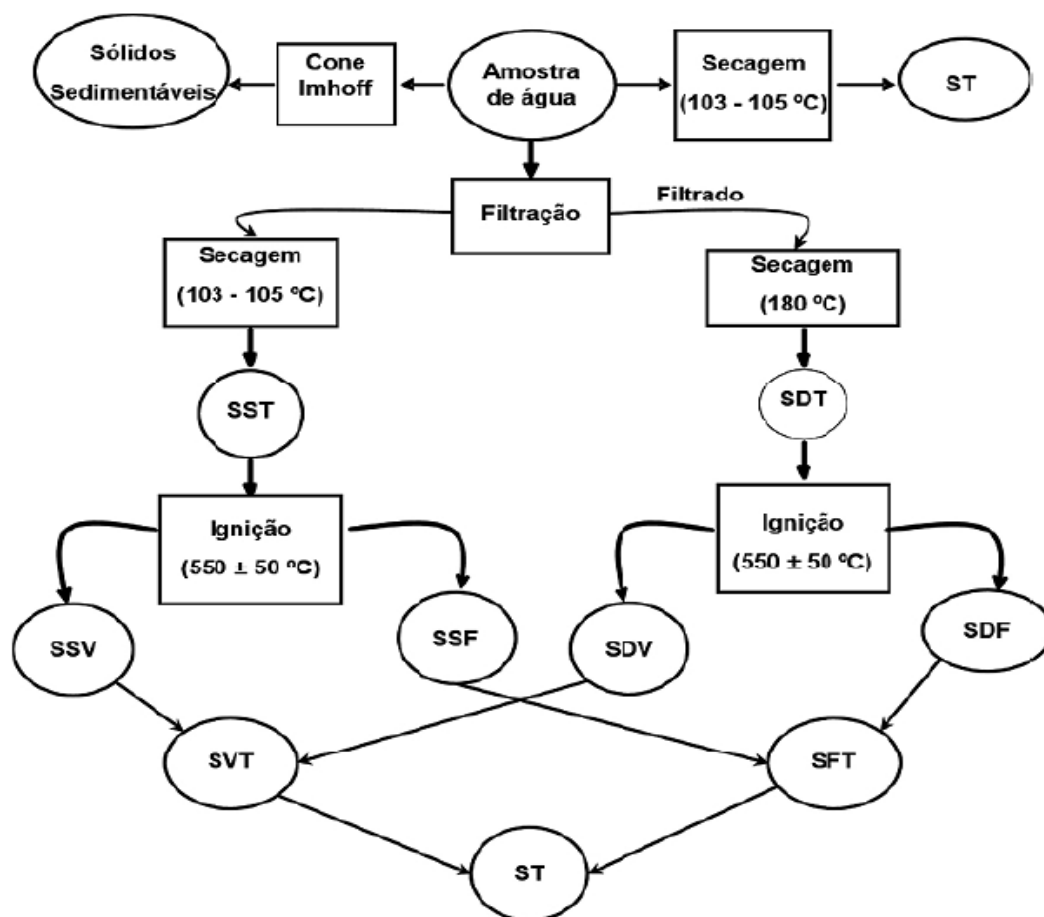


Figura 1. Sólidos existentes nas AR (Marecos do Monte *et al.* 2016)

Tabela 1. Tipos de sólidos existentes nas AR (APHA/AWWA/WEF 2005)

Tipo de sólidos	Descrição
✓ Sólidos totais (ST)	Resíduos sólidos deixados num recipiente após a evaporação de uma amostra e subsequente secagem numa estufa a uma temperatura entre 103 – 105 °C. (incluindo SST e SDT)
✓ Sólidos suspensos totais (SST)	Resíduos sólidos que ficam retidos num filtro de membrana de 0,45 µm, sendo depois seco até peso constante a uma temperatura de 105 °C ¹

¹ Decreto-lei n.º 152/97 de 19 de Junho (Ministério do Ambiente 1997).

Tabela 1 (cont.). Tipos de sólidos existentes nas AR (APHA/AWWA/WEF 2005)

Tipo de sólidos	Descrição
▪ Sólidos suspensos fixos (SSF)	Fracção da matéria dos SST que permanece a peso constante após ignição a 550 °C
▪ Sólidos suspensos voláteis (SSV)	Fracção da matéria dos SST que volatiliza a peso constante após ignição a 550 °C
✓ Sólidos dissolvidos totais (SDT)	Matéria que atravessa o filtro de fibra de vidro, sendo evaporada até secar e atingir peso constante a uma temperatura de 180 °C
▪ Sólidos dissolvidos fixos (SDF)	Fracção da matéria dos SDT que permanece a peso constante após ignição a 550 °C
▪ Sólidos dissolvidos voláteis (SDV)	Fracção da matéria dos SDT que volatiliza a peso constante após ignição a 550 °C
✓ Sólidos sedimentáveis (SSed)	Sólidos que sedimentam após um período delimitado de tempo

2.1.2. Parâmetros químicos das águas residuais

Os principais parâmetros químicos das AR estão associados à matéria orgânica presente. Estes são reconhecidos pelos nomes dos testes nos quais são determinados e estão divididos nas classes apresentados na Tabela 2 (Davis 2010).

Tabela 2. Principais constituintes químicos das AR

Constituintes	Descrição
Carência bioquímica de oxigénio (CBO)	Representa a quantidade de oxigénio utilizado na oxidação bioquímica da matéria orgânica biodegradável de uma água, à temperatura de 20 °C e por um tempo determinado, 5 d CBO ₅ (20)
Carência química de oxigénio (CQO)	Mede a quantidade de oxigénio consumido para a oxidação química da matéria orgânica, recorrendo a um oxidante forte em meio ácido
Azoto Kjeldahl total (NKT)	Mede a quantidade total de azoto orgânico e azoto amoniacal, avaliando o potencial de crescimento microbiológico, e a necessidade para nitrificação

2.1.4. Parâmetros microbiológicos das águas residuais

O tipo e a quantidade de microrganismos existentes nas AR estão relacionados com o estado de saúde das populações, que por sua vez está associado às características socioeconómicas, e com os factores de decaimento microbiológico. A Tabela 3 apresenta a concentração de alguns microrganismos patogénicos presentes em AR não tratadas (Marecos do Monte *et al.* 2010).

Tabela 3. Concentrações de patogénicos em AR não tratadas (adaptado de Marecos do Monte *et al.* 2010)

	Microrganismos	Concentrações típicas em AR não tratadas (NMP/100 mL)
Bactérias	<i>Coliformes totais</i>	10^7 - 10^9
	<i>Coliformes fecais</i>	10^5 - 10^8
	<i>Clostridium perfringens</i>	10^3 - 10^5
	<i>Enterocci</i>	10^4 - 10^5
	<i>Streptococos fecais</i>	10^4 - 10^6
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10^3 - 10^6
	<i>Shigella</i>	10^0 - 10^3
	<i>Salmonella</i>	10^2 - 10^4
Protozoários	Cistos de <i>Cryptosporidium parvum</i>	10^1 - 10^5
	Cistos de <i>Entamoeba histolytica</i>	10^0 - 10^5
	Cistos de <i>Giardia lamblia</i>	10^1 - 10^4
Helmintas	Ovos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	10^0 - 10^3
Vírus	Vírus entéricos	10^3 - 10^4
	Colifagos	10^2 - 10^4

2.1.5. Composição típica das águas residuais em Portugal

A composição das AR varia de acordo com as actividades que lhes dão origem e com os hábitos da população. Em casos excepcionais as AR podem ser submetidas unicamente ao tratamento primário, no entanto, o tratamento secundário permite obter AR tratadas com elevada qualidade, sendo que em alguns casos é necessário recorrer ao tratamento terciário para cumprir os requisitos legais (Marecos do Monte *et al.* 2010).

De acordo com Marecos do Monte *et al.* (2010) as AR urbanas em Portugal apresentam uma composição variada de acordo com a Tabela 4, sendo que após o seu tratamento apresentam valores muito menores.

Tabela 4. Composição típica das AR urbanas não tratadas em Portugal (adaptado de Marecos do Monte *et al.* 2010)

Poluente	Unidades	Portugal	
		Intervalo de variação	Valor típico
Sólidos Totais (ST)	mg/L	980 -60	715
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	mg/L	210 - 720	550
Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF)	mg/L	-	-
Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV)	mg/L	-	-
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	90 - 430	190,00
Sólidos Suspensos Fixos (SSF)	mg/L	9 - 24	16,00
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	mg/L	34 - 109	72,00
Sólidos sedimentáveis (Ssed)	mg/L	-	-
Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO ₅)	mg/L O ₂	444 - 1338	
Carência Química de Oxigénio (CQO)	mg/L O ₂	746 -1946	
Carbono Orgânico Total (COT)	mg/L	-	-
Azoto Total (N-Tot)	mg/L N	53 - 88	60,00
Azoto Orgânico (N-Org)	mg/L N	11,8 - 16,0	14,00
Azoto Amoniacal (N-NH ₄)	mg/L NH ₄	32 -81	38,00
Nitritos (N-NO ₂)	mg/L NO ₂	Vestígios - 1,31	0,19
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L NO ₃	Vestígios - 3,3	0,50
Fósforo Total (P-Tot)	mg/L P	3,5 - 13	8,50
Fósforo Orgânico (P-Org)	mg/L P	-	-
Fósforo Inorgânico (P-Ort)	mg/L P	-	9,00
Cloretos	mg/L	120 - 136	128,00
Sulfatos	mg/L	42 - 75	47,00
Óleos E Gorduras	mg/L	39 - 475	115,00

2.2. Saneamento em Portugal

Entre 2002 e 2013, a cobertura do serviço de saneamento tem vindo a aumentar. A cobertura do serviço de drenagem e de tratamento AR atingiu, em 2013, o ponto máximo de 83 % e 82 %, respectivamente, como se pode ver na Figura 1 (ERSAR 2015). O objectivo estabelecido no

PEAASAR II, de 2013, munir 90 % da população de rede de drenagem e com tratamento de AR, não foi atingido, no entanto, estes valores têm tendência crescente.

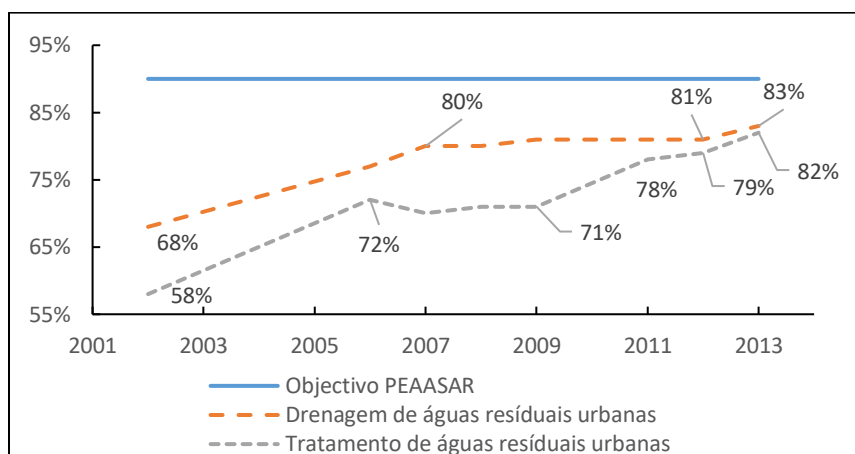


Figura 2. Evolução da cobertura dos serviços de drenagem e tratamento das AR em Portugal (2002-2013) (adaptado de (ERSAR 2015))

De acordo com o RASARP (2016) (ERSAR 2016), o serviço de saneamento é assegurado por entidades concessionárias abrangendo cerca de 96 % da população e 90 % dos municípios encontram-se abrangidos por entidades gestoras que prestam serviço de saneamento de AR em alta. As entidades gestoras de 149 municípios e aproximadamente 2,6 milhões de habitantes são responsáveis por todas as fases do processo desde a recolha e drenagem até ao tratamento das AR e destino final das mesmas (ERSAR 2016).

2.3. Estação de Tratamento de Águas Residuais

As estações de tratamento de AR são instalações projectadas para o tratamento de AR de forma a garantir o cumprimento dos requisitos legais definidos no decreto-lei n.º 152/97, de 19 de Junho do Ministério do Ambiente (1997), que resulta da transposição para a ordem jurídica nacional da directiva n.º 91/271/CEE, do conselho de 21 de Maio de 1991.

O nível de tratamento a que cada ETAR deve sujeitar as AR está relacionado com os equivalentes populacionais (E.P.) e as características da zona de descarga. Estas zonas são definidas no decreto-lei n.º 152/97, anexo II. As zonas sensíveis são:

- “Lagos naturais de água doce, outras extensões de água doce, estuários e águas costeiras que se revelem eutróficas ou susceptíveis de se tornarem eutróficas num futuro próximo, se não forem tomadas medidas de protecção.”
- “Águas doces de superfície destinadas à captação de água potável cujo teor em nitratos possa exceder a concentração de nitrato estabelecida nas disposições pertinentes da

Directiva n.º 75/440/CEE, de 16 de Julho de 1975, relativa à qualidade das águas superficiais destinadas à produção de água potável, se não forem tomadas medidas de protecção.”

As zonas menos sensíveis devem ser identificadas tendo em consideração “o risco de a carga descarregada poder ser transferida para zonas adjacentes onde possa ter efeitos nocivos para o ambiente”. Assim como, “os seguintes elementos: baías abertas, estuários e outras águas costeiras com uma boa renovação das águas e que não estão sujeitos nem a eutrofização nem a empobrecimento de oxigénio ou cuja eutrofização ou empobrecimento de oxigénio na sequência das descargas residuais urbanas se considera improvável”.

As ETAR que efectuem descargas em zonas não sensíveis estão obrigadas os requisitos, apresentados na Tabela 5 para os parâmetros CBO, CQO e SST, enquanto que as que descarregam em zonas sensíveis sujeitas a eutrofização têm de respeitar as condições para o fósforo e o azoto.

Tabela 5. Requisitos para as descargas das estações de tratamento de AR urbanas (adaptado de DL n.º 152/97, de 19 de Junho)

Parâmetros	Concentração	Percentagem mínima de redução²
CBO₅ a 20°C sem nitrificação³	25 mg/l O ₂	70 - 90
CQO	125 mg/l O ₂	75
SST⁴	35 mg/l (e.p. > 10 000)	90 (e.p. >10000)
	60 mg/l (2 000 < e.p. < 10 000)	70 (2000 < e.p. < 10 000)
	2 mg/l P (10 000 < e.p. < 100 000)	
Fósforo total	1 mg/l P (e.p. > 100 000)	80

² Redução em relação à carga do afluente

³ O parâmetro pode ser substituído por outro: carbono orgânico total (COT) ou carência total de oxigénio (COT), se for possível estabelecer uma relação entre a CBO₅ e o parâmetro de substituição.

⁴ Este requisito é facultativo

Tabela 5 (cont.). Requisitos para as descargas das estações de tratamento de AR urbanas
(adaptado de DL n.º 152/97, de 19 de Junho)

Parâmetros	Concentração	Percentagem mínima de redução ⁵
Azoto total	15 mg/l N	70 - 80
	(10 000 < e.p. < 100 000)	
	10 mg/l P	
	(e.p. > 100 000)	

2.4. Tratamentos de águas residuais

As AR para que possam ser devolvidas à natureza de forma segura, tem de ser sujeitas ao tratamento adequado, de forma a satisfazer os objectivos de qualidade aos quais estão sujeitos.

As ETAR têm como principal função o tratamento das AR. Estas instalações podem estar preparadas para proceder aos níveis de tratamento apresentados na Tabela 6, de forma a manter a qualidade do meio receptor. Atendendo a esta obrigação e à necessidade de limpeza e manutenção existem pelo menos dois equipamentos para cada operação ou processo.

Tabela 6. Níveis de tratamento, operações e objectivos (adaptado de Davis 2010)

Níveis de tratamento	Operações/Processos	Objectivos
Pré-tratamento	- Trituradores	
	- Gradagem	- Remoção de materiais sólidos inertes e de grandes dimensões
	- Desarenação	
	- Equalização/homogeneização	- Protecção e melhoria do desempenho das unidades de tratamento a jusante
	- Flotação	
Tratamento primário	- Decantação	- Remoção de sólidos suspensos
	- Flotação	- Remoção de parte da matéria orgânica

⁵ Redução em relação à carga do afluente.

Tabela 6 (cont.). Níveis de tratamento, operações e objectivos (adaptado de Davis 2010)

Níveis de tratamento	Operações/Processos	Objectivos
Tratamento secundário	- Tratamentos físico-químicos	- Remoção da matéria orgânica biodegradável
	- Tratamentos biológicos (biomassa fixa e suspensa)	
Tratamento terciário		- Remoção de componentes que inibem a recuperação da água
	- Tratamentos físico-químicos	- Remoção de nutrientes
		- Remoção de sólidos suspensos
		- Desinfecção

2.4.1. Tratamento preliminar

As AR que entram nas ETAR apresentam sólidos de grandes dimensões, tais como, fragmentos de madeira, têxteis, plásticos, areias, latas e pedras. Estes sólidos são responsáveis por obstruções e desgaste excessivo dos equipamentos a jusante. De forma a proteger estes equipamentos os detritos inertes e de maiores dimensões são removidos no tratamento preliminar. Os equipamentos para tratamento preliminar são dimensionados com o objectivo de reduzir em tamanho ou remover os sólidos. O tratamento preliminar pode incluir as seguintes operações unitárias, gradagem, equalização, desarenação e remoção de óleos e gorduras (Mines Jr 2014; Tchobanoglous *et al.* 2013; Spellman 2014; Davis 2010).

2.4.2. Tratamento primário

O tratamento primário é a primeira operação onde existe remoção de parte da matéria orgânica, associada aos sólidos em suspensão, e ainda os sólidos inertes que não foram removidos no tratamento preliminar (Davis 2010; Lin & Lee 2007).

O Decreto-lei n.º 152/97 de 19 de Junho, define tratamento primário como “o tratamento das águas urbanas por qualquer processo físico e ou químico que envolva a decantação das partículas sólidas em suspensão, ou por outro processo em que a CBO₅ das águas recebidas seja reduzida em pelo menos, 20 % antes da descarga e o total das partículas sólidas em suspensão seja reduzido em pelo menos, 50 %”.

O principal método utilizado no tratamento primário é a sedimentação, que se baseia na diferença de densidade entre as partículas sólidas e a massa de líquido, sendo que a operação se designa por decantação primária. Em situações excepcionais, a decantação primária é o único tratamento a que as AR são sujeitas (Ramalho 1983; Marecos do Monte *et al.* 2010).

A decantação primária promove a remoção de SST através do mecanismo de sedimentação floculenta (Capítulo 3.2.), originando lamas que se aglomeram no fundo do decantador. Estas lamas são designadas por lamas primárias que apresentam elevada quantidade de matéria orgânica, razão pela qual é necessário assegurar tempos de retenção hidráulicos entre 1,5 e 2,5 horas (Marecos do Monte *et al.* 2016).

Para remoção de partículas leves que apresentam velocidades de sedimentação muito lentas, pode ser utilizada uma operação de flotação. Esta operação consiste na introdução de pequenas bolhas de gás, geralmente ar, que se agregam às substâncias, arrastando-as até à superfície. Uma vez as substâncias na superfície são utilizados raspadores de superfície para efectuar a limpeza do líquido. A operação de flotação pode ser realizada recorrendo a ar dissolvido, Figura 3 ou através de ar disperso, Figura 4 (Tchobanoglous *et al.* 2013).

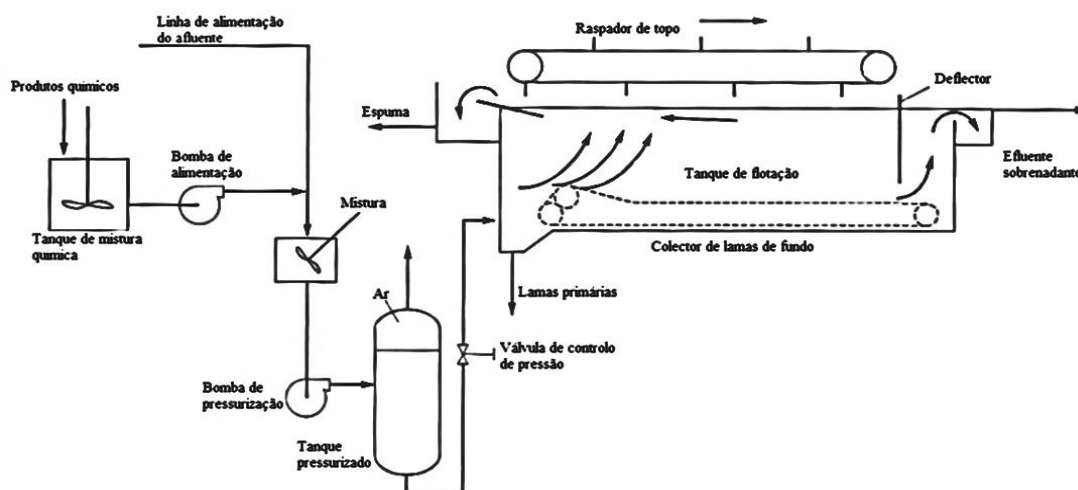


Figura 3. Esquema de Flotação com ar dissolvido sem reciclo (adaptado de Tchobanoglous *et al.*, 2013)

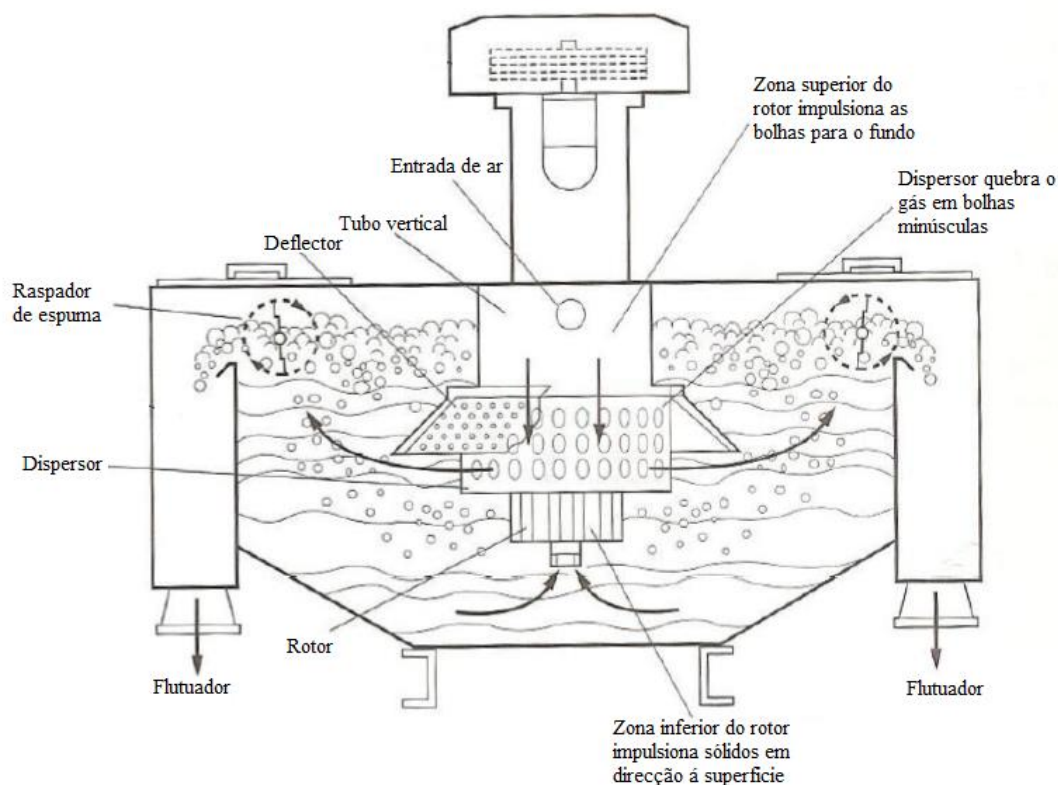


Figura 4. Esquema de Flotação por ar disperso (adaptado de Tchobanoglous *et al.*, 2003)

2.4.3. Tratamento secundário

Após o tratamento primário, as AR ainda podem apresentar matéria orgânica em suspensão, na forma coloidal e dissolvida (Lin & Lee 2000), assim é necessário proceder ao tratamento secundário. Este tratamento, permite a obtenção de uma AR tratada que cumpra as exigências respeitantes aos parâmetros CBO₅, CQO e SST presentes na Tabela 5.

No Decreto-lei n.º 152/97 de 19 de Junho, o tratamento secundário é definido como “o tratamento das AR urbanas que envolve geralmente um tratamento biológico com decantação secundária ou outro processo que permita respeitar os valores” dos requisitos para as descargas de tratamento de AR urbanas.

O principal objectivo do tratamento secundário é a remoção de matéria orgânica de forma a reduzir a CBO₅, além do que foi removido no tratamento primário (Spellman 2014). Neste nível de tratamento recorre-se a uma cultura homogénea de microrganismos com capacidade de converter os resíduos orgânicos em tecido celular, gases e compostos não biodegradáveis. Este processo imita o mecanismo de autodepuração da água (Lin & Lee 2000).

O tratamento secundário pode ser efectuado recorrendo a processos de biomassa suspensa ou de biomassa fixa. Nos processos de biomassa suspensa os microrganismos são mantidos no meio

líquido em suspensão, recorrendo a agitação. O método mais comum neste processo é as lamas activadas, que consiste na produção de uma “massa” activada de microrganismos com capacidade de estabilizar matéria orgânica e os nutrientes, geralmente em condições aeróbias (Tchobanoglous *et al.* 2013).

2.4.4. Tratamento terciário

A necessidade da aplicação de tratamento terciário prende-se com o reconhecimento de uma ou mais das seguintes situações (Davis 2010):

- ✓ Aumento da imposição populacional que resulta no incremento das cargas orgânicas e de sólidos suspensos nos meios receptores;
- ✓ Necessidade de melhoria da remoção de sólidos suspensos para proporcionar uma desinfecção mais eficiente;
- ✓ Necessidade de remoção de nutrientes para moderar a eutrofização das zonas sensíveis;
- ✓ Necessidade de remoção de componentes que impossibilitam ou inibem a recuperação da água.

De forma a minimizar as situações referidas e para cumprir os requisitos de descarga do efluente adoptaram-se processos de precipitação química, filtração granular, filtração por membranas, adsorção química e desinfecção (Davis 2010).

A desinfecção tem como objectivo a eliminação ou inactivação de organismos causadores de doença (patogénicos), tais como bactérias e vírus. Este tratamento é especialmente importante no caso de poder vir a ocorrer contacto com seres humanos. O cloro tem sido o desinfectante mais utilizado devido à sua eficácia, devendo, no entanto, ser removido antes da descarga do efluente, uma vez que é tóxico para os organismos aquáticos (Mines Jr 2014).

2.4.5. Tratamento avançado

Quando após os tratamentos ainda se encontram poluentes dissolvidos em concentrações residuais, que não foram eliminados pelos tratamentos anteriores é necessário recorrer ao tratamento avançado (Marecos do Monte *et al.* 2016).

2.4.6. Tratamento de lamas

As lamas são um “produto secundário” do tratamento primário e secundário das AR e são compostas por cerca de 3 % de sólidos (Spellman 2014). Desta forma, os principais objectivos do tratamento de lamas são (Mines Jr 2014):

- ✓ Redução do volume das lamas;
- ✓ Eliminação dos organismos patogénicos nas lamas;
- ✓ Redução do teor orgânico das lamas → estabilização das lamas.

Actualmente, existem diversas tecnologias disponíveis para o tratamento das lamas e a opção adoptada depende do tipo de lamas e do seu destino final (Mines Jr 2014).

3. Sedimentação

O termo sedimentação é aplicado à operação de separação de partículas em suspensão que apresentam maior densidade que o líquido.

Como já foi referido a sedimentação primária funciona como a “primeira linha de defesa” no tratamento de AR. Estas apresentam sólidos suspensos mais densos que a água, o que permite a sua sedimentação gravítica quando em condições de repouso.

Existem quatro tipos de sedimentação que se distinguem pelas diferentes concentrações e forças a que são sujeitas, sendo deste modo aplicados a operações de separação de SS no tratamento de AR (Tabela 7) (Marecos do Monte *et al.* 2016; Tchobanoglous *et al.* 2013).

Tabela 7. Tipo operações de separação de SS no tratamento de AR (adaptado de Marecos do Monte *et al.* 2016; Tchobanoglous *et al.* 2013)

Tipo de sedimentação	Aplicação	Operação
Sedimentação discreta	Remoção de partículas discretas e areias	Desarenação
Sedimentação floculenta	Remoção de parte de SS	Decantação primária Decantação secundária
Sedimentação em manto	Remoção de SS em soluções moderadamente concentradas	Decantação secundária
Sedimentação através de compressão	Remoção de SS em soluções com concentração elevada – formação de estruturas	Ocorre em zonas de maior profundidade dos decantadores

3.1. Sedimentação discreta

Na sedimentação discreta as partículas sedimentam, sem que exista aglomeração, mantendo as suas propriedades individuais. As partículas discretas, não floculentas, sedimentam de acordo com a lei de Newton, onde se assume que as partículas são circulares com diâmetro uniforme (Ramalho 1983; Lin & Lee 2000; Tchobanoglous *et al.* 2013). Assim, é possível determinar a velocidade de sedimentação através da Lei de Newton, recorrendo à Equação 1:

$$V_s = \left[\frac{4g}{3C_a} \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) d \right]^{0,5} \quad (1)$$

Onde:

- V_s - Velocidade de sedimentação (m/s);
- g - aceleração da gravidade (m/s^2);
- C_a - coeficiente de atrito (adimensional);
- ρ_p - densidade de massa da partícula (kg/m^3);
- ρ - densidade de massa do líquido (kg/m^3);
- d - diâmetro da partícula (m).

3.2. Sedimentação flocculenta

Quando as partículas se encontram em soluções relativamente diluídas, vão coalescer durante a sedimentação, sofrendo alterações nas suas propriedades, como a densidade e a forma (Ramalho 1983; Carlsson 1998; Tchobanoglous *et al.* 2013). À medida que as partículas coalescem dá-se o aumento da massa e da velocidade de sedimentação. A extensão da flocculação depende da oportunidade de contacto entre partículas, que varia com a profundidade da bacia e concentração das partículas, entre outros. Os efeitos destas variáveis são estudados recorrendo a colunas de sedimentação, de forma a poder determinar a velocidade de sedimentação, Equação 2, das partículas flocculadas (Tchobanoglous *et al.* 2013).

$$V_s = \frac{H}{t_c} \quad (2)$$

Onde:

- V_s – Velocidade de sedimentação (m/s);
- H – Profundidade da coluna de sedimentação (m);
- t_c – Tempo necessário para determinada % de remoção (s).

3.3. Sedimentação em manto

A sedimentação em manto ocorre na presença de elevadas concentrações de sólidos suspensos, onde o líquido tende a deslocar-se para o topo através dos interstícios das partículas que se encontram em contacto. Estas partículas sedimentam através da formação de um “manto”, onde as partículas mantêm as suas posições relativas. (Carlsson, 1998; Tchobanoglous *et al.*, 2003) Considerando que o líquido se move pela área livre entre as partículas, a velocidade de sedimentação será menor que no caso da sedimentação discreta (Davis 2010).

3.4. Sedimentação através de compressão

A sedimentação através de compressão ocorre quando existe uma concentração suficientemente elevada para que as partículas entrem em contacto físico entre si. A consolidação das partículas ocorre na zona inferior dos decantadores, sendo extremamente lenta (Lin & Lee 2007).

4. Decantação

A decantação primária ocorre em tanques denominados por decantadores. Esta operação é aplicada em diferentes pontos do tratamento das AR. Sendo o seu objectivo a remoção de SS que de outro modo seriam descarregadas directamente no meio receptor (Tchobanoglous *et al.* 2013).

A selecção do tipo de decantador depende da dimensão da ETAR e do espaço disponível, condições topográficas do local, entre outros, tornando-se necessário avaliar cada situação.

4.1. Tipologia de decantadores

A tipologia dos decantadores pode ser organizada de acordo com o método de remoção de lamas, regime de operação e escoamento, tipo de associação, localização na fileira de tratamento, e pelo seu formato (Tchobanoglous *et al.* 2013; Marecos do Monte *et al.* 2016). Neste trabalho optou-se pela distinção de acordo com o formato dos decantadores, sendo divididos em circulares, rectangulares e quadrados, que são um caso particular dos últimos. As dimensões típicas para decantadores primários são apresentados na Tabela 8 (Adams Jr *et al.* 1999).

Tabela 8. Dimensões típicas para decantadores primários (adaptado de Adams Jr *et al.*, 1999)

Tipo de decantador	Intervalo	Valor típico
Rectangular		
Comprimento (m)	10 – 100	25 – 60
Razão comprimento/largura	1,0 – 7,5	4
Razão comprimento/altura	4,2 – 25	7 – 18
Altura (m)	2,5 – 5,0	3,5
Largura (m)	3 – 24	6 – 10
Declive do fundo (%)	1	1
Circular		
Diâmetro (m)	3 – 60	10 – 40
Altura lateral (m)	3 – 6	4
Declive de fundo (%)	8	8

4.1.1. Decantadores circulares

Nos decantadores circulares o fluxo do padrão é radial, sendo que as AR são introduzidas pela periferia, ou através do centro (mais comum em tratamento primário). A alimentação central é efectuada por tubagens suspensas na ponte, ou enterradas no betão do chão do tanque (Figura 5). O caudal ao entrar no tanque é projectado para distribuir as AR de forma idêntica em todas as direcções. O fundo do decantador é inclinado para formar um cone invertido, de forma a que os

sólidos sejam raspados para uma tremonha existente na zona central (Tchobanoglous *et al.* 2013; Davis 2010).

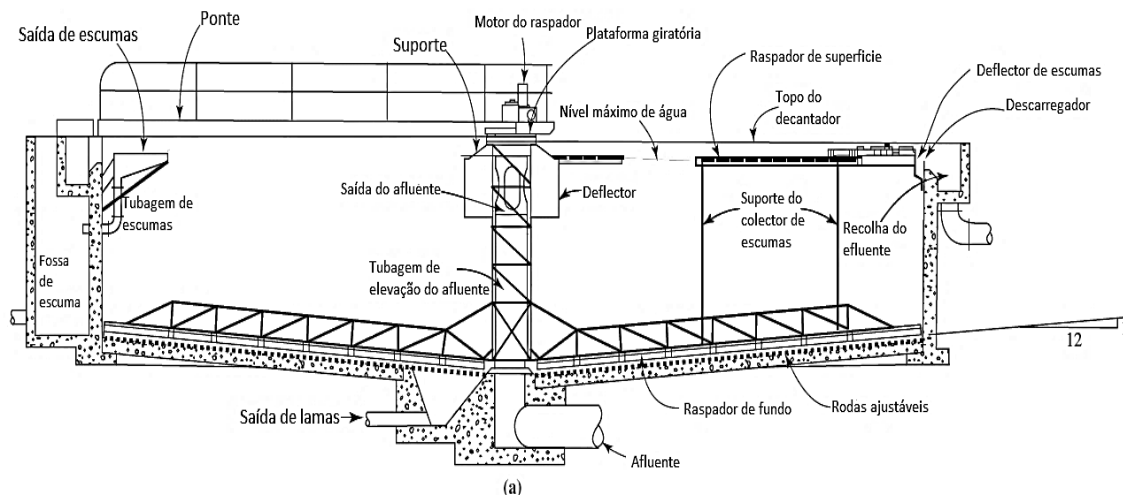


Figura 5. Esquema de Decantador Circular (adaptado de Davis 2010)

Os decantadores circulares não podem ser construídos utilizando paredes comuns, razão pela qual não podem ser aplicados em ETAR com espaço reduzido, no entanto, são construções que requerem menos manutenção e cujos rolamentos de transmissão não estão submersos.

4.1.2. Decantadores rectangulares

Tipicamente, os decantadores rectangulares são projectados para um fluxo longitudinal, onde entra e sai através das extremidades (Figura 6). As AR entram no decantador imediatamente antes de um deflector para dissipar a velocidade de entrada, ajudando a distribuir o fluxo e os sólidos uniformemente pela área de secção transversal do decantador. Os sólidos são transportados para a extremidade do decantador ou encaminhados para uma calha transversal e de seguida para a tremonha (Tchobanoglous *et al.* 2013; Davis 2010).

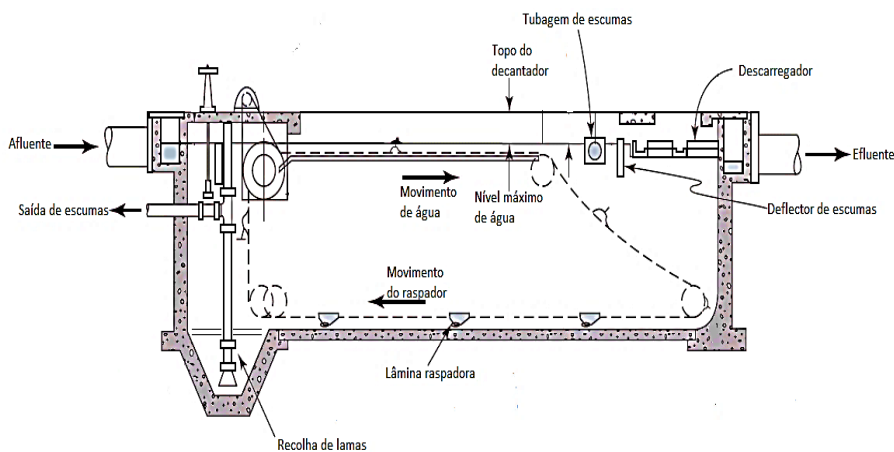


Figura 6. Esquema de Decantador Rectangular (adaptado de Davis 2010)

Quando existem restrições de espaço os tanques rectangulares são os mais vantajosos, uma vez que podem ser construídos recorrendo a paredes comuns, no entanto, os rolamentos de transmissão encontram-se submersos (Davis 2010).

4.2. Considerações de dimensionamento de decantadores

A eficiência da decantação primária é influenciada por diversos parâmetros, entre os quais se encontra o sistema da alimentação do afluente, estrutura e taxa de descarga e carga e tempo de retenção hidráulico. Os critérios empíricos encontram-se tabelados em literatura e podem ser adoptados durante o processo de dimensionamento. Na Tabela 9 encontram-se alguns valores para decantadores primários na literatura de referência.

Tabela 9. Parâmetros de dimensionamento para decantadores primários (adaptado de Tchobanoglous *et al.* 2013)

Parâmetro	Intervalo	Valor típico
Decantador primário seguido de tratamento secundário		
Tempo de retenção hidráulico (h)	1,5 – 2,5	2,0
Carga hidráulica (m ³ /(m ² .d))		
Caudal médio	30 – 50	40
Caudal máximo	80 – 120	100
Carga hidráulica nos descarregadores (m ³ /(m.d))	125 – 500	250
Decantador primário com recirculação das lamas activadas		
Tempo de retenção hidráulico (h)	1,5 – 2,5	2,0
Carga hidráulica (m ³ /(m ² .d))		
Caudal médio	24 – 32	28
Caudal máximo	48 – 70	60
Carga hidráulica nos descarregadores (m ³ /(m.d))	125 – 500	250

4.2.1. Estrutura da alimentação do afluente

A importância da estrutura de alimentação do efluente deve-se à possibilidade de ressuspensão dos sólidos sedimentados no fundo do decantador e à elevada velocidade de escoamento, não permitindo a sedimentação (Goula *et al.* 2008; Marecos do Monte *et al.* 2016). De modo a diminuir esta situação pode ser colocada um deflector na zona de entrada do afluente. Segundo Goula *et al.* (2008) a presença de um deflector diminui a recirculação provocada pela velocidade de entrada do afluente, ao mesmo tempo que aumenta a sedimentação de SST ao direccioná-los para o fundo do decantador.

Idealmente, a estrutura de alimentação reduz a velocidade de escoamento, podendo consistir em múltiplas aberturas de pequena dimensão distribuídas uniformemente, ou em estruturas que aliem a simplicidade com a eficácia (Adams Jr *et al.* 1999). A Figura 7 apresenta algumas dessas estruturas.

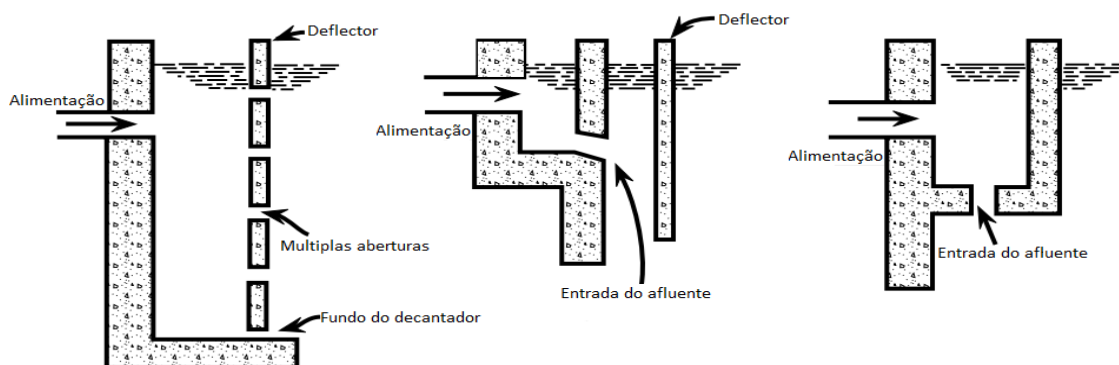


Figura 7. Estruturas de alimentação do efluente (adaptado de Adams Jr *et al.*, 1999)

O sistema de alimentação aos decantadores rectangulares e circulares é diferente. Nos primeiros a entrada do afluente e a saída do efluente ocorre em extremos opostos. A alimentação aos decantadores circulares é efectuada através de alimentação periférica, ou alimentação em tubagem central, representadas respectivamente nas Figuras 8 e 9 (Adams Jr *et al.* 1999; Marecos do Monte *et al.* 2016).

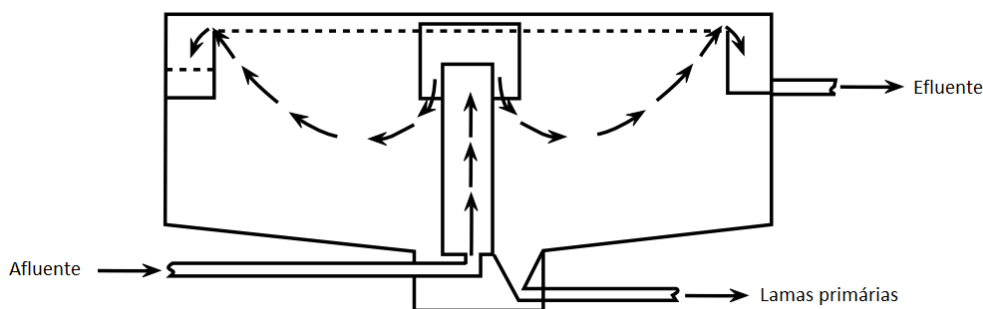


Figura 8. Decantador circular com estrutura de alimentação central (adaptado de Adams *et al.*, 1999)

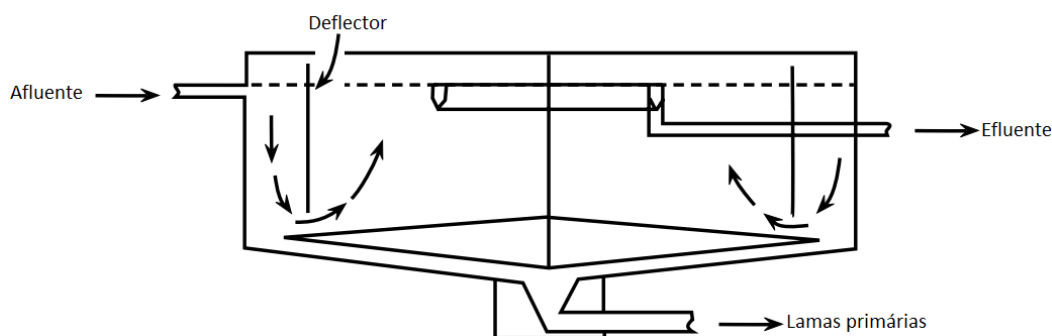


Figura 9. Decantador circular com estrutura de alimentação periférica (adaptado de Adams *et al.*, 1999)

4.2.2. Estrutura e taxa de descarga

De acordo com Tchobanoglous *et al.* (2013) a taxa de descarga tem pouca efeito na eficiência dos decantadores primários. No entanto, a estrutura de descarga do efluente deve evitar a formação de correntes ascendentes e consequente ressuspensão de partículas sedimentadas (Davis 2010; Adams Jr *et al.* 1999). Deste modo, a saída do efluente é realizada através de placas de descarga, designadas por descarregador, que apresentam entalhes em “V” com intervalos de 15 ou 30 cm, representado na Figura 10, permitindo uma descarga equilibrada (Davis 2010; Marecos do Monte *et al.* 2016).

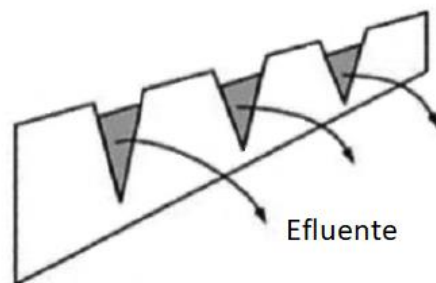


Figura 10. Esquema de descarregador com entalhe em “V” (Monte *et al.*, 2016)

4.2.3. Carga hidráulica

De acordo com Young *et al.* (1978) citado por Davis (2010) o caudal de ponta de quatro hora é uma base apropriada para o dimensionamento. Atendendo a que o objectivo do dimensionamento é maximizar a eficiência do decantador primário, de modo a minimizar a carga dos processos biológicos a jusante, este equipamento deve ter capacidade para tratar o pico de caudal (Davis 2010). O excesso de caudal hidráulico reduzirá a eficiência do decantador, permitindo que os sólidos sedimentados subam e passem para o efluente, degradando a sua qualidade (Spellman 2014).

A carga hidráulica (Ch) é a razão entre o caudal que entra na operação de tratamento (Q_{aflu}) e a área do equipamento e obtém-se pela equação 3.

$$Ch = \frac{Q_{\text{aflu}}}{A} \quad (3)$$

Onde:

Ch – Carga hidráulica ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$);

Q_{aflu} – Caudal afluyente (m^3/d);

A – Área (m^2).

4.2.4. Tempo de retenção hidráulico

O tempo de retenção hidráulico (Trh) refere-se ao tempo teórico de queda das partículas em suspensão num tanque ou canal (Spellman 2014). Este tempo tem de ser suficiente para promover o contacto entre as partículas sólidas para que ocorra floculação e uma sedimentação eficaz. Durante o dimensionamento dos decantadores devem ser considerados os períodos de baixo caudal (Q_{aflu}), para garantir que os tempos de retenção hidráulico mais longos não provocam condições sépticas (WEF & ASCE 1998).

O tempo de retenção hidráulico obtém-se pela equação 4:

$$Trh = \frac{V}{Q_{\text{aflu}}} \quad (4)$$

Onde:

Trh – tempo de retenção hidráulico (h);

V – Volume (m^3);

Q_{aflu} – Caudal afluyente (m^3/h).

4.2.5. Velocidade de fluxo linear

Apesar dos decantadores primários deverem funcionar em condições de repouso estão sujeitos a uma velocidade de fluxo. Esta deve ser suficientemente baixa (limitada entre 0,020 e 0,025 m/s) para evitar a ressuspensão das partículas sedimentadas (Davis 2010; WEF & ASCE 1998).

A velocidade crítica de escoamento pode ser estimada através da equação 5 resultante dos estudos dos estudos de Shiels (1936) e Camp (1946) (citados por Tchobanoglous *et al.*, 2003)

$$V_H = \left(\frac{8k(s-1)gd}{f} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Onde:

V_H – Velocidade crítica de fluxo linear (m/s);

k – Constante dependente do tipo de partículas (granulares: 0,04; interligadas: 0,06);

s – Gravidade específica das partículas;

g – Aceleração gravítica (9,81 m/s²);

d – Diâmetro das partículas (m);

f – Factor de atrito de Darcy-Weisbach (varia entre 0,02 e 0,03).

4.2.6. Profundidade

De forma a sedimentar uma partícula sedimentável é necessário que a mesma atinja a camada inferior do decantador, onde se encontram as lamas primárias. Se no tempo de retenção hidráulico determinado a partícula não atingir o limite inferior do tanque, não será capturada (Davis 2010). Devem ser evitadas profundidades excessivas quando o tempo de retenção de sólidos pode provocar condições anaeróbias. No entanto, os decantadores devem ser suficientemente profundos para alojar o equipamento mecânico de remoção das lamas primárias e armazenar os sólidos sedimentados (WEF & ASCE 1998).

5. Modelação e simulação

A modelação e simulação têm sido aplicadas em diversas áreas da ciência e engenharia, entre as quais se encontra a área ambiental.

A modelação consiste na organização dos conhecimentos sobre um sistema, recorrendo a conjuntos de equações e procedimentos, formados por variáveis e parâmetros, construindo um modelo (Hydromantis 2013; Pombo 2010). Este consiste numa representação simplificada de um sistema real, funcionando como uma aproximação na qual é possível realizar experiências de forma a responder às perguntas existentes sobre o sistema. Assim os modelos têm sido amplamente aplicados em estudos ambientais, uma vez que permitem avaliar o modo com os sistemas reais reagem às mudanças induzidas (Pombo 2010). A realização de experiências através do modelo permite adquirir conhecimentos sobre o sistema em estudo (Hydromantis 2013).

Seguindo a terminologia anglo-saxónica os modelos são classificados em “*black box model*”, “*white box model*” e “*grey box model*”. Os “*black box model*” são modelos fundamentados em métodos empíricos, estando sujeitos a processos de calibração. Quando o modelo se baseia em leis físicas, químicas e/ou biológicas, como por exemplo, conservação de momento e energia ou reacções biológicas, é designado por “*white box model*”. Os modelos denominados por “*grey box model*” consistem numa integração dos dois modelos anteriores, ligando assim leis empíricas com dados observados (Cândido 2013; Ariscrisnã 2012)

Os modelos estão sujeitos a uma abordagem passo a passo para evoluir da definição do modelo (passo inicial) até ao momento em que está disponível para simular (passo final), devendo seguir as etapas abaixo (Gernaey *et al.* 2004; Ariscrisnã 2012):

- ✓ Declaração do problema – determinação dos objectivos do modelo, definindo os processos a modelar e quais as variáveis;
- ✓ Escolha do modelo – selecção do modelo que descreva as unidades que se pretenda simular, considerando os objectivos a que se destina;
- ✓ Recolha de informação sobre as variáveis;
- ✓ Conformidade dos dados com o modelo para estado estacionário;
- ✓ Calibração e validação do modelo – comparação de resultados obtidos num primeiro teste com os dados que foram aplicados para a calibração. Se os resultados coincidirem com os dados de calibração o modelo é considerado fidedigno e pode-se proceder à aplicação do mesmo. Caso isto não se verifique devem ser repetidas as etapas anteriores até ao ajuste do modelo;
- ✓ Aplicação do modelo.

A simulação consiste em realizar experiências com o modelo construído e calibrado, tendo por objectivo testar tão facilmente e conveniente como nos sistemas reais. Quando não é viável experimentar no sistema real (e.g. muito dispendioso, restrições temporais e/ou físicas), a simulação é uma técnica disponível, e muito útil, para a análise do comportamento do sistema. Torna-se assim benéfico neste tipo de situações recorrer à simulação computacional não perturbando o sistema real, podendo esta ser utilizada para proceder a análise e projecto de sistemas reais (Hydromantis 2013).

Existem diversos *softwares* de simulação das várias temáticas ambientais, entre os quais se destacam o AQUASIM (identificação e simulação de sistemas aquáticos), WASP (simulação e análise da qualidade da água), EPANET (simulação de sistemas de distribuição de água). No que se refere especificamente a AR existem o WATER9 (simula as emissões atmosféricas dos resíduos em postos de recolha e armazenamento, e tratamento e eliminação de AR), WEST (simula processos químicos, biológicos e físicos em ETAR, sistemas de drenagem e rios), BioWin (simulação de processos de tratamento de AR), SIMBA#Water (sistemas de drenagem de AR, ETAR, tratamento de lamas e rios) e GPS-X, entre outros.

Para o presente trabalho foi seleccionado o *software* de simulação GPS-X (versão 6.0), desenvolvido no Canadá, pela empresa Hydromantis. Neste *software* é possível construir, calibrar e simular os diversos níveis de tratamento de uma ETAR, onde é possível, entre outros (Desjardins *et al.* 2001):

- ✓ Dimensionar processos e operações unitárias e escolher a melhor opção;
- ✓ Avaliar o dimensionamento de processos e operações;
- ✓ Estudar diversos cenários para optimização de custos operacionais atendendo aos requisitos de qualidade do efluente;
- ✓ Determinar mudanças necessárias com o objectivo de atingir os requisitos de qualidade.

O *software* de simulação GPS-X (versão 6.0) apresenta diversos modelos que se dividem em (Hydromantis 2013):

- ✓ Unidimensional não reactivo: “*simple1d*”;
- ✓ Unidimensional reactivo: *mantis*, *asm1* *asm3*.

Os modelos reactivos descrevem sistemas complexos, entre os quais se encontram os processos biológicos ou químicos, que não serão abordados no presente trabalho.

5.1. Modelo unidimensional não reactivo – “simple1d”

O modelo utilizado nas simulações realizadas para a optimização da decantação primária foi o unidimensional não reactivo, “simple1d”. Estes modelos dividem o decantador em camadas (10 por defeito) com espessuras iguais (Figura 11). O modelo baseia-se no conceito de fluxo de sólidos, onde o balanço de massa é realizado para cada camada, permitindo a simulação do perfil de sólidos em condições de equilíbrio e dinâmicas (Hydromantis 2013).

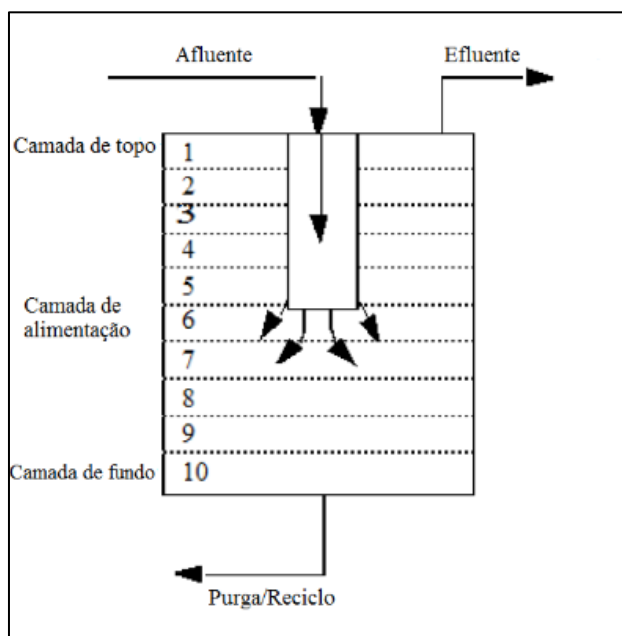


Figura 11. Modelo de divisão do decantador em 10 camadas (adaptado de Hydromantis, 2013)

O fluxo de sólidos associado à sedimentação é definido por uma função de sedimentação exponencial dupla, descrita por Takács *et al.* (1991), dada pela equação 6 (citado por Hydromantis 2013 e Ferreira 2011).

$$v_{sj} = v_{\max} e^{-rhin \times (X - X_{\min})} - v_{\max} e^{-rfloc \times (X - X_{\min})} \quad (6)$$

Onde:

v_{sj} – velocidade de sedimentação na camada j (m/d);

v_{\max} – velocidade máxima de sedimentação de Vesilind (m/d);

$rhin$ – parâmetro de sedimentação em manto de lamas (m^3/g SST);

$rfloc$ – parâmetro de sedimentação floculenta (m^3/g SST);

X – concentração de sólidos (g/m^3);

X_{\min} – concentração mínima de sólidos, correspondente à fracção não sedimentável de SST.

A função de sedimentação é representada graficamente na Figura 12, onde é possível distinguir a zonas (Hydromantis 2013; Ferreira 2011):

- I. A velocidade de sedimentação é nula, uma vez que a concentração de SST atinge o seu valor mínimo, X_{\min} ;
- II. A velocidade de sedimentação é dominada pela natureza flocculante das partículas, uma vez que é sensível ao parâmetro r_{floc} , aumentando com o aumento da concentração de SST;
- III. A velocidade de sedimentação atinge o valor v_{\max} , nesta zona a velocidade é independente da concentração de SST, visto que as partículas atingiram a sua dimensão máxima;
- IV. A velocidade de sedimentação torna-se dependente do parâmetro r_{in} , dado que a sedimentação em manto é predominante.

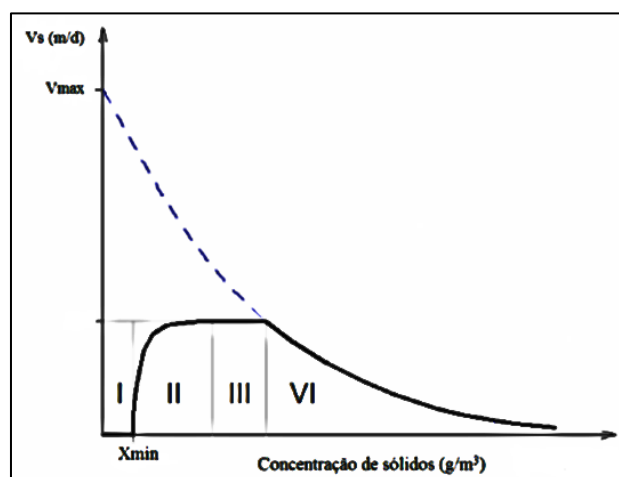


Figura 12. Função de sedimentação por zonas (adaptado de Ferreira, 2011; Hydromantis, 2013)

O modelo de sedimentação “*simple1d*” apresenta apenas a concentração de sólidos suspensos como variável integrada. Quando as reacções biológicas podem ser ignoradas pode-se utilizar este modelo. As concentrações das variáveis de estado das partículas no afluente são armazenadas como fracções da concentração de SST que entram no decantador. Neste modelo não existe alteração das concentrações das variáveis de estado solúveis (Hydromantis 2013).

➤ **Concentração do limiar do manto de lamas**

A concentração do limiar do manto de lamas define a altura do manto de lamas para fins de visualização. Quando a concentração de uma camada de sedimentação se encontra acima do limiar, então a altura dessa camada é definida como a camada do manto de lamas (Hydromantis 2013).

➤ *Componentes solúveis e particulados*

Nos modelos não reactivos as variáveis de estado solúveis estão sujeitas a uma zona de mistura completa, contrariamente aos componentes particulados, que se movem de camada em camada (Hydromantis 2013).

➤ *Distribuição uniforme do afluente*

O modelo tem em conta os efeitos causados pelo aumento do caudal afluente (Q_{afiu}).

Quando o afluente entra no decantador em condições consideradas normais, ou seja, não existe perturbação das condições de repouso necessárias à operação de sedimentação, a entrada ocorre na camada de alimentação (Figura 13) (Hydromantis 2013).

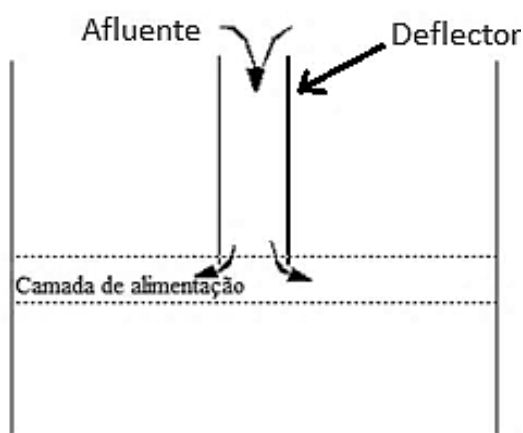


Figura 13. Entrada do efluente no decantador em condições normais (adaptado de Hydromantis 2013)

No entanto, nas situações em que ocorra aumento do caudal afluente (Q_{afiu}), este é distribuído pelas camadas inferiores à camada de alimentação (Figura 14) (Hydromantis 2013).

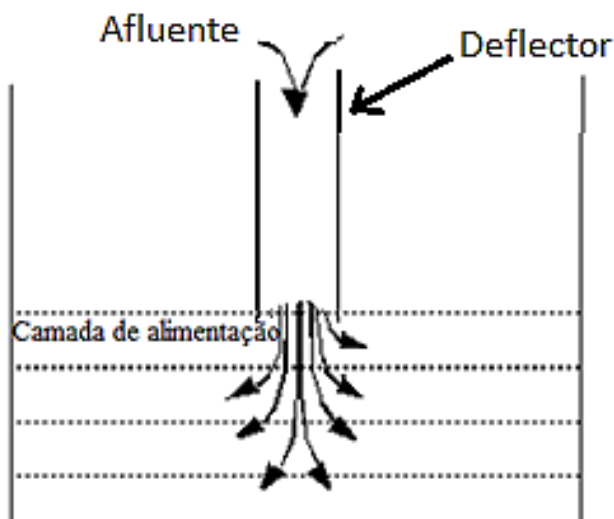


Figura 14. Entrada do efluente no decantador para caudais elevados (adaptado de Hydromantis 2013)

Nos casos em que o caudal afluente (Q_{afli}) é inferior ao caudal efluente (Q_{eflu}), a alimentação é efectuada na camada seguinte à camada de fundo do decantador (Figura 15) (Hydromantis 2013).

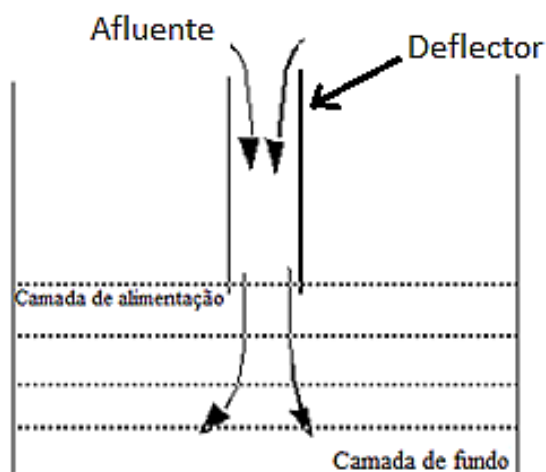


Figura 15. Entrada do efluente no decantador para caudais baixos (adaptado de Hydromantis 2013)

5.2. Tipologia de decantadores primários

No *software* de simulação GPS-X podem ser implementados decantadores primários rectangulares e circulares. Todos os decantadores rectangulares apresentam mesma configuração, cujo fundo é plano. Os decantadores circulares podem apresentar as configurações que se encontram na Figura 16 (Hydromantis 2013).

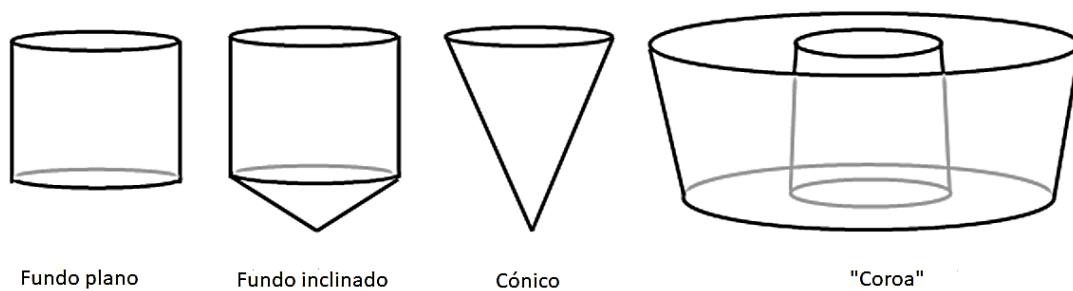


Figura 16. Configurações dos decantadores circulares (adaptado de Hydromantis 2013)

De acordo com a geometria do decantador primário da ETAR X, para as simulações referentes a esta ETAR foi escolhida a configuração “fundo inclinado”.

6. Desenho de experiências

O desenho de experiências (DOE) ou planeamento de experiências assenta num conjunto de técnicas estatísticas usadas na análise de problemas da qualidade e na melhoria continua de produtos e processos produtivos. Consiste num teste ou serie de testes onde são efectuadas alterações, propositadamente, aos factores de controlo para verificar e identificar se existem mudanças na variável de resposta (Pyzdek 2003; Montgomery 2009). Um processo pode ser representado como a combinação de operações, maquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam as entradas (e.g. matérias primas), em saídas que vão corresponder a uma ou várias variáveis de resposta. Na Figura 17 encontra-se um processo de forma esquematizada, onde “y” representa a variável de resposta, que pode ser uma ou mais variáveis observáveis, “x” são as variáveis controláveis e “z” as variáveis não controláveis, ou seja, factores de ruído, podendo no entanto ser controladas para o propósito dos testes a efectuar (Montgomery 2009).

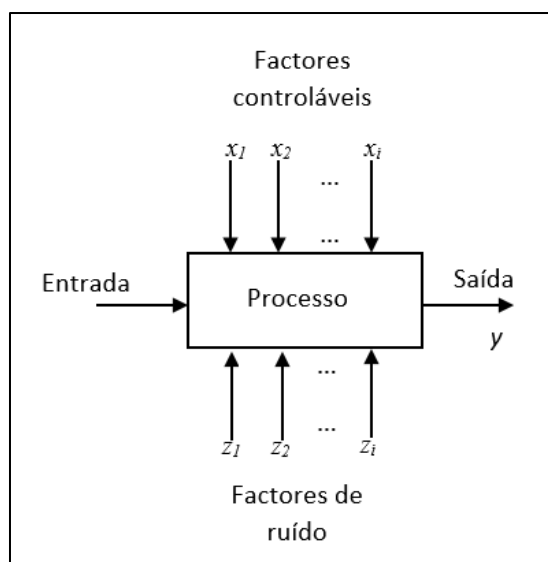


Figura 17. Representação esquemática de um processo (adaptado de Montgomery 2009)

No desenho de experiências é necessário definir os seguintes termos (Wu & Hamada 2000):

- ✓ Factores de controlo: são variáveis experimentais que podem ser variadas independentemente umas das outras;
- ✓ Factores de ruído: são variáveis que não são controláveis ou cujo controlo é difícil ou dispendioso, razão pela qual não são controladas;
- ✓ Níveis dos factores: são os diferentes valores da variável na qual o teste será efectuado;
- ✓ Variáveis de resposta: (variáveis dependentes) são os valores medidos como resultado dos testes;
- ✓ Resíduos: diferença entre o valor experimental e o valor previsto através de um modelo, para as mesmas condições.

A estratégia da experimentação utilizada consiste na abordagem usual para planear e conduzir todo o processo de experimentação. As experiências envolvem normalmente vários factores e o que se pretende na maior parte das situações é determinar a influencia que esses factores poderão ter na variável ou variáveis de resposta em estudo. A estratégia de experimentação usada difere do que normalmente se designa por experimentação OFAT (*one factor at time*) muito utilizada na prática, mas com grandes desvantagens pois não considera quaisquer possíveis interacções entre os factores.

O desenho de experiências pode ser levado a cabo com diferentes objectivos, sendo os do presente trabalho:

- ✓ Identificar os factores que mais influenciam a resposta (y);
- ✓ Determinar os melhores níveis dos factores de controlo (x) de forma a maximizar a variável de resposta (y).

6.1. Procedimento de desenho experiências

Montgomery (2013) recomenda o seguinte procedimento para o desenho de experiências:

- I. *Reconhecimento e declaração do problema* – consiste em desenvolver plenamente as ideias sobre o problema e sobre os objectivos da experiência;
- II. *Escolha dos factores e níveis* – escolha dos factores e dos intervalos sobre os quais vão ser variados, e os níveis específicos nos quais serão executadas as experiências;
- III. *Seleccção da variável de resposta* – a variável de resposta deve fornecer informações uteis sobre o processo em estudo;
- IV. *Escolha do desenho experimental* – considerando o tamanho da amostra (número de replicas), selecção da ordem de execução dos ensaios experimentais, e determinação da existência de blocos ou outras restrições à aleatoriedade;
- V. *Execução da experiência* – é vital monitorizar o processo e garantir que tudo está a ser feito de acordo com o planeado;
- VI. *Análise estatística dos dados* – para que as conclusões sejam objectivas devem ser aplicados métodos estatísticos para analisar os dados obtidos durante a execução da experiência, devendo ser verificada a validade do modelo;
- VII. *Conclusões e recomendações*. Após a análise efectuada é necessário estabelecer as conclusões e recomendações. Algumas experiências confirmatórias também podem ser executadas como forma de validar as conclusões da experiência.

6.2. Planeamento factorial

O planeamento factorial é útil no desenvolvimento e optimização de processos, sendo aplicado quando existem vários factores de interesse. Os factores são variados em simultâneo através de combinações dos seus níveis. No planeamento factorial selecciona-se um determinado número de factores, ou variáveis independentes, as quais se pretendem estudar. As experiências são efectuadas para as várias combinações dos níveis dos factores em estudo de forma a analisar o seu efeito sobre uma ou mais variáveis em estudo chamadas de variáveis de resposta (Montgomery 2009).

O planeamento factorial completo do tipo 2^k consiste em testar k factores a dois níveis cada. Se a experiência for replicada significa que existe mais do que uma observação por célula (e.g. se $r=2$ significa que existem duas observações por célula) sendo condição essencial efectuar os vários testes de forma completamente aleatória. O aumento do número de factores (k) provoca um rápido aumento dos testes efectuados uma vez que aumentam rapidamente o número de combinações. Assumindo que interações de ordem elevada não são significativas, de acordo com o principio da esparsidade⁶, pode ser aplicado um planeamento factorial fraccionado. O planeamento factorial fraccionado permite obter informações sobre efeitos principais e interações de baixa ordem, envolvendo menos testes que o planeamento factorial completo (Pyzdek 2003; Montgomery 2009).

No planeamento factorial fraccionado é essencial escolher a fracção do planeamento factorial completo que será executada, para tal é necessário definir o(s) gerador(es). No entanto, o fraccionamento do planeamento factorial implica “mascarar” alguns efeitos, ou seja, um efeito principal não pode ser distinguido do efeito de uma interacção, o que pode dificultar a interpretação dos resultados obtidos (Montgomery 2009; Wu & Hamada 2000; Montgomery 2013).

6.2.1. Planeamento factorial 2^2

O caso mais simples de planeamento factorial 2^k consiste em dois factores de interesse (A e B), onde cada um é definido apenas a dois níveis, sendo denominado por 2^2 (Hicks & Turner 1999). Os níveis são designados por “nível baixo” (-) ou “nível alto” (+) do factor. Os testes podem ser representados através de letras minúsculas, quando a letra está presente significa que o factor se encontra no nível alto e por convenção quando todos os factores se encontram no nível baixo

⁶ i.e. indica que apenas os efeitos de primeira ordem e interações de ordem baixa influenciam a resposta

representa-se a combinação em causa por (1). Os testes a efectuar e os níveis em que os factores irão ser testados são apresentados numa matriz de teste (Tabela 10) (Montgomery 2009).

Tabela 10. Matriz de teste

Teste	Combinação	A	B
1	(1)	-	-
2	a	+	-
3	b	-	+
4	ab	+	+

Quando existe uma alteração na resposta provocada por uma mudança no nível do factor trata-se do efeito do factor. Sempre que esta alteração ocorre em factores primários o efeito é um efeito principal. Em alguns casos, a diferença na resposta entre os níveis do factor não é a mesma nos níveis dos outros factores, o que significa que existe uma interacção entre os factores. A presença de uma interacção indica a existência de uma dependência entre os factores. Se esta interacção for forte, os efeitos principais correspondentes são pouco significativos, sendo que estas interacções podem mascarar os efeitos principais (Montgomery 2009; Montgomery 2013; Wu & Hamada 2000).

Os efeitos de interesse no planeamento 2^2 são os efeitos principais de A e B e o efeito da interacção AB. De forma a representar os totais de todas as observações obtidas para cada combinação de níveis utilizam-se letras minúsculas a, b, ab e (1). Para o efeito principal de do factor A, subtrai-se à média das observações do nível alto (\bar{Y}_{A+}) a média de observações no nível baixo (\bar{Y}_{A-}) (equação 7). O contraste consiste no total das observações no nível alto menos o total das observações no nível baixo. Procede-se de forma similar para os restantes efeitos dos factores e interacções (Montgomery 2009).

$$\text{Efeito factor A} = \bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-} = \frac{a + ab}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{[a + ab - b - (1)]}{2n} = \frac{\text{contraste}}{2n} \quad (7)$$

Onde:

n – Número de observações para cada combinação de níveis

A estimativa dos efeitos principais e/ou interacções é determinada pela multiplicação da coluna da combinação pelo sinal da coluna correspondente ao factor principal ou interacção, adicionando o resultado para obter o contraste e dividir por metade das observações (2n), de acordo com a Equação 7 (Montgomery 2009; Hicks & Turner 1999). Este calculo é facilitado com a utilização de uma matriz de planeamento ou tabela de sinais (+) e (-), conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11. Matriz de planeamento ou tabela de sinais para factorial 2^2 (adaptado de Montgomery 2009).

Teste	Combinações				
		I	A	B	AB
1	(1)	+	-	-	+
2	a	+	+	-	-
3	b	+	-	+	-
4	ab	+	+	+	+

6.2.2. Planeamento factorial 2^k

A metodologia apresentada no ponto anterior, planeamento factorial 2^2 , pode facilmente ser adaptada para mais de dois factores. Os contrastes para o calculo dos efeitos são facilmente determinados recorrendo à construção de uma matriz de planeamento contendo k colunas, onde:

- ✓ A primeira coluna é uma lista das combinações de tratamento pela ordem padrão, ou seja, (1), a, b, ab, c, ... (Hicks & Turner 1999);
- ✓ Os sinais dos efeitos principais (colunas A, B, C, ...) são obtidos através da associação do sinal + com o nível alto e o sinal - com o nível baixo (Montgomery 2009);
- ✓ Os sinais dos efeitos das interacções são estabelecidos após os efeitos principais e determinados pela multiplicação das colunas apropriadas (e.g. coluna AB é obtida pela multiplicação da coluna A pela coluna B) (Montgomery 2009).

Assim a estimativa do efeito principal ou interacção Z é obtida pela Equação 8.

$$\text{Efeito}_Z = \frac{\text{Contraste}_Z}{n2^{k-1}} \quad (8)$$

Onde:

n – n.º de observações

k – n.º de factores

6.3. Análise de variância (ANOVA)

O termo ANOVA tem origem na contracção do termo anglo-saxónico *analysis of variance*. O teste ANOVA apresenta um vasto campo de aplicação, que permite comparar parâmetros de mais que duas populações (Murteira *et al.* 2007). Esta técnica parte da análise da dispersão total existente num conjunto de dados para determinar quais os factores que estiveram na origem da dispersão e qual as suas contribuições (Guimarães & Cabral 1997; Murteira *et al.* 2007).

De modo geral, as observações de um problema para aplicação de um teste ANOVA podem ser representadas conforme a Tabela 12.

Tabela 12. Observações das amostras para teste ANOVA

Amostras ou grupos			
1	2	...	k
y ₁₁	y ₂₁	...	y _{k1}
y ₁₂	y ₂₂	...	y _{k2}
...
y _{1n₁}	y _{2n₂}	...	y _{kn_k}

y_{ij} – Observação j da amostra i , com $j = 1, \dots, n_i$
e $i = 1, \dots, k$, sendo n_i a dimensão da amostra i .

A tabela do teste ANOVA apresenta a estrutura Tabela 13.

Tabela 13. Estrutura genérica do teste ANOVA

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Desvio quadrático médio	F _{calculado}
Factor	gl _f	$SS_f = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	$DQM_f = \frac{SS_f}{gl_f}$	$F = \frac{DQM_f}{DQM_e}$
Erro	gl _e	$SS_e = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$DQM_e = \frac{SS_e}{gl_e}$	
Total	gl _t	$SS_t = SS_f + SS_e$		

6.3.1.Procedimento ANOVA

Para realizar um teste ANOVA é necessário proceder da seguinte forma (Murteira *et al.* 2007; Pyzdek 2003):

- I. Definir as hipóteses nula (H_0) e alternativa (H_a):

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

H_a : pelo menos dois parâmetros são diferentes

- II. Escolher o nível de significância (α);
- III. Calcular a estatística F;
- IV. A estatística F da ANOVA tem distribuição F-Snedcor com gl_f e gl_e graus de liberdade;

$$F \sim F(\alpha, gl_f, gl_e)$$

V. Decisão estatística:

Rejeitar H_0 se $F \geq F(\alpha, g_l, g_e)$.

6.3.2. Análise de resíduos e modelo de regressão

Os resíduos de um planeamento factorial apresentam um papel importante na avaliação da apropriação do modelo, uma vez que os resíduos são a diferença entre as observações e o valor previsto pelo modelo (Montgomery 2009).

O modelo de regressão de um planeamento factorial 2^k tem a forma da equação 9.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (9)$$

Onde:

Y – Variável de resposta;

x_i – Variável codificada para cada factor ou interacção;

β_i – Coeficientes de regressão;

ε – Erro aleatório.

Os níveis baixo e alto de cada factor são atribuídos, respectivamente, aos valores de $x_j = -1$ e $x_j = +1$. O coeficiente β_0 é a média de todas as observações e os restantes coeficientes de regressão (β_i) são metade do valor do efeito correspondente (Montgomery 2009).

6.3.3. Pressupostos da ANOVA

Antes da aplicação do modelo de regressão é importante avaliar os pressupostos da ANOVA (Murteira *et al.* 2007).

➤ *Normalidade da distribuição dos resíduos*

Para avaliar a normalidade dos resíduos utiliza-se um gráfico de probabilidade de distribuição normal. A violação deste pressuposto pode não apresentar consequências quando as amostras são de dimensão elevada.

➤ *Homocedasticidade dos resíduos*

A homocedasticidade ou homogeneidade das variâncias pode ser avaliada recorrendo a uma representação gráfica dos resíduos em função dos valores previstos, a violação deste pressuposto

pode ser minorada quando as amostras têm a mesma dimensão. Quando este pressuposto é verificado a representação gráfica não apresenta nenhuma estrutura em particular.

➤ *Independência dos resíduos*

A independência dos resíduos pode ser determinada através de um gráfico onde se representa a distribuição dos resíduos em função do tempo, devendo as observações apresentar um comportamento aleatório.

7. Caso de estudo

7.1. Caracterização das ETAR

A decantação primária pode ocorrer em decantadores com duas configurações, circular e rectangular, desta forma foram escolhidas duas ETAR da região da grande Lisboa, cuja caracterização se encontra na Tabela 14 (SIMTEJO 2014).

Tabela 14. Caracterização das ETAR X e Y (adaptado de Póvoa *et al* , 2011; SIMTEJO, 2014)

	ETAR X	ETAR Y
Decantador		
Tipologia	Circular	Rectangular
n.º em funcionamento	1	4
Área superficial (m ²)	800	200
Altura (m)	3	3
População servida para horizonte projecto (hab.)	214.000	211.000
Volume anual afluente (m³)	16.971.070	14.177.553

Os afluentes às ETAR X e Y são submetidos aos esquemas de tratamento da fase líquida presentes nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

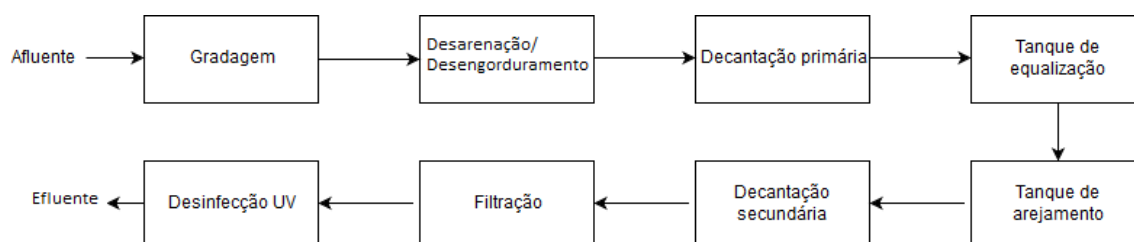


Figura 18. Esquema simplificado da linha de tratamento da fase líquida da ETAR X (adaptado de Oliveira 2014)

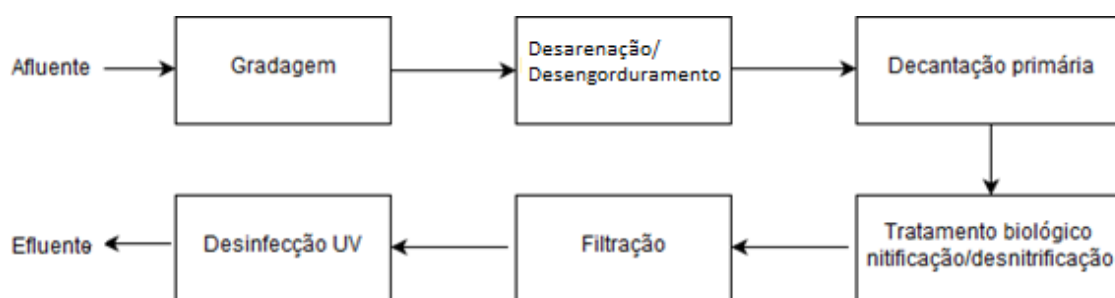


Figura 19. Esquema simplificado da linha de tratamento da fase líquida da ETAR Y (adaptado de Suez Environnement 2017)

7.2. Apresentação e discussão de resultados

7.2.1. Codificação das variáveis e variável de resposta

Para otimizar a decantação primária é necessário identificar quais as variáveis que influenciam esta operação e o modo como o fazem. As variáveis identificadas como prováveis influentes foram, o caudal afluente (Q_{aflu}), a concentração de SST afluente ($[SST]_{\text{aflu}}$), a altura da alimentação (H_{alim}) relativamente ao fundo do decantador, a altura do decantador mais descarregador ($H_{\text{dec+des}}$) e a razão entre o caudal de lamas (Q_{lamas}) e o caudal efluente (Q_{eflu}).

As variáveis identificadas foram codificadas de acordo com a equação 10.

$$x_{\text{nível}} = 2 \left(\frac{f_{\text{nível}} - f_{\text{médio}}}{f_{\text{máximo}} - f_{\text{mínimo}}} \right) \quad (10)$$

Onde:

$x_{\text{nível}}$ – nível codificado da variável

$f_{\text{nível}}$ – nível de funcionamento da variável;

$f_{\text{médio}}$ – média dos níveis de funcionamento da variável;

$f_{\text{máximo}}$ – nível de funcionamento máximo da variável;

$f_{\text{mínimo}}$ – nível de funcionamento mínimo da variável.

Na Tabela 15 encontram-se as variáveis experimentais para as ETAR X e Y, com os níveis de funcionamento e níveis codificados. Os valores de caudal afluente (Q_{aflu} – factor A), por decantador, foram escolhidos de acordo com os valores existentes no Anexo I, tendo sido obtidos através do Relatório e Contas 2013 (SIMTEJO 2014). As concentrações de SST ($[SST]_{\text{aflu}}$ – factor B) para a ETAR X foram obtidas recorrendo à SIMTEJO (2009) e Antunes (2006), enquanto para a ETAR Y foram fornecidos pela entidade gestora os dados relativos ao ano 2014. Os valores da altura de alimentação do afluente (H_{alim} - factor C) e da altura do decantador mais descarregador ($H_{\text{dec+des}}$ – factor D) foram arbitradas tendo por base os seus valores típicos (Tchobanoglous *et al.* 2013; Adams Jr *et al.* 1999). A razão $Q_{\text{lamas}}/Q_{\text{eflu}}$ (factor E) foi arbitrada após simulações no *software* GPS-X para verificação do fecho do balanço de massa, uma vez que não existiam valores reais.

Tabela 15. Variáveis experimentais com respectivos níveis de funcionamento e níveis codificados para as ETAR X e Y

Variável/Nível		Funcionamento		Codificado
		ETAR	ETAR	
		X	Y	
Q_{aflu} (m ³ /d) (A)	Mínimo	19.563	7.293	-1
	Máximo	30.073	12.923	+1
	Média	24.818	10.108	
[SST] _{aflu} (mg/l) (B)	Mínimo	240	51	-1
	Máximo	550	670	+1
	Média	395	361	
H_{alim} (m) (C)	Mínimo	1		-1
	Máximo	3		+1
	Média	2		
$H_{\text{dec+des}}$ (m) (D)	Mínimo	3,05		-1
	Máximo	3,20		+1
	Média	3,125		
Razão $Q_{\text{lamas}}/Q_{\text{efflu}}$ (%) (E)	Mínimo	10		-1
	Máximo	40		+1
	Média	25		

Considerando que o objectivo é otimizar a operação de decantação primária a variável de resposta que mais se adequa é a eficiência de remoção de SST (%). As eficiências projectadas de remoção de SST na decantação primária para a ambas as ETAR rondam os 60 %, cujo valor cumpre o Decreto-Lei n.º 152/97, o qual impõe uma redução superior a 50 %.

7.2.2. Planeamento factorial

De forma a avaliar de que modo os factores e as suas interacções podem contribuir para o aumento da eficiência de remoção de SST (%) na decantação primária (variável de resposta) foi aplicado o planeamento factorial completo, com os cinco factores seleccionados (A, B, C, D e E), testados a dois níveis e sem replicação. Os testes foram efectuados recorrendo ao *software* GPS-X.

No *software* GPS-X existem sete bibliotecas onde são definidas diversas variáveis de estado, para cada órgão de tratamento, que são recursos a utilizar na construção dos modelos. Uma vez que se pretende proceder à optimização da decantação primária a biblioteca escolhida foi a CNLIB (*Carbon – Nitrogen LIBrary*), esta permite simular a transformação de compostos à base de carbono e de azoto, sendo composta por 16 variáveis de estado (Hydromantis 2013). Após a

escolha da biblioteca a utilizar é necessário contruir o esquema de tratamento adequado. Assim foi construído o “*layout*” apresentado na Figura 20 para as ETAR X e Y, sendo constituído pelo afluente, o decantador primário circular ou rectangular e o efluente final.

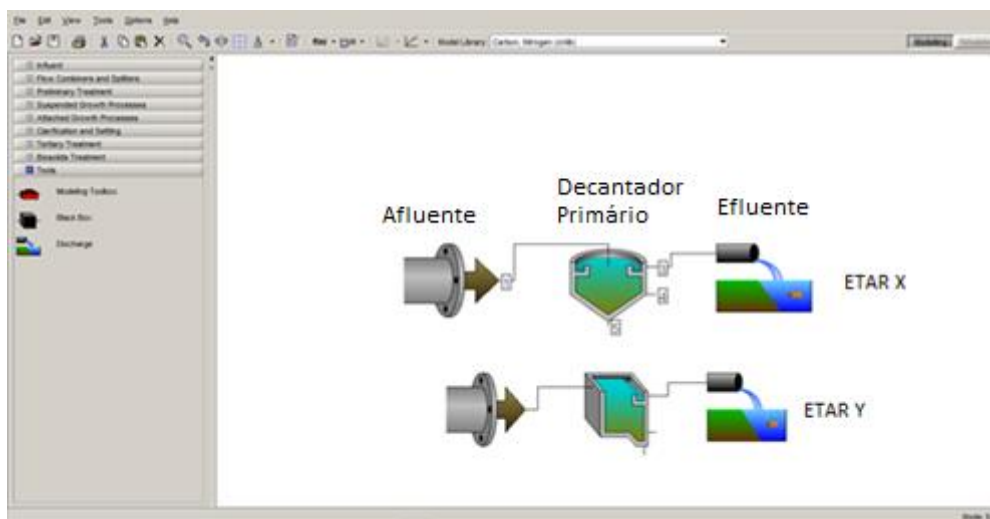


Figura 20. Esquema utilizado para realizar os testes para as ETAR X e Y

Após a escolha da biblioteca e a implementação do esquema desejado é necessário introduzir as características do afluente, através da janela “*influent advisor*”, que se apresenta na Figura 21.

A janela "Influent Advisor" apresenta a seguinte configuração de dados:

User Inputs		
Influent Composition		
cod	total COD	gCOD/m ³ 432.0
tkn	total TKN	gN/m ³ 40.0
snh	free and ionized ammonia	gN/m ³ 25.0
Dissolved Oxygen		
so	dissolved oxygen	gO ₂ /m ³ 0.0
Nitrogen Compounds		
sno	nitrate and nitrite	gN/m ³ 0.0
snn	dinitrogen	gN/m ³ 0.0
Alkalinity		
sak	alkalinity	mole/m ³ 7.0
Influent Fractions		
icv	XCOD/VSS ratio	gCOD/gVSS 1.8
fbod	BOD5/BODultimate ratio	- 0.66
ivt	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS 0.75
Organic Fractions		
frsi	soluble inert fraction of total COD	- 0.05
frsa	readily biodegradable fraction of total COD	- 0.2
frxi	particulate inert fraction of total COD	- 0.13
frxu	part. cell decay products fraction of total COD	- 0.0
frxb	heterotrophic biomass fraction of total COD	- 0.0
frxba	autotrophic biomass fraction of total COD	- 0.0
Nitrogen Fractions		
frsnh	ammonium fraction of soluble TKN	- 0.9
Manita Nutrient Fractions		
lbnh	N content of active biomass	gN/gCOD 0.068
lunh	N content of endogenous/inert mass	gN/gCOD 0.068

State Variables		
Inorganic Suspended Solids		
xii	inert inorganic suspended solids	g/m ³ 60.0
Organic Variables		
si	soluble inert organic material	gCOD/m ³ 21.6
ss	readily biodegradable substrate	gCOD/m ³ 66.4
xi	particulate inert organic material	gCOD/m ³ 56.2
xs	slowly biodegradable substrate	gCOD/m ³ 267.8
xhb	active heterotrophic biomass	gCOD/m ³ 0.0
xba	active autotrophic biomass	gCOD/m ³ 0.0
xu	unbiodegradable particulates from cell de...	gCOD/m ³ 0.0
xsto	internal cell storage product	gCOD/m ³ 0.0
Dissolved Oxygen		
so	dissolved oxygen	gO ₂ /m ³ 0.0
Nitrogen Compounds		
snh	free and ionized ammonia	gN/m ³ 25.0
snd	soluble biodegradable organic nitrogen	gN/m ³ 2.78
xnd	particulate biodegradable organic nitrogen	gN/m ³ 8.4
sno	nitrate and nitrite	gN/m ³ 0.0
snn	dinitrogen	gN/m ³ 0.0
Alkalinity		
sak	alkalinity	mole/m ³ 7.0

Composite Variables		
Volatile Fraction		
ivt	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS 0.75
Composite Variables		
x	total suspended solids	g/m ³ 240.0
vss	volatile suspended solids	g/m ³ 180.0
xiss	total inorganic suspended solids	g/m ³ 60.0
bod	total carbonaceous BOD5	gO ₂ /m ³ 233.8
cod	total COD	gCOD/m ³ 432.0
tkn	total TKN	gN/m ³ 40.0
Additional Composite Variables		
sbood	filtered carbonaceous BOD5	gO ₂ /m ³ 57.0
xbod	particulate carbonaceous BOD5	gO ₂ /m ³ 176.8
sbdou	filtered ultimate carbonaceous BOD	gO ₂ /m ³ 86.4
xbodu	particulate ultimate carbonaceous B...	gO ₂ /m ³ 267.8
bdou	total ultimate carbonaceous BOD	gO ₂ /m ³ 354.2
scod	filtered COD	gCOD/m ³ 108.0
xcod	particulate COD	gCOD/m ³ 324.0
stkn	filtered TKN	gN/m ³ 27.8
xstn	particulate TKN	gN/m ³ 12.2
tn	total nitrogen	gN/m ³ 40.0

Figura 21. Janela “*Influent Advisor*” – caracterização do afluente

A concentração de SST (parâmetro x) é obtida através de relações entre os parâmetros sólidos suspensos voláteis (SSV), que por sua vez se encontra dependente da CQO particulada (xCOD) e da CQO⁷.

⁷ Para mais informações ver manual do utilizador elaborado por Ariscrisnã (2012)

O modelo escolhido para os decantadores primários foi o “*simple1d*”, usualmente aplicado em operações de separação sólido-líquido, elas razões mencionadas no [Capítulo 5](#), conforme se mostra na Figura 22.

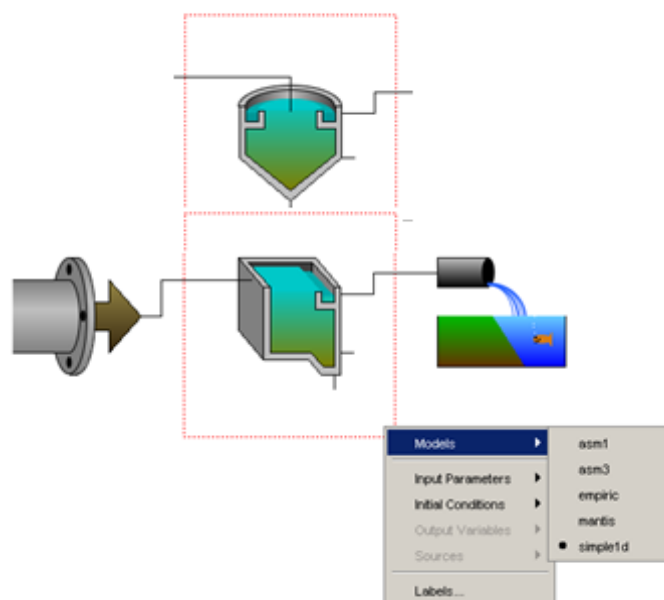


Figura 22. Escolha do modelo “*simple1d*” no decantador primário

Na Figura 23 encontram-se as características físicas do decantador circular (ETAR X), no ponto “*water depth at sidewall*”, altura do decantador junto à parede exterior cujo valor introduzido é de 3m, a este parâmetro é acrescentada a altura do descarregador. Para a aplicação do planeamento factorial, a altura do descarregador no nível baixo é de 3,05 m e no nível alto é 3,20 m. O parâmetro “*feed from bottom*” refere-se à altura de alimentação, que no nível baixo é 1 m e no alto é 3 m. O decantador rectangular (ETAR Y) caracteriza-se de forma semelhante, encontrando-se no Anexo II, Figura II.1.

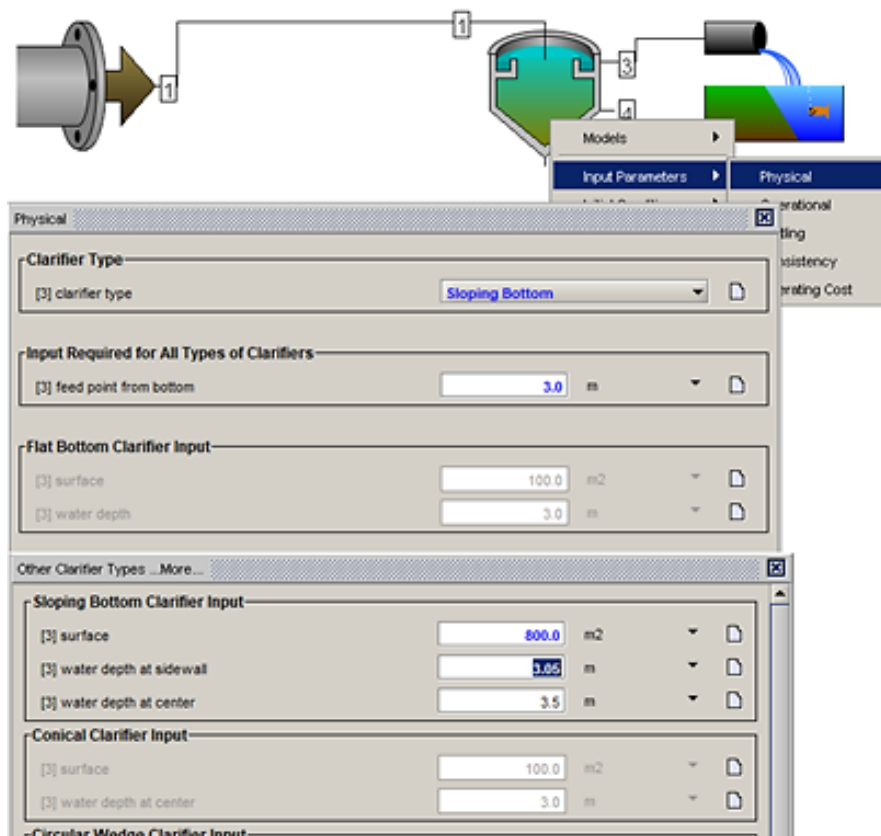


Figura 23. Características do decantador circular – ETAR X

A razão entre o Q_{lamas} e o Q_{eflu} é estabelecida nas condições operacionais do decantador (Figura 24), correspondendo às correntes 5 e 3, respectivamente. No Anexo II, Figura II.2. encontram-se as condições utilizadas para a ETAR Y.

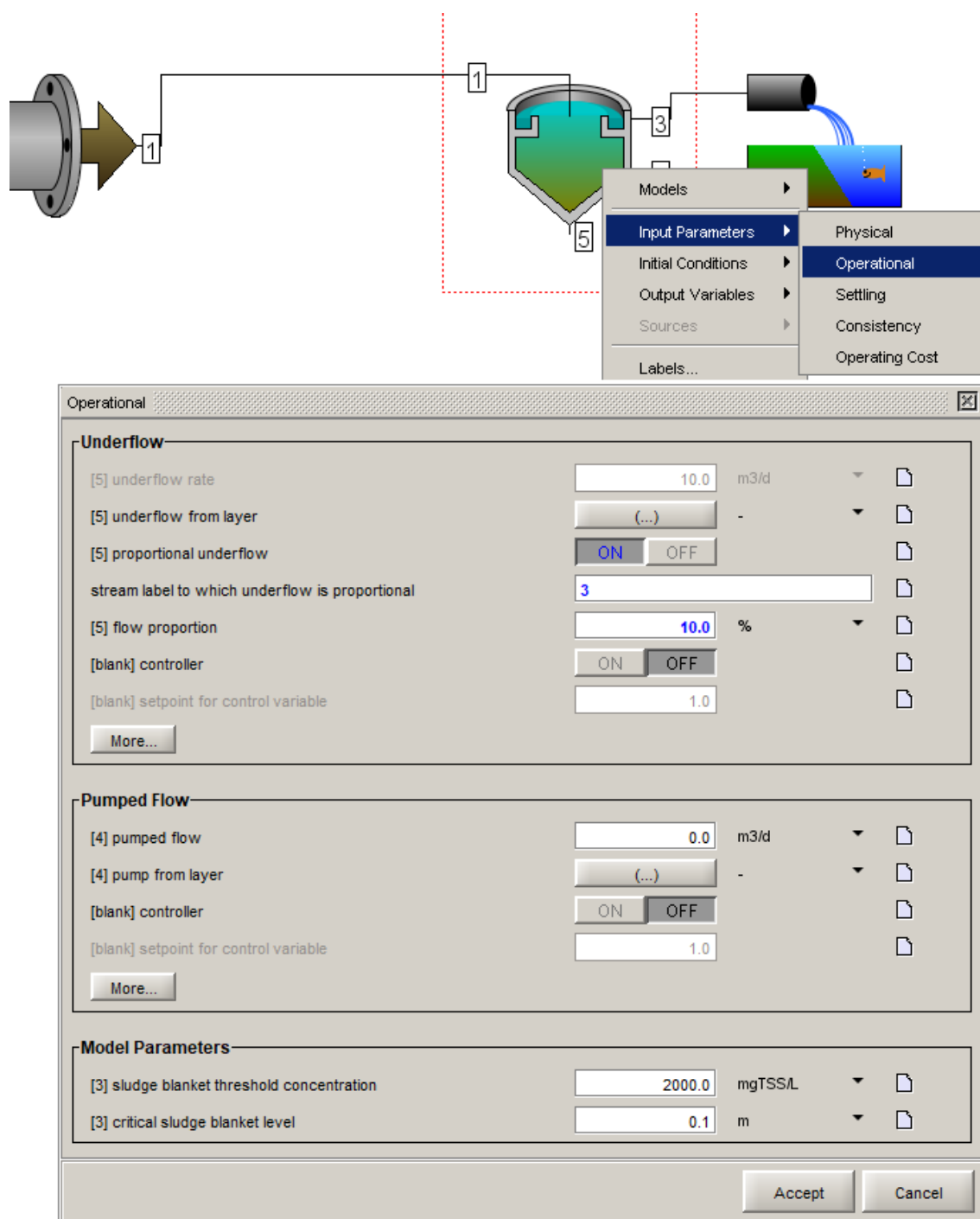


Figura 24. Condições operacionais do decantador primário – ETAR X

Após a construção do esquema e introdução dos parâmetros, clicando no botão “Simulation”, entra-se no ambiente de simulação (Figura 25), onde é possível alterar os “inputs”, que correspondem aos parâmetros de entrada e controlo, e também os níveis de funcionamento das variáveis em estudo. Para cada combinação de níveis é possível adicionar o “quick display”, de forma a obter os “outputs”, que correspondem à variável de resposta. No Anexo II, Figuras II.3, II.4 e II.5 encontram-se o ambiente de simulação para a ETAR Y e um exemplo do ficheiro excel obtido para um teste de cada ETAR.

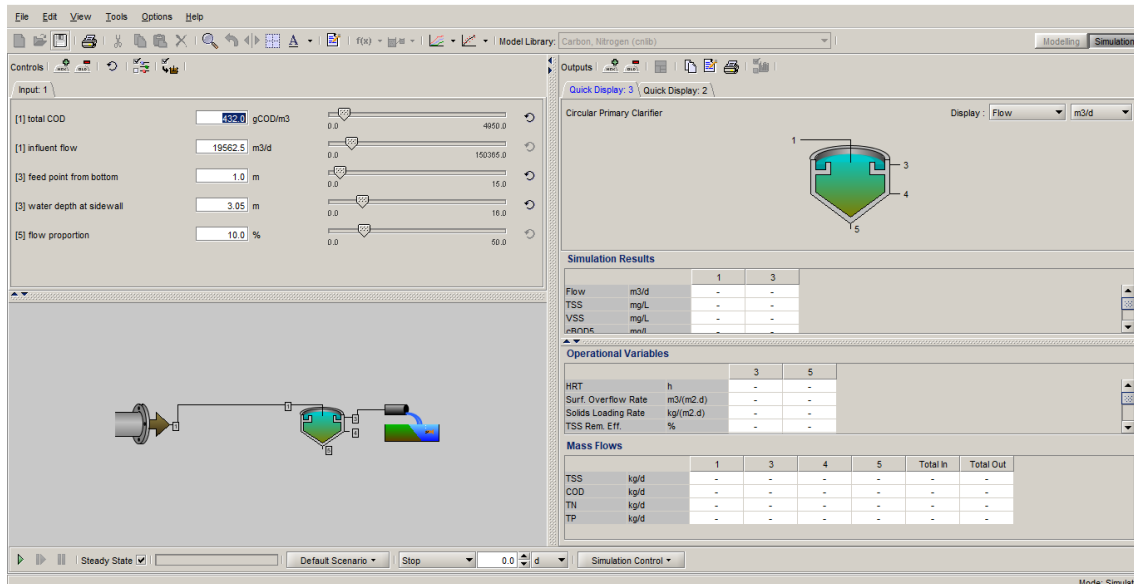


Figura 25. Ambiente de simulação, com parâmetros adicionados na janela de controlo e “quick display” do decantador circular – ETAR X

Os testes em GPS-X são realizados sem replicação uma vez que as respostas são obtidas por simulação. Da mesma forma, não há necessidade de realizar as experiências por ordem aleatória, sendo realizadas pela ordem padrão. Deste modo, foram realizados 32 testes para cada ETAR. As Tabelas 16 e 17 apresentam os valores simulados de acordo com o planeamento factorial para as ETAR X e Y, respectivamente.

Tabela 16. Planeamento factorial 2^5 factores com níveis codificados, de funcionamento e resposta – ETAR X

Teste n.º	Nível codificado					Nível de funcionamento					Resposta
	A	B	C	D	E	Q_{aflu} (m ³ /d)	$[SST]_{\text{aflu}}$ (mg/L)	H_{alim} (m)	$H_{\text{dec+des}}$ (m)	Razão $Q_{\text{lamas}}/Q_{\text{eflu}}$	Eficiência remoção SST (%)
1	-1	-1	-1	-1	-1	19.563	240	1	3,05	10	77,44
2	+1	-1	-1	-1	-1	30.073	240	1	3,05	10	68,45
3	-1	+1	-1	-1	-1	19.563	550	1	3,05	10	89,61
4	+1	+1	-1	-1	-1	30.073	550	1	3,05	10	85,08
5	-1	-1	+1	-1	-1	19.563	240	3	3,05	10	59,45
6	+1	-1	+1	-1	-1	30.073	240	3	3,05	10	50,59
7	-1	+1	+1	-1	-1	19.563	550	3	3,05	10	74,58
8	+1	+1	+1	-1	-1	30.073	550	3	3,05	10	67,47
9	-1	-1	-1	+1	-1	19.563	240	1	3,20	10	77,52
10	+1	-1	-1	+1	-1	30.073	240	1	3,20	10	68,61
11	-1	+1	-1	+1	-1	19.563	550	1	3,20	10	89,64
12	+1	+1	-1	+1	-1	30.073	550	1	3,20	10	85,14
13	-1	-1	+1	+1	-1	19.563	240	3	3,20	10	59,45
14	+1	-1	+1	+1	-1	30.073	240	3	3,20	10	50,59
15	-1	+1	+1	+1	-1	19.563	550	3	3,20	10	74,58
16	+1	+1	+1	+1	-1	30.073	550	3	3,20	10	67,47

Tabela 16 (cont.). Planeamento factorial 2^5 factores com níveis codificados, de funcionamento e resposta – ETAR X

Teste n.º	Nível codificado					Nível de funcionamento					Resposta
	A	B	C	D	E	Q _{aflu} (m ³ /d)	[SST] _{aflu} (mg/L)	H _{alim} (m)	H _{dec+des} (m)	Razão Q _{lamas} /Q _{eflu}	Eficiência remoção SST (%)
17	-1	-1	-1	-1	+1	19.563	240	1	3,05	40	81,06
18	+1	-1	-1	-1	+1	30.073	240	1	3,05	40	73,80
19	-1	+1	-1	-1	+1	19.563	550	1	3,05	40	91,34
20	+1	+1	-1	-1	+1	30.073	550	1	3,05	40	87,80
21	-1	-1	+1	-1	+1	19.563	240	3	3,05	40	81,02
22	+1	-1	+1	-1	+1	30.073	240	3	3,05	40	54,04
23	-1	+1	+1	-1	+1	19.563	550	3	3,05	40	76,74
24	+1	+1	+1	-1	+1	30.073	550	3	3,05	40	73,20
25	-1	-1	-1	+1	+1	19.563	240	1	3,20	40	81,07
26	+1	-1	-1	+1	+1	30.073	240	1	3,20	40	73,90
27	-1	+1	-1	+1	+1	19.563	550	1	3,20	40	91,36
28	+1	+1	-1	+1	+1	30.073	550	1	3,20	40	87,83
29	-1	-1	+1	+1	+1	19.563	240	3	3,20	40	62,42
30	+1	-1	+1	+1	+1	30.073	240	3	3,20	40	54,04
31	-1	+1	+1	+1	+1	19.563	550	3	3,20	40	76,74
32	+1	+1	+1	+1	+1	30.073	550	3	3,20	40	73,20

Tabela 17. Planeamento factorial 2⁵ factores com níveis codificados, de funcionamento e resposta – ETAR Y

Teste n.º	Nível codificado					Nível de funcionamento					Resposta
	A	B	C	D	E	Q _{aflu} (m ³ /d)	[SST] _{aflu} (mg/L)	H _{alim} (m)	H _{dec+des} (m)	Razão Q _{lamas} /Q _{eflu}	Eficiência remoção SST (%)
1	-1	-1	-1	-1	-1	7.292	51	1	3,05	10	16,28
2	+1	-1	-1	-1	-1	12.923	51	1	3,05	10	9,19
3	-1	+1	-1	-1	-1	7.292	670	1	3,05	10	87,95
4	+1	+1	-1	-1	-1	12.923	670	1	3,05	10	79,52
5	-1	-1	+1	-1	-1	7.292	51	3	3,05	10	15,54
6	+1	-1	+1	-1	-1	12.923	51	3	3,05	10	9,06
7	-1	+1	+1	-1	-1	7.292	670	3	3,05	10	78,65
8	+1	+1	+1	-1	-1	12.923	670	3	3,05	10	67,96
9	-1	-1	-1	+1	-1	7.292	51	1	3,20	10	16,34
10	+1	-1	-1	+1	-1	12.923	51	1	3,20	10	9,19
11	-1	+1	-1	+1	-1	7.292	670	1	3,20	10	87,95
12	+1	+1	-1	+1	-1	12.923	670	1	3,20	10	79,52
13	-1	-1	+1	+1	-1	7.292	51	3	3,20	10	15,54
14	+1	-1	+1	+1	-1	12.923	51	3	3,20	10	9,07
15	-1	+1	+1	+1	-1	7.292	670	3	3,20	10	78,65
16	+1	+1	+1	+1	-1	12.923	670	3	3,20	10	67,96

Tabela 17 (cont.). Planeamento factorial 2^5 factores com níveis codificados, de funcionamento e resposta – ETAR Y

Teste n.º	Nível codificado					Nível de funcionamento					Resposta simulada
	A	B	C	D	E	Q _{aflu} (m ³ /d)	[SST] _{aflu} (mg/L)	H _{alim} (m)	H _{dec+des} (m)	Razão Q _{lamas} /Q _{eflu}	Eficiência remoção SST (%)
17	-1	-1	-1	-1	+1	7.292	51	1	3,05	40	20,66
18	+1	-1	-1	-1	+1	12.923	51	1	3,05	40	11,69
19	-1	+1	-1	-1	+1	7.292	670	1	3,05	40	90,15
20	+1	+1	-1	-1	+1	12.923	670	1	3,05	40	83,61
21	-1	-1	+1	-1	+1	7.292	51	3	3,05	40	18,91
22	+1	-1	+1	-1	+1	12.923	51	3	3,05	40	11,34
23	-1	+1	+1	-1	+1	7.292	670	3	3,05	40	81,43
24	+1	+1	+1	-1	+1	12.923	670	3	3,05	40	72,10
25	-1	-1	-1	+1	+1	7.292	51	1	3,20	40	20,66
26	+1	-1	-1	+1	+1	12.923	51	1	3,20	40	11,69
27	-1	+1	-1	+1	+1	7.292	670	1	3,20	40	90,15
28	+1	+1	-1	+1	+1	12.923	670	1	3,20	40	83,60
29	-1	-1	+1	+1	+1	7.292	51	3	3,20	40	18,91
30	+1	-1	+1	+1	+1	12.923	51	3	3,20	40	11,34
31	-1	+1	+1	+1	+1	7.292	670	3	3,20	40	81,43
32	+1	+1	+1	+1	+1	12.923	670	3	3,20	40	72,10

7.2.3. Efeitos dos factores e interacções

Para avaliar a existência de alteração na eficiência de remoção de SST (%) quando ocorre uma mudança no nível das variáveis independentes, determinou-se os efeitos dos factores e interacções (Tabela 18), para cada ETAR, de acordo com a equação 8 e procedeu-se à representação gráfica dos efeitos principais e das interacções de 2 factores. Os gráficos dos efeitos para as ETAR X e Y encontram-se nos ANEXOS III e IV, respectivamente.

Tabela 18. Contrastes e efeitos para os factores principais e interacções para as ETAR X e Y

Factor ou Interacção	ETAR X		ETAR Y	
	Contraste	Efeito	Contraste	Efeito
A	-128,81	-8,05	-130,26	-8,14
B	212,33	13,27	1057,32	66,08
C	-260,07	-16,25	-88,16	-5,51
D	-18,11	-1,13	0,06	0,00
E	67,89	4,24	51,40	3,21
AB	42,01	2,63	-9,72	-0,61
AC	-31,95	-2,00	-6,00	-0,38
BC	0,43	0,03	-76,18	-4,76
AD	18,81	1,18	-0,06	0,00
BD	18,39	1,15	-0,08	0,00
CD	-19,09	-1,19	-0,04	0,00
AE	-11,07	-0,69	0,60	0,04
BE	-30,61	-1,91	1,42	0,09
CE	14,55	0,91	-1,14	-0,07
DE	-18,77	-1,17	-0,08	-0,01
ABC	9,55	0,60	-14,18	-0,89
ABD	-18,73	-1,17	0,04	0,00
ACD	18,39	1,15	0,08	0,01
BCD	18,81	1,18	0,06	0,00
ABE	17,27	1,08	12,38	0,77
ACE	-21,93	-1,37	0,46	0,03
BCE	-12,71	-0,79	3,68	0,23
ADE	18,59	1,16	0,04	0,00
BDE	18,69	1,17	0,06	0,00
CDE	-18,43	-1,15	0,06	0,00
ABCD	-18,47	-1,15	-0,06	0,00

Tabela 18 (cont.). Contrastes e efeitos para os factores principais e interacções para as ETAR X e Y

Factor ou Interacção	ETAR X		ETAR Y	
	Contraste	Efeito	Contraste	Efeito
ABCE	20,29	1,27	-2,56	-0,16
ABDE	-18,63	-1,16	-0,06	0,00
ACDE	18,61	1,16	-0,06	0,00
BCDE	18,51	1,16	-0,04	0,00
ABCDE	-18,57	-1,16	0,08	0,01

Por análise da Tabela 18 verifica-se a existência de efeitos positivos e negativos. Para os efeitos negativos é melhor trabalhar com o respectivo factor no seu nível baixo, uma vez que a variável de resposta (i.e. eficiência de remoção de SST) é uma característica do tipo quanto maior melhor. No entanto é necessário efectuar um teste estatístico para testar quais os efeitos com maior peso na resposta.

7.2.4. ANOVA

De modo a avaliar estatisticamente quais as variáveis que mais influenciam a eficiência de remoção de SST (%) recorre-se ao teste ANOVA. Uma vez que o procedimento foi efectuado sem replicação, não existem graus de liberdade para poder efectuar uma estimativa do erro aleatório. De forma a estimar o erro utiliza-se a representação gráfica seminormal dos efeitos para as ETAR X e Y, Figura 26 e 27, respectivamente. Este método foi desenvolvido por Cuthbert Daniel (Daniel 1959) e baseia-se na distribuição normal dos efeitos. Os efeitos que se destacam pelas suas magnitudes não podem ser explicados com base no erro aleatório. Desta forma é possível efectuar uma estimativa do erro em que todos os efeitos pequenos vão seguir aproximadamente uma linha recta junto ao canto inferior esquerdo da figura, correspondendo à variação residual, i.e. distribuição normal dos erros (Wu & Hamada 2000).

Na Figura 26 encontra-se a distribuição dos efeitos em valor absoluto dos factores e interacções para a ETAR X. Pode-se afirmar que todas as interacções bem como o factor D seguem aproximadamente uma distribuição normal, e são agregadas para obter uma aproximação do valor do erro.

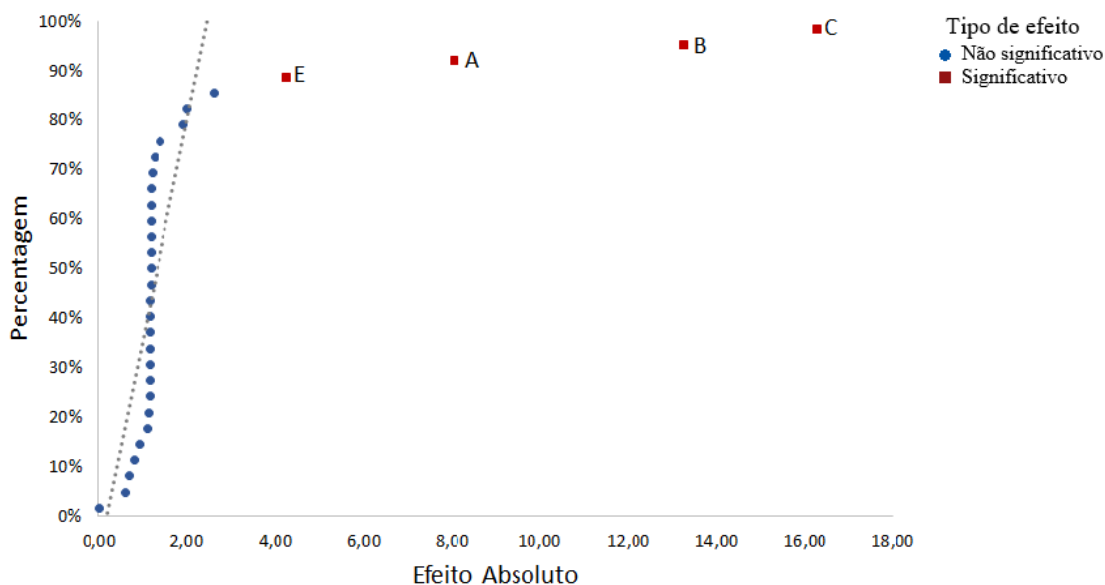


Figura 26. Representação seminormal dos efeitos –ETAR X

É efectuado o teste ANOVA, Tabela 19, considerando um total de 27 graus de liberdade para a estimativa do erro. Utilizando um nível de significância de 0,05, verifica-se o $F_{\text{crítico}}(0,05;1;27) \approx 4,20$ que é inferior ao $F_{\text{calculado}}$ para os vários factores. Desta forma rejeita-se a hipótese nula (H_0), de acordo com o Capítulo 6.3.1., concluindo-se que os factores apresentam significância estatística.

Tabela 19. Análise de Variância (ANOVA) aos factores considerados relevantes – ETAR X

Factor/Interacção	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Desvio quadrático médio	$F_{\text{calculado}}$
A	1	518,5	518,5	40,59
B	1	1.408,9	1.408,88	110,29
C	1	2.113,6	2.113,64	165,46
E	1	144,0	144,03	11,28
Erro	27	344,9	12,77	
Total	31	4.529,9		

Na Figura 27, estão representados os efeitos dos factores e interacções respeitantes à ETAR Y, onde se observa que o factor B é o que mais se afasta do comportamento normal, seguido dos factores A, C e E e a interacção BC.

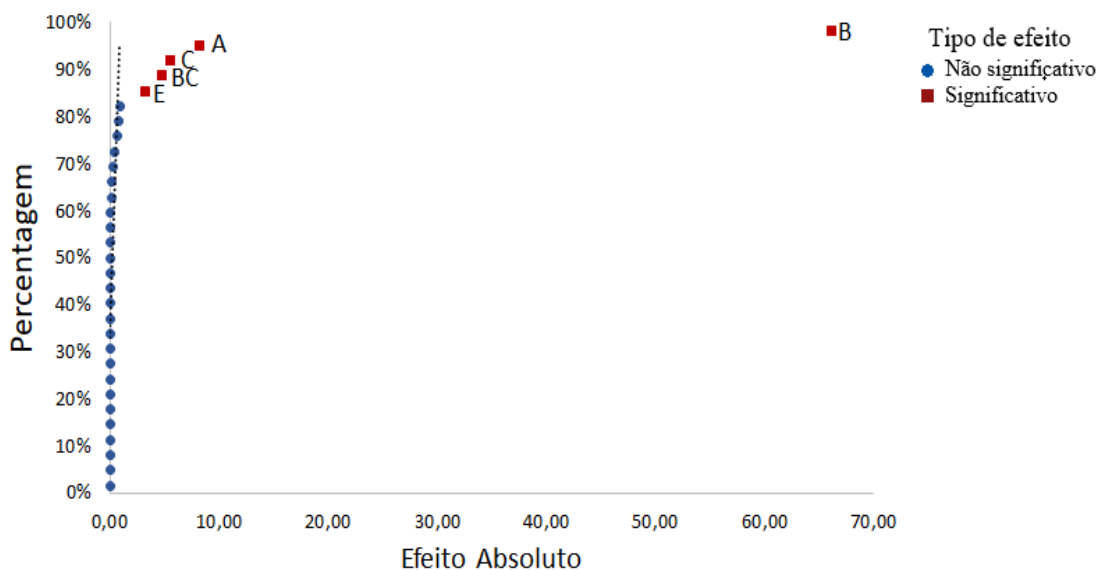


Figura 27. Representação seminormal dos efeitos –ETAR Y

Os factores mencionados foram sujeitos ao teste ANOVA (Tabela 20), para um nível de significância de 0,05, apresentando um $F_{\text{crítico}}(0,05;1;26) \approx 4,23$ que é inferior ao $F_{\text{calculado}}$ para os termos, podendo-se concluir que estes factores apresentam elevada significância estatística.

Tabela 20. Análise de Variância (ANOVA) aos factores considerados relevantes – ETAR Y

Factor/Interacção	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Desvio quadrático médio	$F_{\text{calculado}}$
A	1	530,2	530,2	866,96
B	1	34.935,2	34.935,2	57.120,01
C	1	242,9	242,9	397,12
E	1	82,6	82,6	134,99
BC	1	181,4	181,4	296,52
Erro	26	15,9	0,6	
Total	31	35.988,1		

7.2.5. Modelo de regressão

Os factores e/ou interacções consideradas significativas permitem construir um modelo que represente a eficiência de remoção de SST (%), para as ETAR X e Y, conforme as equações 11 e 12, respectivamente.

$$\text{Ef. rem. de SST (\%)} = 73,726 - 4,025A + 6,635B - 8,127C + 2,122E \quad (11)$$

$$\text{Ef. rem. SST (\%)} = 47,129 - 4,071A + 33,041B - 2,755C + 1,606E - 2,381BC \quad (12)$$

7.2.6. Verificação dos pressupostos da ANOVA

Os modelos de regressão (equações 11 e 12) foram utilizados para obter a eficiência de remoção de SST (%) prevista e o valor dos resíduos de cada observação, cujos resultados se encontram nas Tabelas 21 e 22 para as ETAR X e Y, respectivamente. Estes permitem verificar os pressupostos da ANOVA, conforme descrito no [Capítulo 6.3.3.](#)

Tabela 21. Valores simulados e previstos através do modelo de regressão – ETAR X

Teste	Nível da variável codificada					Eficiência de remoção de SST (%)		Resíduo
	A	B	C	D	E	Simulada	Prevista	
1	-1	-1	-1	-1	-1	77,44	77,12	0,32
2	1	-1	-1	-1	-1	68,45	69,07	-0,62
3	-1	1	-1	-1	-1	89,61	90,39	-0,78
4	1	1	-1	-1	-1	85,08	82,34	2,74
5	-1	-1	1	-1	-1	59,45	60,87	-1,42
6	1	-1	1	-1	-1	50,59	52,82	-2,23
7	-1	1	1	-1	-1	74,58	74,14	0,44
8	1	1	1	-1	-1	67,47	66,09	1,38
9	-1	-1	-1	1	-1	77,52	77,12	0,40
10	1	-1	-1	1	-1	68,61	69,07	-0,46
11	-1	1	-1	1	-1	89,64	90,39	-0,75
12	1	1	-1	1	-1	85,14	82,34	2,80
13	-1	-1	1	1	-1	59,45	60,87	-1,42
14	1	-1	1	1	-1	50,59	52,82	-2,23
15	-1	1	1	1	-1	74,58	74,14	0,44
16	1	1	1	1	-1	67,47	66,09	1,38
17	-1	-1	-1	-1	1	81,06	81,36	-0,30
18	1	-1	-1	-1	1	73,80	73,31	0,48
19	-1	1	-1	-1	1	91,34	94,64	-3,30
20	1	1	-1	-1	1	87,80	86,58	1,22
21	-1	-1	1	-1	1	81,02	65,11	15,91

Tabela 21 (cont.). Valores simulados e previstos através do modelo de regressão – ETAR X

Teste	Nível da variável codificada					Eficiência de remoção de SST (%)		Resíduo
	A	B	C	D	E	Simulada	Prevista	
22	1	-1	1	-1	1	54,04	57,06	-3,02
23	-1	1	1	-1	1	76,74	78,38	-1,64
24	1	1	1	-1	1	73,20	70,33	-0,13
25	-1	-1	-1	1	1	81,07	81,36	-0,30
26	1	-1	-1	1	1	73,90	73,31	0,59
27	-1	1	-1	1	1	91,36	94,64	-3,28
28	1	1	-1	1	1	87,83	86,58	1,25
29	-1	-1	1	1	1	62,42	65,11	-2,69
30	1	-1	1	1	1	54,04	57,06	-3,02
31	-1	1	1	1	1	76,74	78,38	-1,64
32	1	1	1	1	1	73,20	70,33	-0,13
							Total	0,00

Tabela 22. Valores simulados e previstos através do modelo de regressão – ETAR Y

Teste	Nível da variável codificada					Eficiência de remoção de SST (%)		Resíduo
	A	B	C	D	E	Simulada	Prevista	
1	-1	-1	-1	-1	-1	16,28	16,93	0,14
2	1	-1	-1	-1	-1	9,19	8,79	0,03
3	-1	1	-1	-1	-1	87,95	87,77	-0,98
4	1	1	-1	-1	-1	79,52	79,63	-0,09
5	-1	-1	1	-1	-1	15,54	16,18	-0,13
6	1	-1	1	-1	-1	9,06	8,04	-0,02
7	-1	1	1	-1	-1	78,65	77,50	0,98
8	1	1	1	-1	-1	67,96	69,36	0,09
9	-1	-1	-1	1	-1	16,34	16,93	0,11
10	1	-1	-1	1	-1	9,19	8,79	0,03
11	-1	1	-1	1	-1	87,95	87,77	-0,98
12	1	1	-1	1	-1	79,52	79,63	-0,09
13	-1	-1	1	1	-1	15,54	16,18	-0,13

Tabela 22 (cont.) Valores simulados e previstos através do modelo de regressão – ETAR Y

Teste	Nível da variável codificada					Eficiência de remoção de SST (%)		Resíduo
	A	B	C	D	E	Simulada	Prevista	
14	1	-1	1	1	-1	9,07	8,04	-0,03
15	-1	1	1	1	-1	78,65	77,50	0,98
16	1	1	1	1	-1	67,96	69,36	0,09
17	-1	-1	-1	-1	1	20,66	20,14	-0,13
18	1	-1	-1	-1	1	11,69	12,00	-0,03
19	-1	1	-1	-1	1	90,15	90,98	0,98
20	1	1	-1	-1	1	83,61	82,84	0,09
21	-1	-1	1	-1	1	18,91	19,39	0,13
22	1	-1	1	-1	1	11,34	11,25	0,03
23	-1	1	1	-1	1	81,43	80,71	-0,98
24	1	1	1	-1	1	72,10	72,57	-0,09
25	-1	-1	-1	1	1	20,66	20,14	-0,13
26	1	-1	-1	1	1	11,69	12,00	-0,03
27	-1	1	-1	1	1	90,15	90,98	0,98
28	1	1	-1	1	1	83,60	82,84	0,09
29	-1	-1	1	1	1	18,91	19,39	0,13
30	1	-1	1	1	1	11,34	11,25	0,03
31	-1	1	1	1	1	81,43	80,71	-0,98
32	1	1	1	1	1	72,10	72,57	-0,09
							Total	0,00

➤ *Normalidade da distribuição dos resíduos*

A normalidade dos resíduos é avaliada através de um gráfico de distribuição normal. Nas Figuras 28 e 29 apresenta-se a distribuição para os resíduos da ETAR X e Y, respectivamente. Nestas figuras existem três linhas, a central representa a média das observações e as linhas exteriores os limites do desvio padrão.

Na Figura 28 verifica-se que os resíduos referentes às observações da ETAR X, são normalmente distribuídos, uma vez que o valor para o teste Anderson-Darling (0,307) é superior ao nível de significância escolhido (0,05), com média de -0,51 e desvio padrão de 1,67.

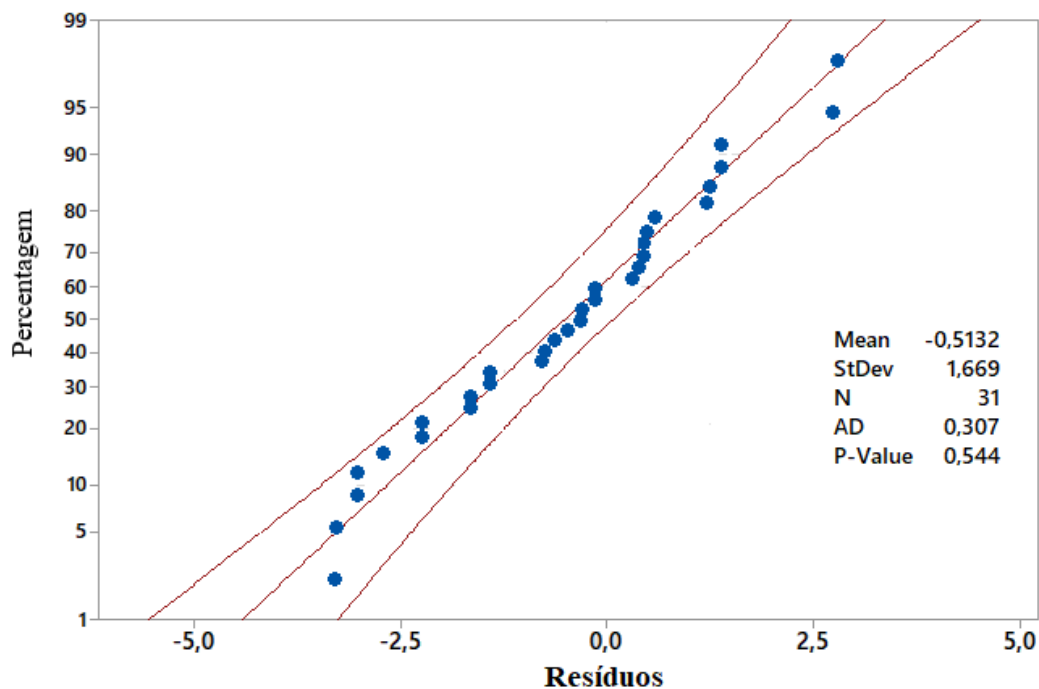


Figura 28. Distribuição normal dos resíduos – ETAR X

Pela mesma razão, os resíduos referentes às observações da ETAR Y são normalmente distribuídos, como apresentado na Figura 29, exibindo uma média aproximadamente igual a 0 e desvio padrão de 0,50.

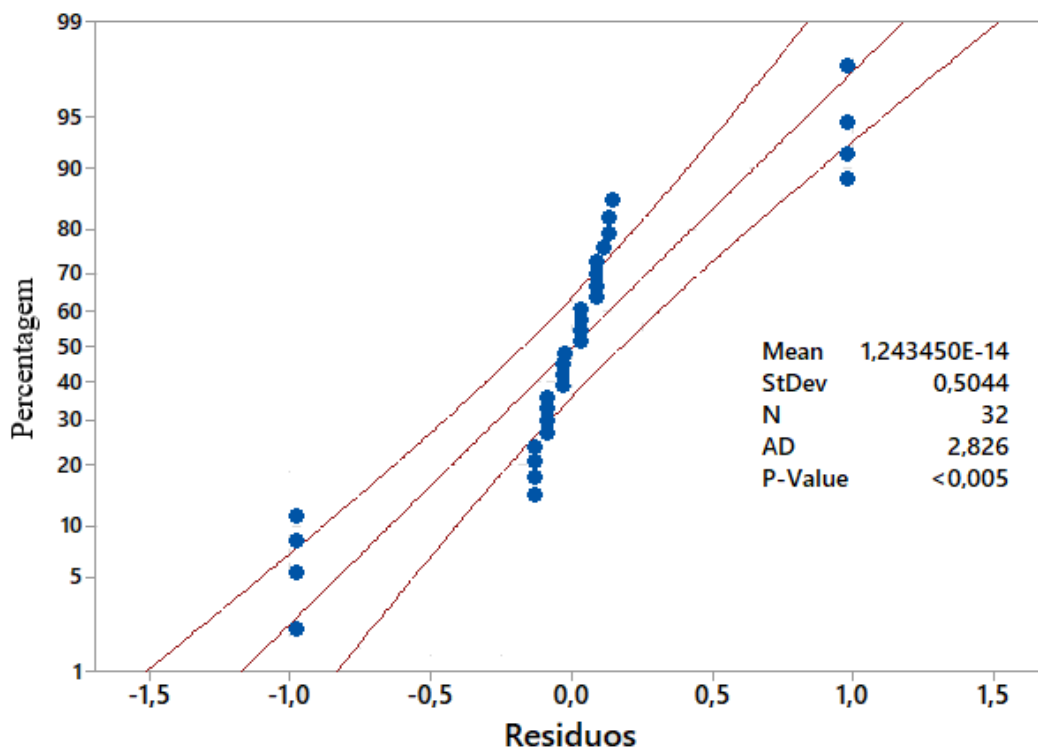


Figura 29. Distribuição normal dos resíduos – ETAR Y

➤ *Homocedasticidade dos resíduos*

Nas Figuras 30 e 31 pode-se afirmar que os resíduos de ambas as ETAR apresentam variâncias constantes uma vez que não existem estruturas especiais nas distribuições.

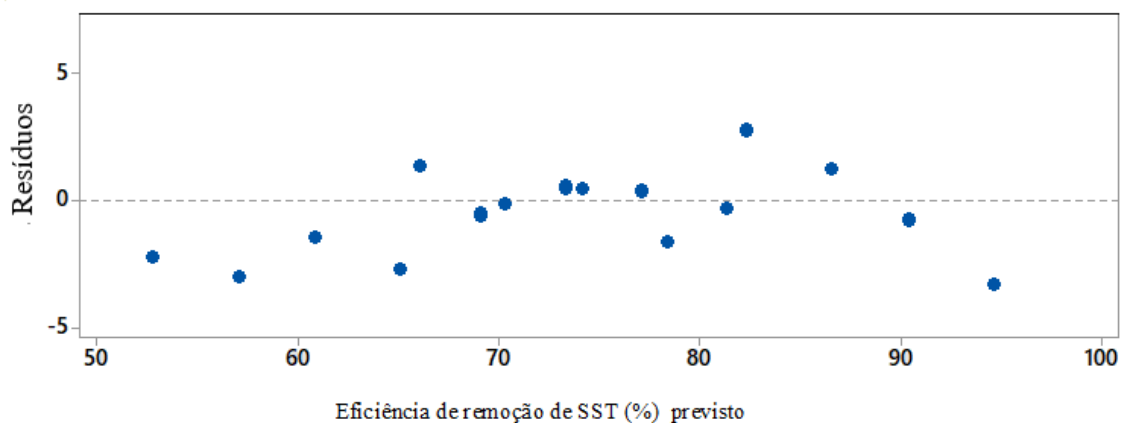


Figura 30. Distribuição dos resíduos em função da eficiência de remoção de SST (%) prevista – ETAR X

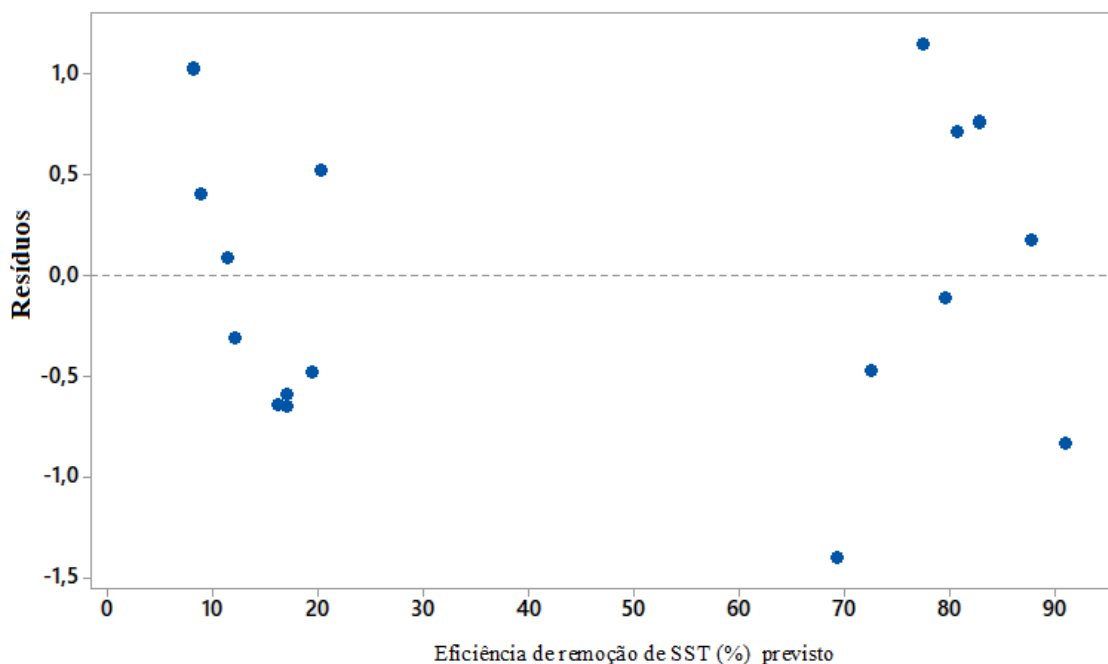


Figura 31. Distribuição dos resíduos em função da eficiência de remoção de SST (%) prevista – ETAR Y

➤ *Independência dos resíduos*

Por observação da Figura 32 pode-se afirmar que os resíduos para a ETAR X não apresentam nenhuma estrutura especial, podendo-se afirmar que são independentes.

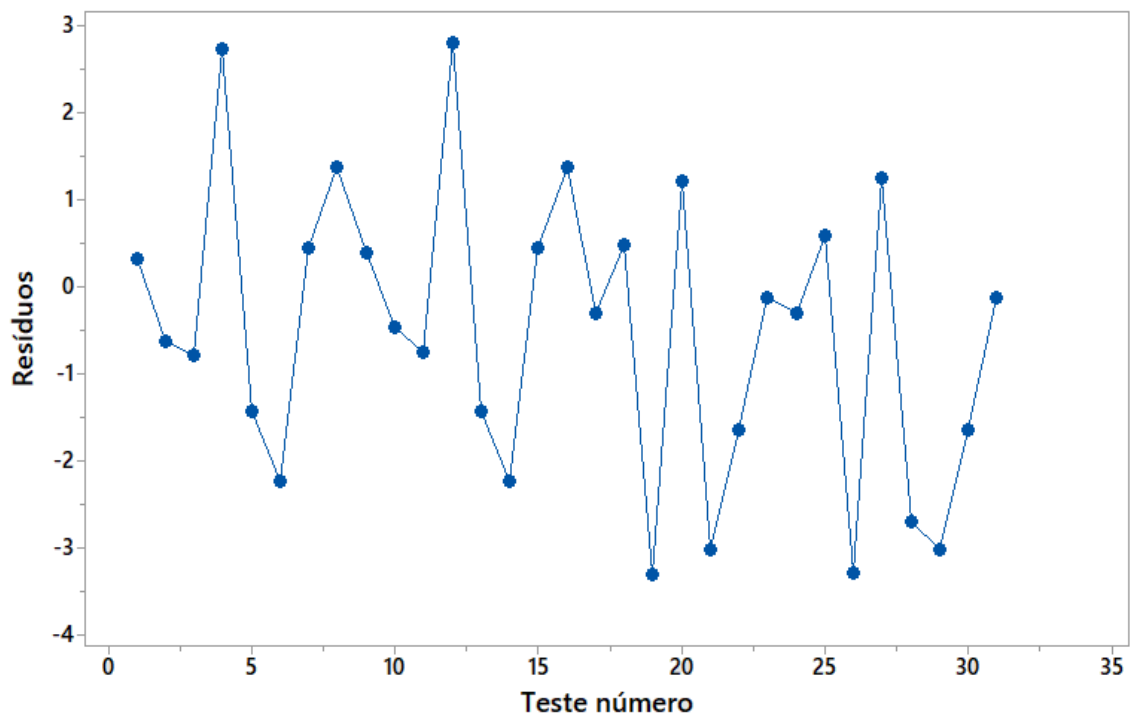


Figura 32. Distribuição dos resíduos em função da ordem de experimentação – ETAR X

Na Figura 33, pode-se observar duas tendências em particular, uma até ao teste número 16 e a outra depois, indicando a existência de correlação entre os resíduos.

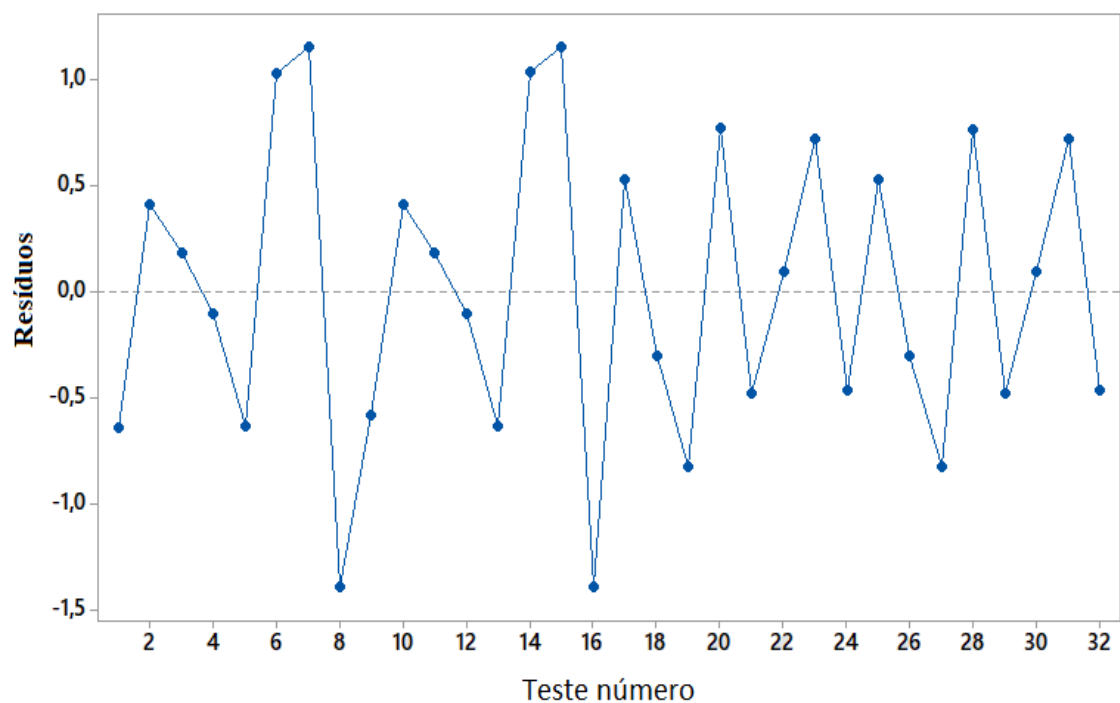


Figura 33. Distribuição dos resíduos em função da ordem de experimentação – ETAR Y

7.2.7. Avaliação do modelo

➤ *Avaliação do ajuste dos valores simulados e previstos pelo modelo ETAR X e Y*

A relação entre os valores simulados e os previstos permite avaliar o ajuste do modelo, esta é apresentada nas Figuras 34 e 35 para as ETAR X e Y, respectivamente. O coeficiente de determinação múltipla, R^2 , para a ETAR X mostra que o modelo consegue explicar, aproximadamente, 98 % da variação total no sistema, e o da ETAR Y cerca de 99 %.

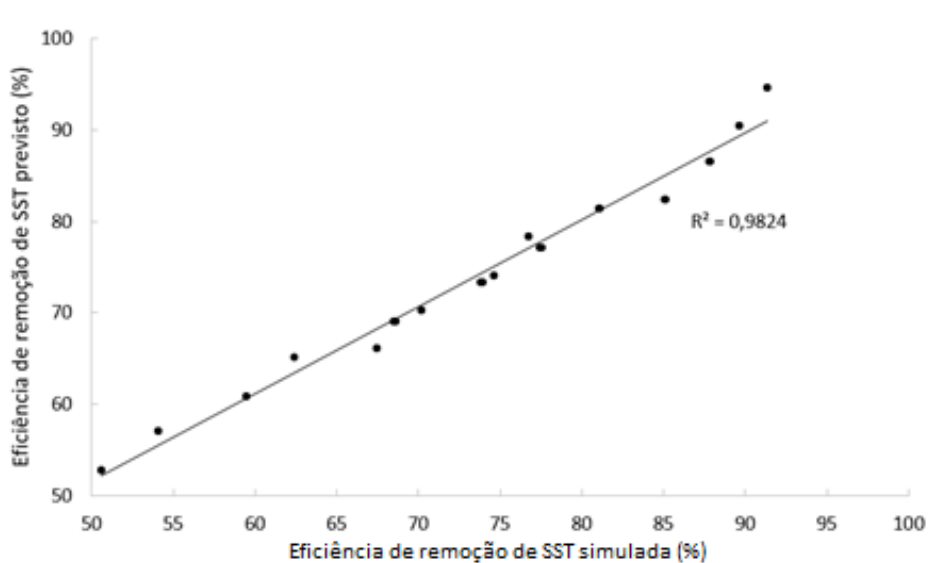


Figura 34. Relação entre a eficiência de remoção de SST (%) prevista através do modelo e simulada nos testes – ETAR X

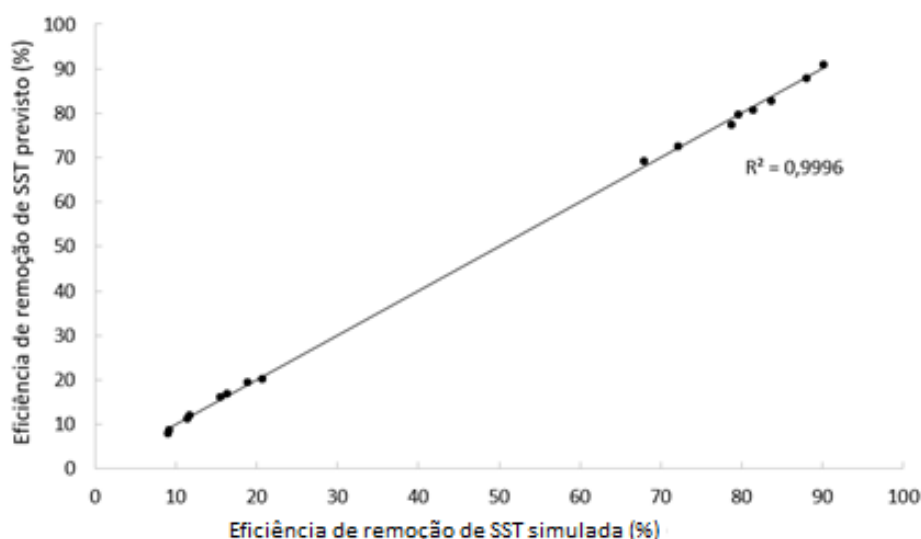


Figura 35. Relação entre a eficiência de remoção de SST (%) prevista através do modelo e simulada nos testes – ETAR Y

➤ **Contribuição líquida**

A contribuição líquida permite verificar quais os factores que têm maior impacto nos modelos, sendo calculados pela equação 13, e apresentados nas Tabelas 23 e 24 para as ETAR X e Y, respectivamente.

$$\text{Contribuição líquida factor } x = \frac{SS_x - (g.l.)_x \times (DQM)_{\text{erro}}}{SS_t} \times 100 \quad (13)$$

Tabela 23. Contribuição líquida dos factores ETAR X

Factor/Interacção	Contribuição Líquida (%)
A	11,17
B	32,77
C	49,32
E	3,11

O factor C, altura de alimentação (m), explica cerca de 50% da variação associada ao modelo da ETAR X, sendo o factor E, o que menos contribui para a eficiência de remoção de SST.

Tabela 24. Contribuição líquida dos factores ETAR Y

Factor/Interacção	Contribuição Líquida (%)
A	1,47
B	97,07
C	0,67
E	0,23
BC	0,50

Pela contribuição líquida dos factores do modelo pode-se verificar que a variação existente para a ETAR Y é explicada maioritariamente pelo factor B, $[SST]_{\text{afluente}}$. Desta forma, foram estudadas separadamente as 2 zonas de eficiência observáveis na Figura 35, construindo assim dois modelos.

➤ **Modelo para ETAR Y com factor B fixo**

Para a construção e avaliação dos modelos para a ETAR Y com o factor B fixo seguiu-se a abordagem anterior. Assim determinam-se os contrastes e os efeitos para o caso do planeamento factorial com o factor B fixo no nível baixo e no nível alto, sendo os resultados apresentados na Tabela 25. As representações gráficas dos efeitos dos factores e das interacções para o factor B fixo nos níveis baixo e alto encontram-se nos ANEXO V e VI, respectivamente.

Tabela 25. Contrastes e efeitos para os factores principais e interacções para o planeamento com o factor B fixo no nível baixo e no nível alto

Factor/ Interacção	Factor B fixo no nível baixo		Factor B fixo no nível alto	
	Contraste	Efeito	Contraste	Efeito
A	-60,27	-7,53	-69,99	-8,75
C	-5,99	-0,75	-82,17	-10,27
D	0,07	0,01	-0,01	0,00
E	24,99	3,12	26,41	3,30
AC	4,09	0,51	-10,09	-1,26
AD	-3,05	-0,01	-0,01	0,00
CD	-3,05	-0,01	0,01	0,00
AE	-5,89	-0,74	6,49	0,81
CE	-2,41	-0,30	1,27	0,16
DE	-0,07	-0,01	-0,01	0,00
ACD	0,07	0,01	0,01	0,00
ACE	1,51	0,19	-1,05	-0,13
ADE	3,05	0,01	-0,01	0,00
CDE	3,05	0,01	0,01	0,00
ACDE	-0,07	-0,01	0,01	0,00

As Figuras 36 e 37, representam os efeitos dos factores para o planeamento com o factor B fixo nos níveis baixo e alto, respectivamente. É possível observar que os factores A, E e C e as interacções AE e AC são os que se desviam da distribuição normal

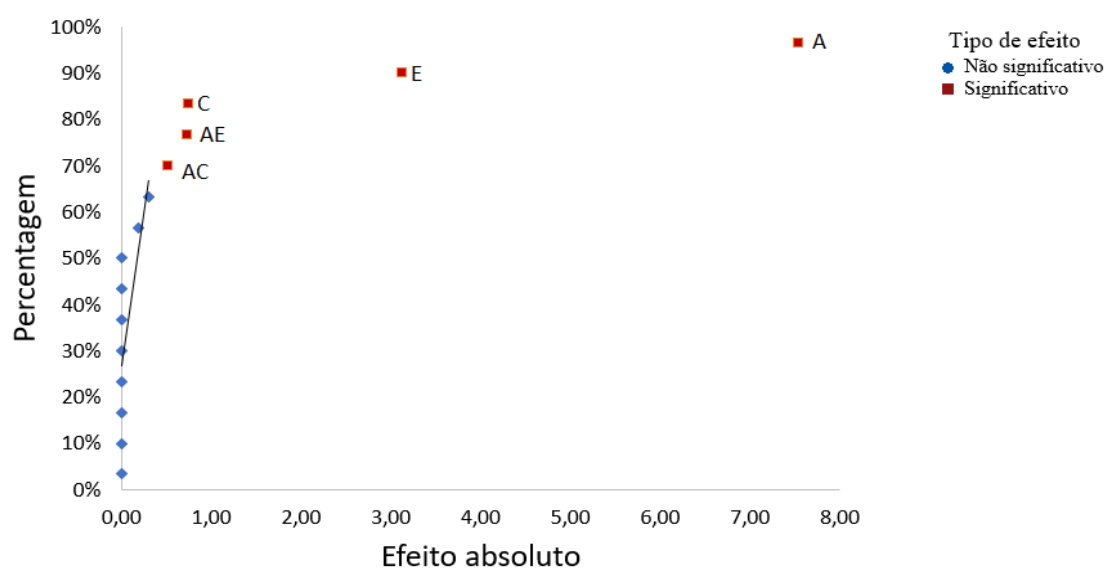


Figura 36. Representação seminormal dos efeitos com factor B fixo no nível baixo –ETAR Y

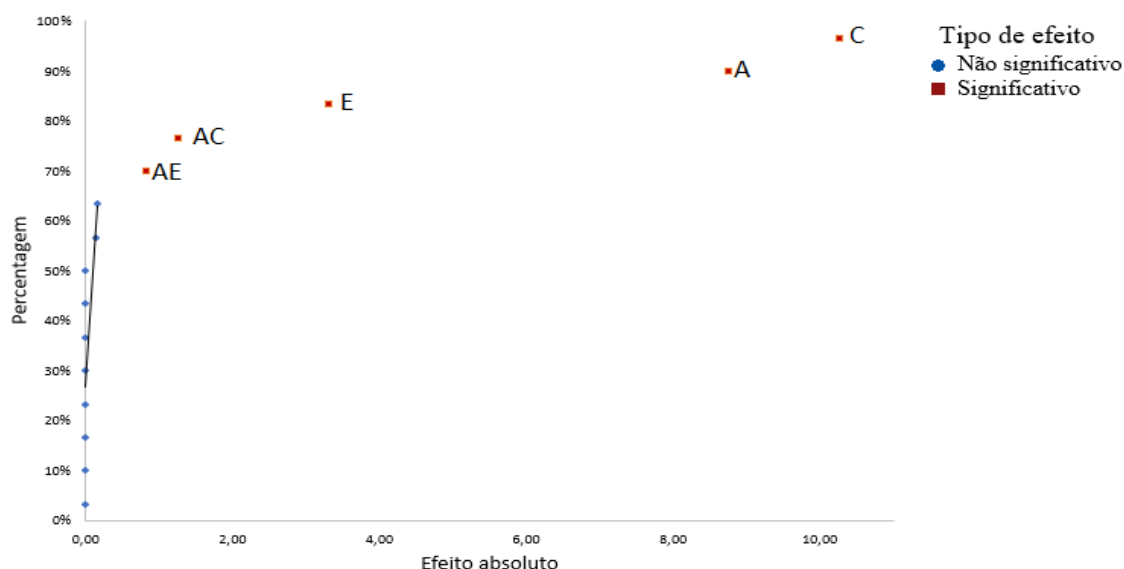


Figura 37. Representação seminormal dos efeitos com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

Os testes ANOVA para o factor B fixo nos níveis baixo e alto, encontram-se nas Tabelas 26 e 27, respectivamente. Os factores e interações identificados nas Figuras 36 e 37 foram testados para um nível de significância de 0,05, apresentando um $F_{\text{crítico}}(0,05;1;13) \approx 4,67$ inferior ao $F_{\text{calculado}}$ provando a sua significância estatística.

Tabela 26. Análise de Variância (ANOVA) aos factores considerados relevantes quando B está no nível baixo – ETAR Y

Factor/Interação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média quadrática	$F_{\text{calculado}}$
A	1	227,03	227,03	5817,11
C	1	2,24	2,24	57,46
E	1	39,03	39,03	1000,09
AC	1	1,05	1,05	26,79
AE	1	2,17	2,17	55,56
Erro	13	0,51	0,04	
Total	15	272,02		

Tabela 27. Análise de Variância (ANOVA) aos factores considerados relevantes quando B está no nível baixo – ETAR Y

Factor/Interacção	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média quadrática	F_{calculado}
A	1	306,16	306,16	23445,18
B	1	421,99	421,99	32315,30
C	1	43,59	43,59	3338,25
AB	1	6,36	6,36	487,26
BC	1	2,63	2,63	201,59
Erro	13	0,17	0,01	
Total	15	780,92		

Os modelos de regressão foram construídos com os factores e interacções considerados significativos para a ETAR Y com o factor B fixo nos níveis baixo e alto, de acordo com as equações 14 e 15, respectivamente.

$$\text{Ef. rem. SST (\%)} = 14,088 - 3,767A - 0,374C + 1,562E + 0,256AC - 0,368AE \quad (14)$$

$$\text{Ef. rem. SST (\%)} = 80,171 - 4,374A - 5,136C + 1,651E - 0,631AC + 0,406AE \quad (15)$$

A verificação dos pressupostos da ANOVA para os modelos de regressão com o factor B fixo no nível baixo e alto encontram-se nos Anexos VII e VIII, respectivamente.

➤ *Verificação do ajuste dos modelos*

Apesar da violação do pressuposto referente à independência mútua, é possível verificar que os modelos permitem o ajuste entre os valores simulados e os previstos. Nas figuras 38 e 39 encontram-se as relações entre a eficiência de remoção de SST (%) simulada nos testes e prevista através dos modelos de regressão com factor B fixo no nível baixo e no nível alto, respectivamente. Estas relações apresentam um coeficiente de determinação múltipla, R^2 , de aproximadamente 99 %. Desta forma pode-se afirmar que o modelo explica quase a totalidade da variação existente nos sistemas.

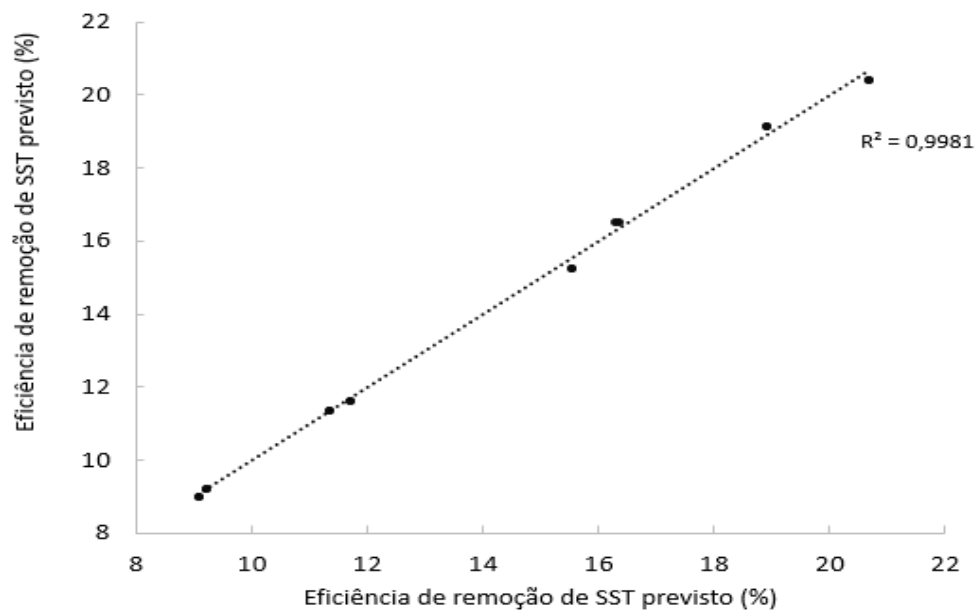


Figura 38. Relação entre a eficiência de remoção de SST (%) simulada nos testes e prevista através do modelo de regressão com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

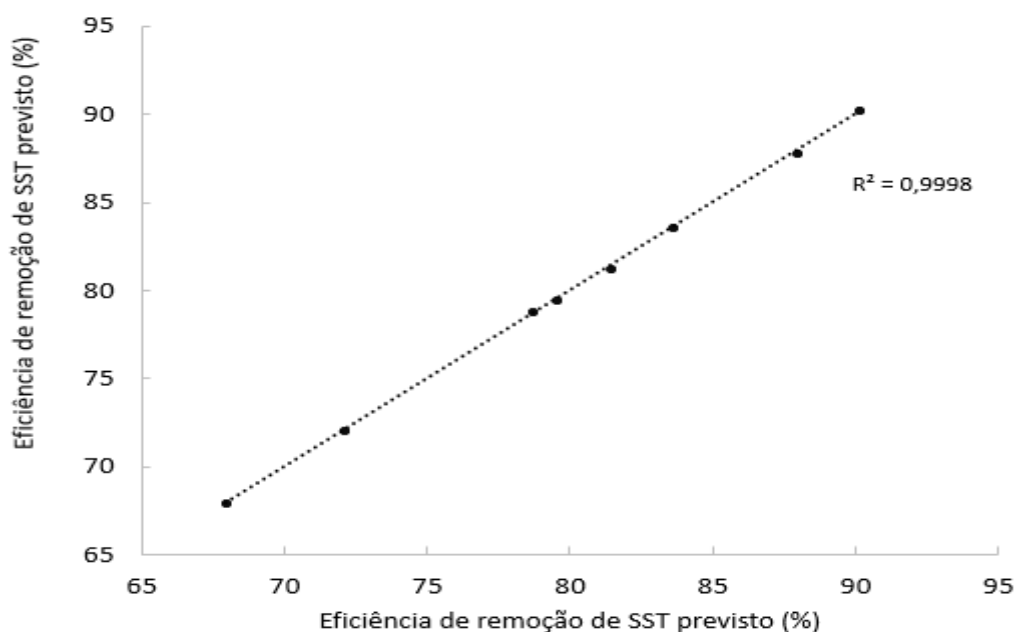


Figura 39. Relação entre a de eficiência de remoção de SST (%) simulada nos testes e prevista através do modelo de regressão com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

O modelo de regressão com o factor B fixo no nível baixo e o modelo com o factor B fixo no nível alto são construídos recorrendo aos mesmos factores, no entanto, é importante avaliar qual a contribuição líquida destes factores em cada caso. Na Tabela 28 encontra-se a contribuição líquida dos factores dos modelos de regressão com factor B com nível fixo

Tabela 28. Contribuição líquida dos factores dos modelos de regressão com factor B com nível fixo – ETAR Y

Factor/Interacção	Contribuição Líquida (%)	
	Factor B fixo nível baixo	Factor B fixo nível alto
A	83,44	39,20
C	0,81	54,04
E	14,33	5,58
AC	0,37	0,81
AE	0,78	0,34

Ambos os modelos explicam cerca de 99 % da variação existente em ambas as zonas do modelo do factorial completo da ETAR Y, no entanto, o modelo de regressão com o factor B fixo no nível baixo e no nível alto são influenciados de modo distinto pelos mesmos factores e interacções.

7.2.8. Teste para condições reais de funcionamento

➤ Teste para condições reais de funcionamento para ETAR X

Para a ETAR X é possível avaliar o ajuste do modelo recorrendo a valores reais médios (Tabela 29), sendo a altura de alimentação do afluente o valor determinado pela planta de projecto fornecida pela entidade gestora e o valor para a razão $Q_{lamas}/Q_{efluente}$ foi obtida efectuando um balanço ao decantador primário (Anexo IX).

Tabela 29. Variáveis com respectivos níveis de funcionamento reais e codificados para condições verificadas na ETAR X

Variável\Nível	Funcionamento	Codificado
Q_{afllu} (m^3/d) (A)	22.372	-0,47
$[SST]_{afllu}$ (mg/l) (B)	320	-0,48
H_{alim} (m) (C)	2	0
Razão Q_{lamas}/Q_{eflu} (%) (E)	10,2	-0,99

Com as variáveis codificadas é possível substituir os factores na equação 11, obtendo uma eficiência de remoção de SST de 70,3 % (Tabela 30), sendo que a eficiência observada na ETAR nestas mesmas condições foi de 66,1 %. Constatase que o modelo apresenta eficiências de remoção da mesma ordem de grandeza dos valores reais, pelo que o modelo constitui uma razoável aproximação às condições reais.

Tabela 30. Valores de eficiência prevista e real e intervalos de confiança e de previsão nas condições de funcionamento

ETAR	Eficiência de remoção de SST (%)		Intervalo de confiança (95 %) ⁸	Intervalo de previsão (95 %) ⁹
	Previsto	Real		
X	70,3	66,1	[67,62; 72,98]	[62,49; 78,1]

➤ **Avaliação do modelo com valores reais ETAR Y**

A avaliação foi feita através da verificação do ajuste entre as respostas previstas através do modelo e as respostas simuladas no software GPS-X. A comparação entre as respostas previstas pelo modelo e as condições reais de funcionamento não foram validadas por dificuldade de obtenção dos níveis de funcionamento reais da ETAR, não permitindo a sua introdução no modelo. Deste modo não é possível prever, através do modelo, a eficiência de remoção de SST (%) para as condições reais de operação.

7.2.9. Optimização da eficiência de remoção de SST (%)

Atendendo a que os modelos se ajustam ao sistema em estudo, estes podem ser utilizados para otimizar a eficiência de remoção de SST (%) dentro dos limites estudados.

Na Figura 40 encontra-se um diagrama com os factores do modelo e o modo como afectam a variável de resposta, atendendo que o objectivo é proceder à sua optimização, é possível determinar que as condições óptimas de operação são as que se encontram na Tabela 31.

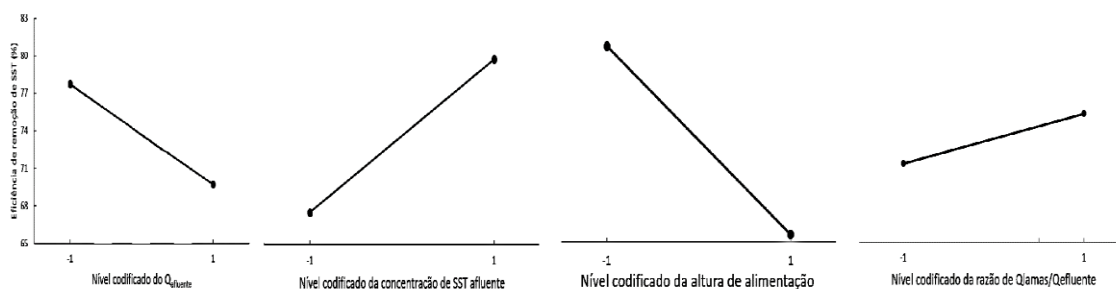


Figura 40. Optimização da eficiência de remoção (%) – ETAR X

⁸ Valores obtidos no *software* Minitab17

⁹ Valores obtidos no *software* Minitab17

Tabela 31. Condições óptimas de funcionamento – ETAR X

Factor	Variável	Nível codificado	Nível real
A	Caudal afluyente m ³ /d	-1	19.562,5
B	Concentração de SST afluyente mg/l	+1	550
C	Altura de alimentação m	-1	1
E	Razão Q _{lamas} /Q _{efluente} (%)	+1	40

Para a ETAR Y, é possível proceder à optimização recorrendo ao modelo de regressão completo, ou aos dois modelos contruídos devido à existência de 2 zonas distintas no primeiro modelo. Assim, nas Figura 41, 42 e 43 encontram-se os diagramas dos factores dos modelos completo, com factor B fixo no nível baixo e no nível alto, respectivamente, em função da eficiência de remoção de SST. Sendo que, nas Tabelas 32 e 33, se encontram as condições óptimas de funcionamento para as situações referidas.

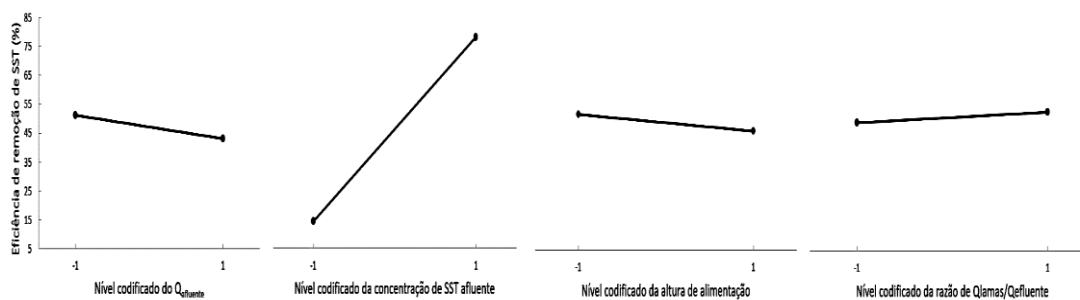


Figura 41. Optimização da eficiência de remoção (%) de acordo com o modelo completo – ETAR Y

Tabela 32. Condições óptimas de funcionamento de acordo com o modelo completo – ETAR Y

Factor	Variável	Nível codificado	Nível real
A	Caudal afluyente m ³ /d	-1	7.292,4
B	Concentração de SST afluyente mg/l	+1	670
C	Altura de alimentação m	-1	1
E	Razão Q _{lamas} /Q _{efluente} (%)	+1	40

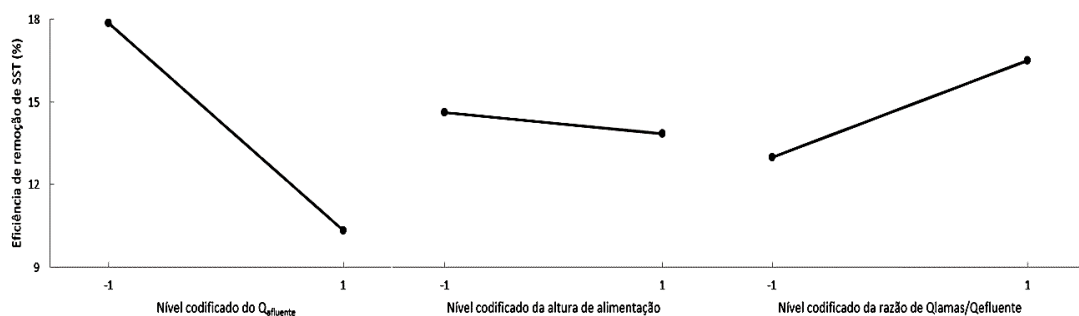


Figura 42. Optimização da eficiência de remoção (%) de acordo com o factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

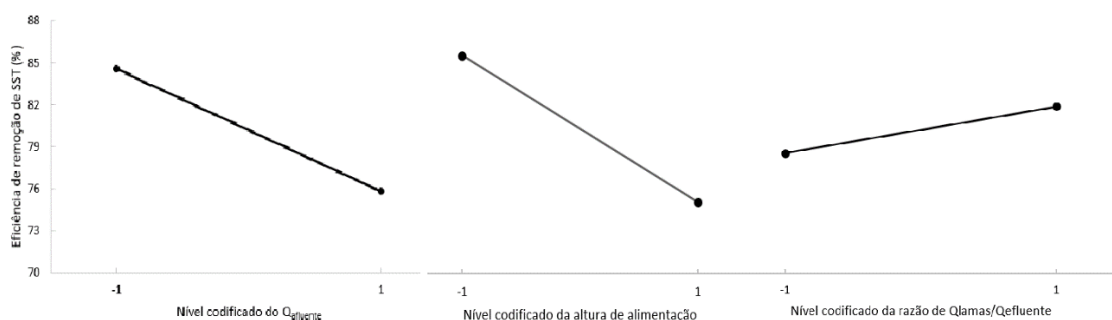


Figura 43. Optimização da eficiência de remoção (%) de acordo com o factor B fixo no nível alto – ETAR Y

Tabela 33. Condições óptimas de funcionamento de acordo com o modelo para o factor B fixo – ETAR Y

Factor	Variável	Nível codificado	Nível real
A	Caudal afluente m ³ /d	-1	7.292,4
C	Altura de alimentação m	-1	1
E	Razão Q _{lamas} /Q _{efluente} (%)	+1	40

Na Tabela 34 são apresentadas as eficiências de remoção de SST (%) previsto por cada modelo nas condições óptimas, assim como o valor simulado no *software* GPS-X no teste correspondente. Ainda são apresentados os intervalos de confiança e de previsão, o primeiro indica com 95 % de confiança que a média da eficiência de remoção de SST (%) na configuração óptima se encontra dentro dos limites do intervalo, enquanto o último indica, com o mesmo grau de confiança, que uma nova observação apresentará um valor dentro dos limites apresentados.

Tabela 34. Valores de eficiência prevista e simulada e intervalos de confiança e de previsão para cada modelo nas condições óptimas

ETAR	Modelo	Eficiência de remoção de SST (%)		Intervalo de confiança (95 %) ¹⁰	Intervalo de previsão (95 %) ¹¹
		Previsto	Simulado		
X	Completo	94,63	91,36	[91,74; 97,53]	[86,75; 100]
	Completo	90,98	90,15	[90,29; 91,68]	[89,23; 92,74]
Y	Factor B fixo nível baixo	20,41	20,66	[20,11; 20,72]	[19,12; 20,25]
	Factor B fixo nível alto	90,29	90,15	[90,11; 90,47]	[89,95; 90,64]

¹⁰ Valores obtidos no *software* Minitab17

¹¹ Valores obtidos no *software* Minitab17

8. Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Este TFM consistiu na aplicação de ferramentas numéricas na simulação do funcionamento decantadores primários circulares e rectangulares no tratamento de AR urbanas utilizando técnicas de planeamento experimental (*design of experiments*) para optimização dos parâmetros de resposta. O presente trabalho foi alvo de uma comunicação em painel no Encontro Luso-Galego de Química 2017, realizado em Ferrol (Espanha), cujo resumo e poster são apresentados no Anexo X.

Existem várias formas distintas de efectuar a experimentação para estudar a influência de factores sobre uma determinada variável de resposta. Nos casos que envolvem vários factores é usual realizar uma experiência factorial, na qual se variam simultaneamente todos os níveis dos factores em estudo ao invés de ensaiar um factor de cada vez.

Nas duas ETAR X e Y com decantadores primários rectangulares e circulares são estudadas as condições de funcionamento da decantação primária. Uma forma de efectuar as várias experiências é recorrendo à simulação. A simulação introduz a grande vantagem de se poder efectuar as várias experiências e obter as respostas sem ter de realizar qualquer ensaio de campo com todos os problemas decorrentes das restrições dos ensaios no terreno e também dos custos inerentes e do tempo necessário. No presente trabalho utilizou-se o software GPS-X como ferramenta para a simulação de decantação primária. Este permite avaliar o comportamento das unidades de tratamento perante diversos cenários, possibilitando a obtenção de informação relativamente aos sistemas em estudo. A simulação permite introduzir variações à unidade em estudo, possibilitando a obtenção de indicadores de desempenho e avaliar a sua eficiência (e.g. remoção de SST), não estando susceptível a entradas inacessíveis (i.e., distúrbios).

Neste trabalho decidiu utilizar-se o planeamento factorial completo uma vez que sendo os ensaios realizados através de simulação não existiam restrições quanto ao número de experiências a realizar. Neste sentido o factorial completo constitui uma abordagem superior na medida em que todas as combinações dos níveis dos factores em estudo são experimentadas o que facilita a interpretação dos resultados ao invés do que sucederia se a opção tivesse sido o uso de um desenho factorial fraccionado.

Os estudos realizados no âmbito deste trabalho consistiram em simular e otimizar a influência de algumas variáveis no desempenho de decantadores primários no tratamento de AR, para tal, foram seleccionadas 2 ETAR da região de Lisboa. Os testes foram realizados recorrendo ao *software* de simulação GPS-X (versão 6.0), implementando apenas a corrente afluente, o decantador primário (circular e rectangular) e a corrente efluente. As cinco variáveis estudadas

foram o caudal e a concentração de SST à entrada, as alturas de alimentação e de saída e a razão $Q_{\text{lamas}}/Q_{\text{efluente}}$.

O planeamento factorial e a análise estatística foram efectuados no *software* Minitab17, onde foram construídos os modelos para descrição matemática do efeito das variáveis em estudo na eficiência de remoção de SST. Os valores previstos obtidos através dos modelos para as ETAR X e Y apresentam uma elevada concordância com os valores simulados (ETAR X: $R^2=0,9824$; ETAR Y: $R^2=0,9996$).

No que diz respeito à ETAR X comparou-se a eficiência de remoção de SST prevista através do modelo com as condições reais. A eficiência de remoção de SST real foi de aproximadamente 66,1 % e as eficiências de remoção de SST previstas pelo modelo de 70,3 % com um intervalo de previsão de [62,5;78,1]. Comparando os valores reais com os valores obtidos através do modelo de regressão pode-se constatar que o modelo prevê de forma razoável as condições de funcionamento reais da decantação primária para a ETAR X. Esta análise não foi efectuada para a ETAR Y por não ser possível aceder aos dados em tempo útil.

Os modelos foram analisados para determinar as melhores condições dos factores de controlo com vista a maximizar a resposta. Para valores dentro dos limites dos modelos completos, (i.e. para as ETAR X e Y) a eficiência de remoção de SST apresenta valores superiores quando a decantação primária ocorre para caudais afluentes (factor A) e alturas de alimentação (factor C) mais baixas, e para a concentração de SST afluente (factor B) e razão $Q_{\text{lamas}}/Q_{\text{efluente}}$ (factor E) mais elevadas. As condições óptimas de acordo com os níveis experimentados para a ETAR X correspondem a um caudal de entrada de 19.563 m³/d, e a uma concentração de SST afluente de 550 mg/l, enquanto que para a ETAR Y o caudal de entrada é de 7.292 m³/d e a concentração de 670 mg/l. A alimentação a 1 m de altura e a razão $Q_{\text{lamas}}/Q_{\text{efluente}}$ de 40 % são as condições óptimas destas variáveis em ambas ETAR. Verificou-se que a altura do descarregador do efluente (factor D) não interfere na eficiência de remoção de SST em nenhum dos casos estudados. Funcionando nas condições óptimas obtidas pelos modelos completos a ETAR X deve apresentar eficiências de remoção de SST superiores a 86,75 % e a ETAR Y valores entre 89,23 e 92,74 %.

Para a ETAR Y por observação da relação entre a eficiência de remoção de SST prevista e a eficiência de remoção de SST simulada verifica-se a existência de duas zonas distintas. Estas zonas advêm fundamentalmente do factor B (i.e. da amplitude de níveis testada para este factor). A existência de uma elevada amplitude na concentração afluente de SST na ETAR Y implicou assim a necessidade de construção de dois modelos com este factor fixo nos dois níveis de trabalho. Em ambos os modelos construídos para o factor B no nível baixo e alto, respectivamente as condições óptimas dos restantes factores (i.e A, C, E) coincidem com o determinado

anteriormente para o modelo completo. No entanto as eficiências de remoção de SST dos dois modelos vão diferir tal como seria de esperar. Quando a decantação primária, na ETAR Y, ocorre para concentração de SST afluente de 51 mg/l prevê-se uma eficiência de remoção de SST entre 19,12 e 20,25 % e para uma concentração de SST de 670 mg/l prevê-se valores entre 89,95 e 90,64 %.

O planeamento factorial associado à simulação permitiu a diminuição da influência de factores de ruído (i.e., distúrbios do sistema), uma vez que na simulação todas as entradas são consideradas acessíveis, possibilitando uma vasta gama de experiências que de outra forma não podem ser aplicadas no sistema real. Seria de todo inviável proceder à variação de níveis de alguns dos factores de controlo em situação real (i.e. nas ETAR) além de que este tipo de experimentação real seria muito moroso e afectaria o tratamento a jusante. Por simulação consegue-se assim executar as experiências aplicando um conjunto de condições externas ao input do sistema (i.e. factores de controlo) e observar a reacção do sistema por registo do output (i.e. variável de resposta).

No âmbito deste trabalho outras variáveis poderiam ter sido estudadas uma vez que o software apresenta uma gama elevada de variáveis operacionais, bem como resultados de simulação em termos de corrente efluente, ou corrente de lamas, por exemplo.

No seguimento do presente trabalho, propõe-se o estudo económico (e.g. custos de operação) e estudo energético associado às condições estudadas para as ETAR. Propõe-se ainda um estudo semelhante para os decantadores secundários e espessadores gravíticos de lamas, com base nos resultados obtidos neste trabalho. Outros estudos análogos poderiam ser desenvolvidos para as restantes unidades de tratamento das ETAR.

Referências Bibliográficas

- Adams Jr, C.E. et al., 1999. *Environmental Engineer's Handbook. Cap 7 - Wastewater Treatment*. D. H. F. Liu & B. G. Lipták, eds., CRC Press LLC.
- Antunes, R., 2006. *Contribuição para o Estudo de Odores em Estações de Tratamento de Águas Residuais Urbanas*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- APHA/AWWA/WEF, 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 21st ed., Washington DC, USA: American Public Health Association.
- Ariscrisnã, P.M., 2012. *Simulação Numérica Aplicada ao Tratamento de Efluentes*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Cândido, J.R.S., 2013. *Modelação Dinâmica de Sistemas de Drenagem em Meio Urbano*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Carlsson, B., 1998. *An Introduction to sedimentation theory in wastewater treatment*, Uppsala: Uppsala University.
- Daniel, C., 1959. Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two-Level Experiments. *Technometrics*, 1(4), pp.311–341.
- Davis, M.L., 2010. *Water and wastewater engineering: Design principles and practice* Profession., Mc Graw Hill.
- Desjardins, M.-A. et al., 2001. Wastewater Treatment Plant Optimization Using a Dynamic Model Approach. In *Sixth International Water Technology Conference*. Alexandria, Egypt, pp. 370–377.
- ERSAR, 2015. Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2014) Volume 1 - Caracterização Geral do Setor. , p.103. Available at: <http://www.ersar.pt/pt/site-publicacoes/Paginas/edicoes-anuais-do-RASARP.aspx> [Accessed December 26, 2016].
- ERSAR, 2016. Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2016) Volume 1 – Caraterização do setor de águas e resíduos. Available at: <http://www.ersar.pt/pt/site-publicacoes/Paginas/edicoes-anuais-do-RASARP.aspx> [Accessed December 26, 2016].
- Ferreira, F.M.S., 2011. *Simulação Dinâmica do comportamento de ETAR: Principios e modelos*. Universidade Nova de Lisboa.
- Gernaey, K. V. et al., 2004. Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: State of the art. *Environmental Modelling and Software*, 19(9), pp.763–783.
- Goula, A.M. et al., 2008. A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment. Case study: The influence of a feed flow control baffle. *Chemical*

- Engineering Journal*, 140(1–3), pp.110–121.
- Guimarães, R.C. & Cabral, J.A.S., 1997. *Estatística*, Alfragide: McGraw-Hill.
- Hicks, C.R. & Turner, K.V.J., 1999. *Fundamental Concepts in the Design of Experiments* 5th Editio., New York: Oxford University Press.
- Hydromantis, 2013. *GPS-X Technical Reference*, Toronto, Canada: Hydromantis Environmental Software Solutions, Inc.
- Lin, S.D. & Lee, C.C., 2000. *Handbook of Environmental Engineering Calculations*, New York, USA: Mc Graw Hill.
- Lin, S.D. & Lee, C.C., 2007. *Water and Wastewater Calculations Manual* 2nd Editio. C. C. Lee, ed., New York, USA: Mc Graw Hill. Available at:
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>.
- Malik, O.A. et al., 2015. A global indicator of wastewater treatment to inform the Sustainable Development Goals (SDGs). *Environmental Science and Policy*, 48, pp.172–185.
Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.01.005>.
- Marecos do Monte, H. et al., 2016. Cursos Técnicos 05 - Tratamento de águas residuais - Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico. , p.544. Available at:
<http://www.ersar.pt/pt/publicacoes/publicacoes-tecnicas/cursos> [Accessed December 5, 2017].
- Marecos do Monte, H. & Albuquerque, A., 2010. Guias técnicos 14 - Reutilização de Águas Residuais. , p.339. Available at: <http://www.ersar.pt/pt/publicacoes/publicacoes-tecnicas/guias> [Accessed December 5, 2017].
- Mines Jr, R.O., 2014. *Environmental Engineering - Principles and Practice* 1st Editio., West Sussex, UK: Wiley Blackwell.
- Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 1995. *Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto*,
- Ministério do Ambiente, 1997. *Decreto-Lei nº 152/97 de 19 de Junho de 1997*,
- Montgomery, D.C., 2013. *Design and Analysis of Experiments* 8th Editio., John Wiley & Sons, Inc.
- Montgomery, D.C., 2009. *Introduction to statistical quality control* 6th Editio., John Wiley & Sons, Inc.
- Murteira, B. et al., 2007. *Introdução à estatística* 2ª Edição., Lisboa: McGraw-Hill.
- Oliveira, S., 2014. *Ensaio exploratório de otimização do tratamento primário da ETAR de Beirolas para incrementar a eficiência energética - Aplicação de Moringa oleifera no*

- processo de coagulação-floculação*. Instituto Superior de Agronomia.
- Pombo, S.C.M.A., 2010. *Contributo para a Utilização de Modelos de Simulação Dinâmica no Dimensionamento de Processos de Lamas Activadas*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciência e Tecnologia.
- Póvoa, P. et al., 2011. *Gestão Optimizada de Redes de Saneamento: O Exemplo do subsistema de Beirolas*.
- Pyzdek, T., 2003. *The Six Sigma Handbook Revised and Expanded* 3th Editio., New York, USA: McGraw-Hill.
- Ramalho, R.S., 1983. *Introduction to Wastewater Treatment Processes* 2ª Edição., Academic Press, Inc.
- Ribeiro, A.T.A., 2010. *Aplicação da moringa oleifera no tratamento de água para consumo humano*. Universidade do Porto.
- SIMTEJO, 2009. *Relatorio e Contas Simtejo 2008*, Lisboa: Simtejo - Saneamento Integrado dos Municípios do Tejo e Trancão, S.A.
- SIMTEJO, 2014. *Relatorio e Contas Simtejo 2013*, Lisboa: Simtejo - Saneamento Integrado dos Municípios do Tejo e Trancão, S.A.
- Spellman, F.R., 2014. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* Third Edit., New York, USA: CRC Press.
- Suez Environnement, 2017. ETAR de Chelas - Suez Environnement. Available at: <http://www.degremont.pt/pt/index.php/disenho-y-construccion/edar-dyc-ref/249-etar-de-chelas-portugal.html> [Accessed October 31, 2017].
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. & Stensel, H.D., 2013. *Wastewater Engineering - Treatment and Reuse* 4ª Edição. Metcalf & Eddy Inc, ed.,
- Watkins, K. et al., 2006. *Human Development Report 2006 - Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis*, Available at: <http://hdr.undp.org/en/media/HDR06-complete.pdf>.
- WEF & ASCE, 1998. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants* 4th Editio. "Task Force of the Water Environment Federation," ed., Alexandria, Virginia, USA: Water Environment Federation - Preserving & Enhancing the Global Water Environment.
- Wu, C.F.J. & Hamada, M., 2000. *Experiments - Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization* 1st Editio., New York: John Wiley & Sons, Inc.

ANEXOS

ANEXO I – Caudais ETAR X e Y

Tabela I. 1. Caudais afluentes mensais, diários e por decantador para a ETAR X e Y, durante o ano 2013

Mês	ETAR X			ETAR Y		
	Caudal mensal (m ³ /mês)	Caudal diário (m ³ /d)	Caudal diário/ decantador (m ³ /d)	Caudal mensal (m ³ /mês)	Caudal diário (m ³ /d)	Caudal diário/ decantador (m ³ /d)
Janeiro	1.521.260	50.709	25.354	1.286.496	42.883	10.721
Fevereiro	1.335.560	44.519	22.259	1.018.023	33.934	8.484
Março	1.804.350	60.145	30.073	1.550.735	51.691	12.923
Abril	1.617.820	53.927	26.964	1.400.971	46.699	11.675
Mai	1.484.030	49.468	24.734	1.268.538	42.285	10.571
Junho	1.351.640	45.055	22.527	1.099.191	36.640	9.160
Julho	1.359.760	45.325	22.663	1.049.653	34.988	8.747
Agosto	1.173.750	39.125	19.563	875.085	29.170	7.292
Setembro	1.248.710	41.624	20.812	1.012.138	33.738	8.434
Outubro	1.391.790	46.393	23.197	1.267.195	42.240	10.560
Novembro	1.271.210	42.374	21.187	1.092.713	36.424	9.106
Dezembro	1.411.190	47.040	23.520	1.256.815	41.894	10.473
Total	16.971.070	565.704	282.853	14.177.553	472.586	118.146

ANEXO II – Exemplo de implementação de teste no GPS-X

De forma semelhante ao decantador circular, Capítulo 7.2.2., na Figura II.1. encontram-se as características físicas do decantador rectangular (ETAR Y), no ponto ““*feed from bottom*” refere-se à altura de alimentação, que no nível baixo é 1 m e no alto é 3 m. No parâmetro “*water depth*”, altura do decantador junto à parede exterior cujo valor introduzido é de 4 m, a este parâmetro é acrescentada a altura do descarregador. Para a aplicação do planeamento factorial, a altura do descarregador no nível baixo é de 4,05 m e no nível alto é 4,20 m.

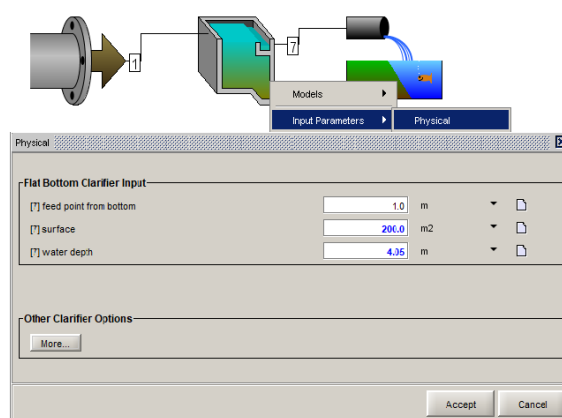


Figura II. 6. Características do decantador circular – ETAR Y

A razão entre o Q_{lamas} e o Q_{eflu} é estabelecida nas condições operacionais do decantador (Figura II.2.), correspondendo às correntes 9 e 7, respectivamente.

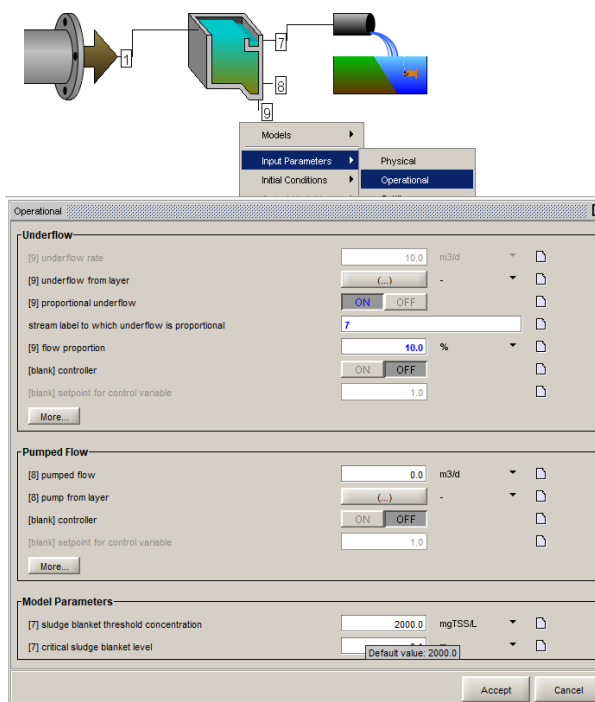


Figura II. 7. Condições operacionais do decantador primário – ETAR Y

Na Figura II.3. encontra-se o ambiente de simulação para a ETAR Y.

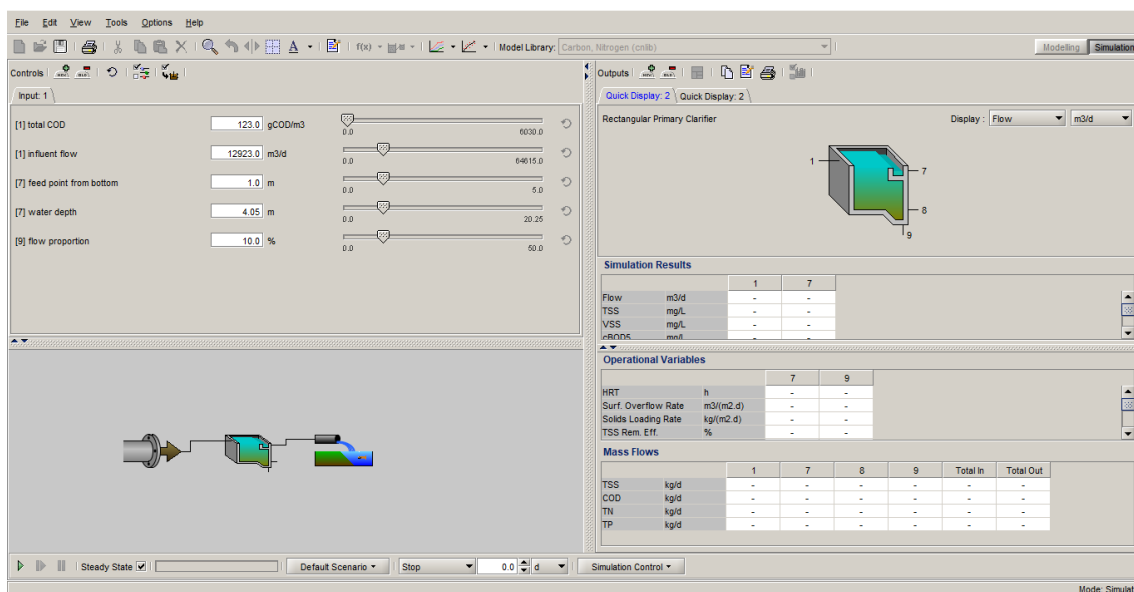


Figura II. 8. Ambiente de simulação, com parâmetros adicionados na janela de controlo e “quick display” do decantador rectangular – ETAR Y

Após correr a simulação é possível obter um ficheiro excel do “quick display”, como se demonstra na Figuras II.4 e II.5 para as ETAR X e Y, respectivamente.

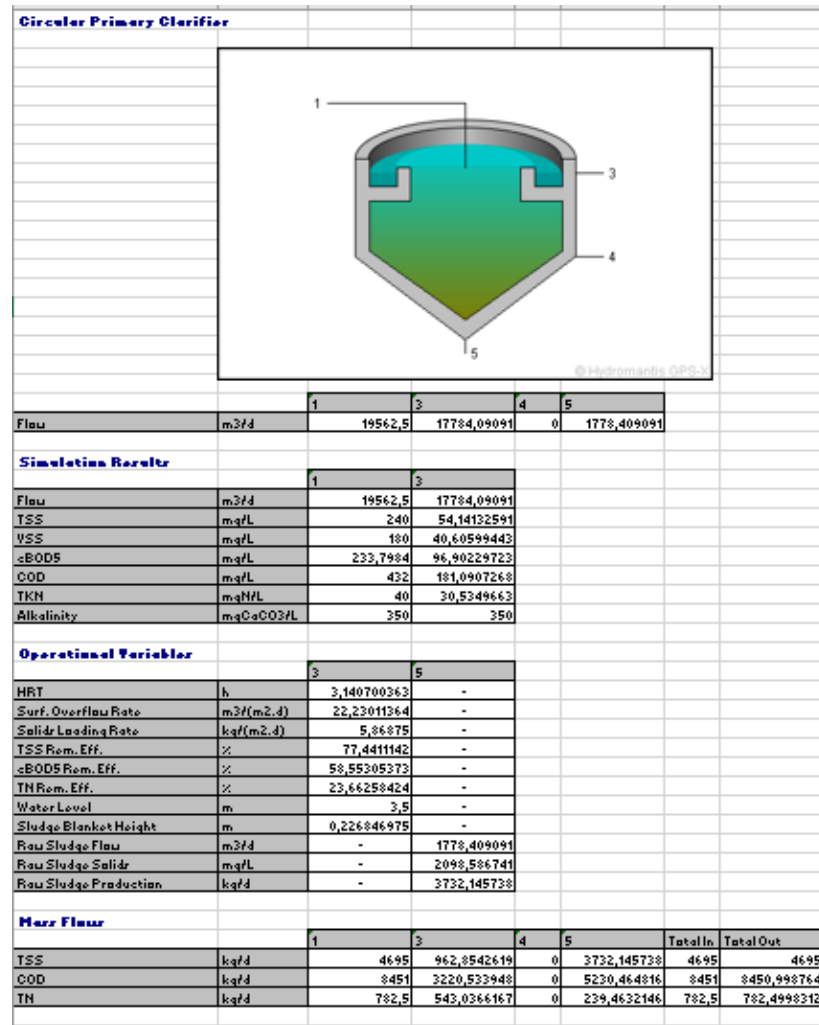


Figura II. 9. Ficheiro excel obtido pelo GPS-X com o “quick display” de um teste – ETAR X

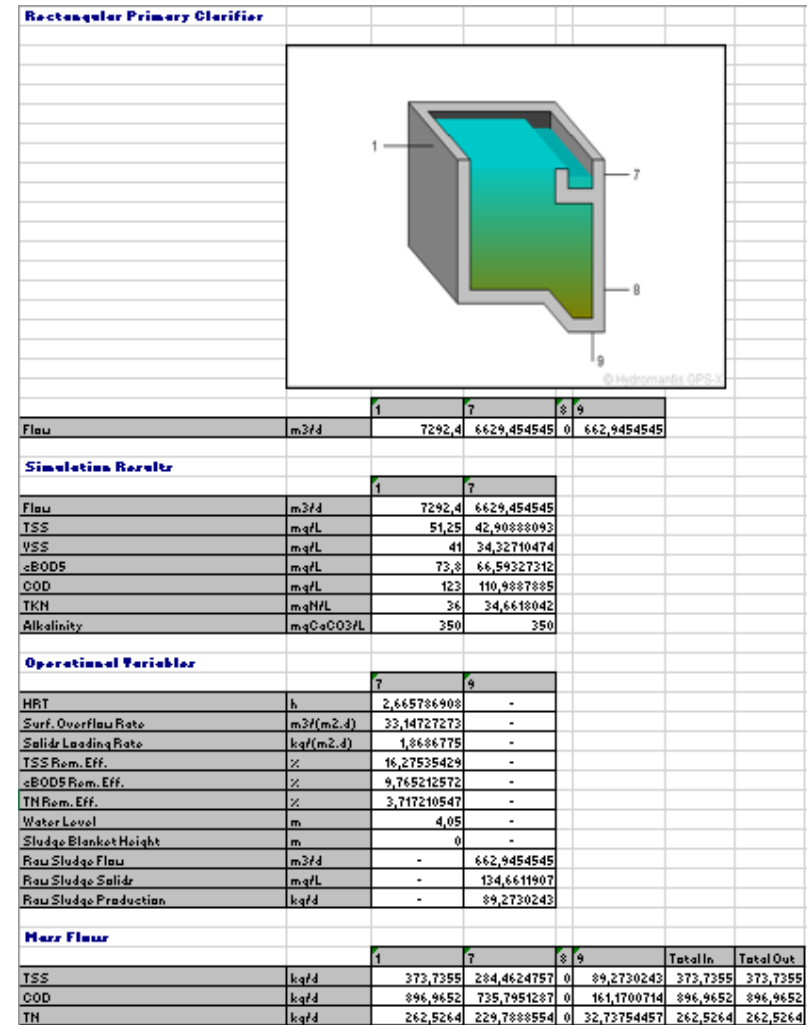


Figura II. 10. Ficheiro excel obtido pelo GPS-X com o “quick display” de um teste – ETAR Y

ANEXO III – Gráficos de efeitos ETAR X

➤ Efeitos Principais

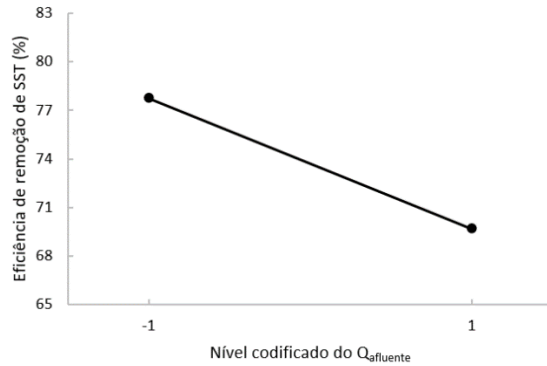


Figura III. 16. Representação gráfica do efeito do caudal afluyente (A) na eficiência de remoção de SST – ETAR X

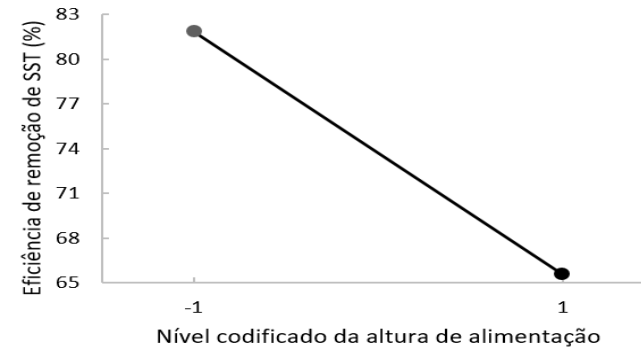


Figura III. 18. Representação gráfica do efeito da altura de alimentação (C) na eficiência de remoção de SST – ETAR X

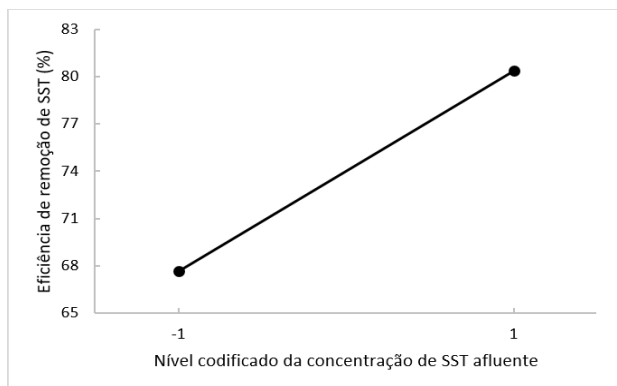


Figura III. 17. Representação gráfica do efeito da concentração de SST afluyente (B) na eficiência de remoção de SST – ETAR X

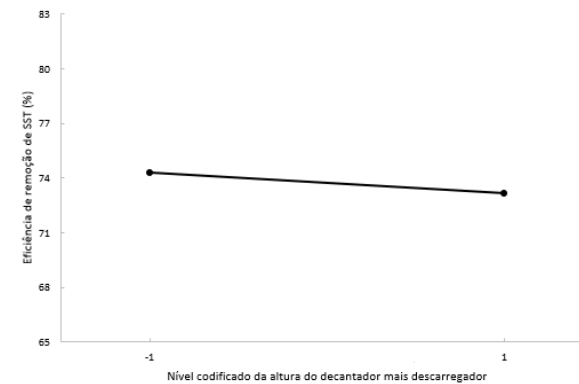


Figura III. 19. Representação gráfica do efeito da altura do decantador mais descarregador (D) na eficiência de remoção de SST – ETAR X

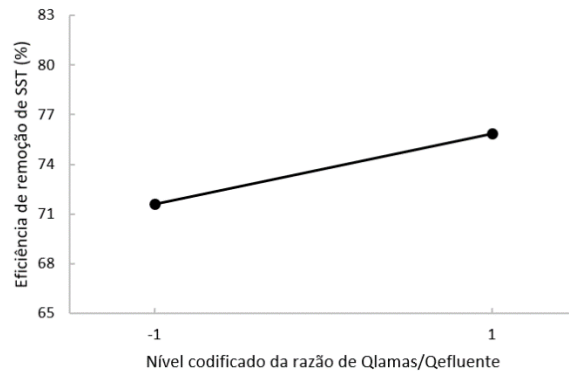


Figura III. 20. Representação gráfica do efeito da razão de $Q_{lamas}/Q_{efluente}$ (E) na eficiência de remoção de SST – ETAR X

➤ **Efeitos das interações de 2 factores**

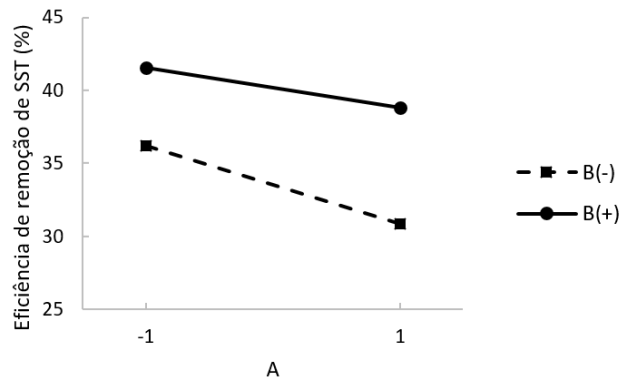


Figura III. 21. Representação gráfica do efeito da interacção AB na eficiência de remoção de SST – ETAR X

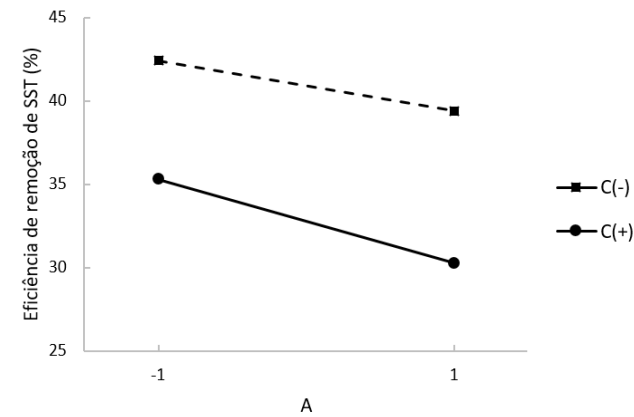


Figura III. 22. Representação gráfica do efeito da interacção AC na eficiência de remoção de SST – ETAR X

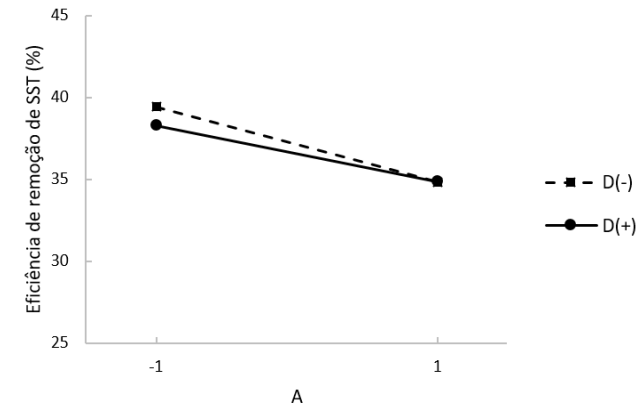


Figura III. 23. Representação gráfica do efeito da interacção AD na eficiência de remoção de SST – ETAR X

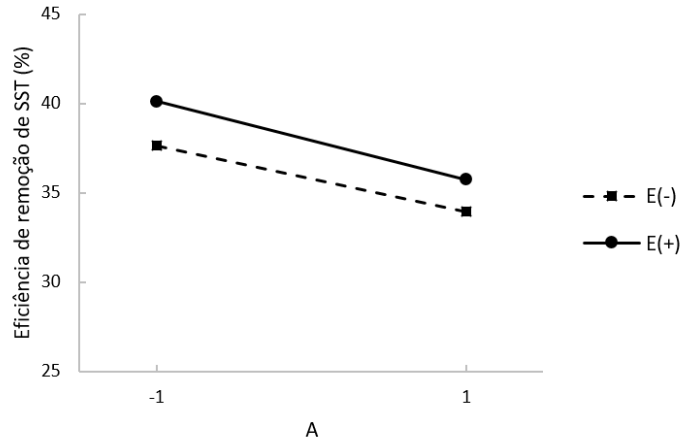


Figura III. 24. Representação gráfica do efeito da interação AE na eficiência de remoção de SST – ETAR X

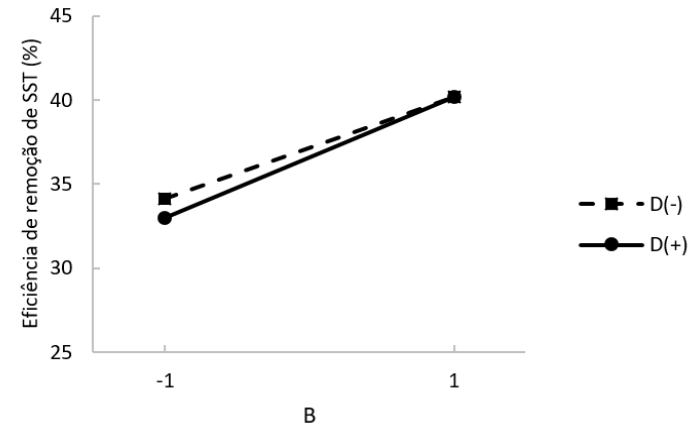


Figura III. 26. Representação gráfica do efeito da interação BD na eficiência de remoção de SST – ETAR X

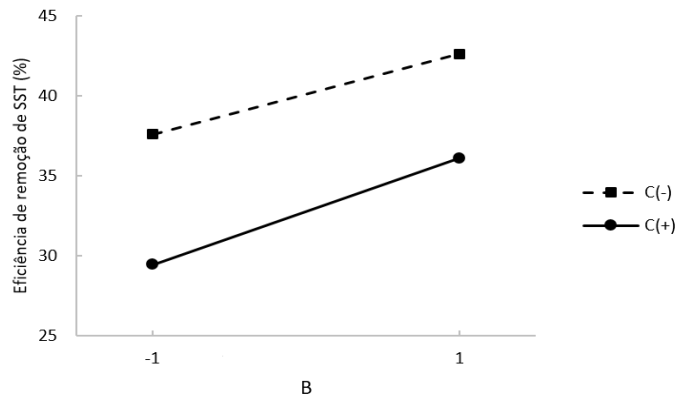


Figura III. 25. Representação gráfica do efeito da interação BC na eficiência de remoção de SST – ETAR X

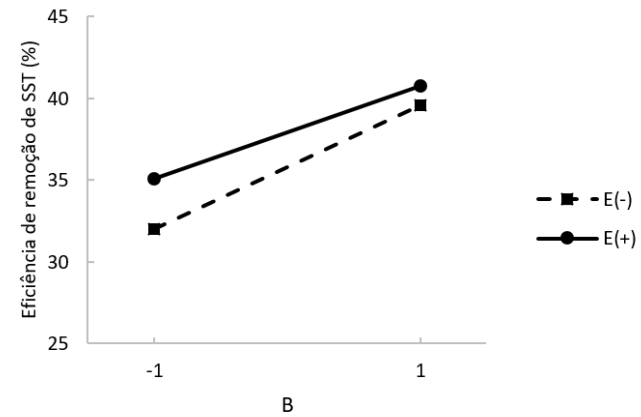


Figura III. 27. Representação gráfica do efeito da interação BE na eficiência de remoção de SST – ETAR X

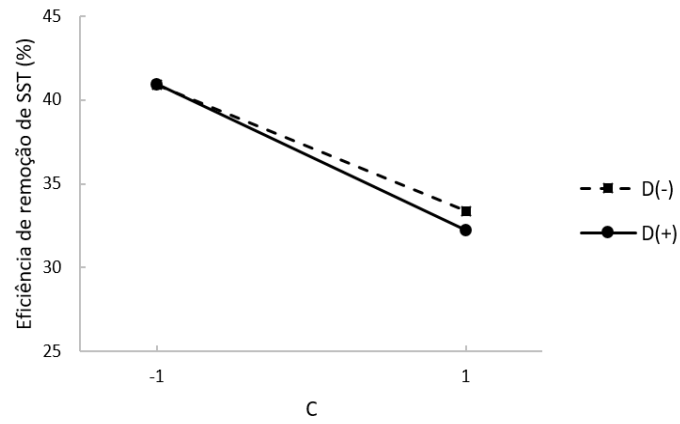


Figura III. 28. Representação gráfica do efeito da interacção CD na eficiência de remoção de SST – ETAR X

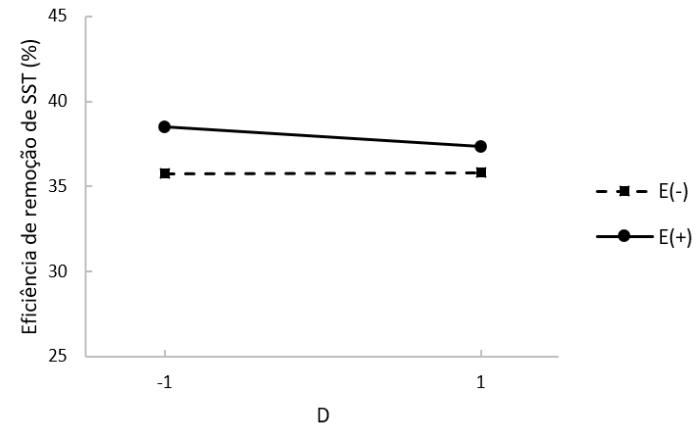


Figura III. 30. Representação gráfica do efeito da interacção DE na eficiência de remoção de SST – ETAR X

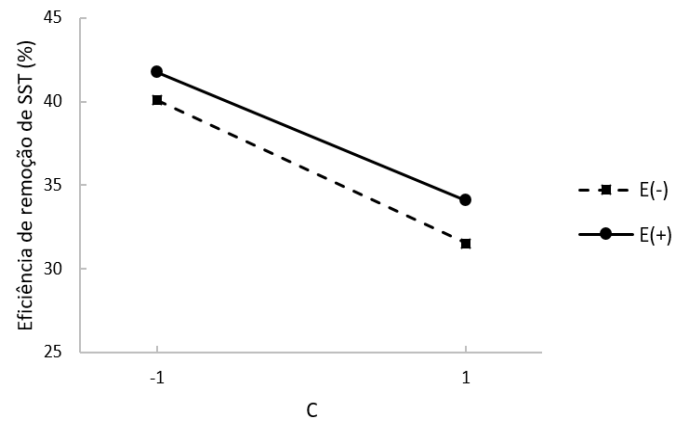


Figura III. 29. Representação gráfica do efeito da interacção CE na eficiência de remoção de SST – ETAR X

ANEXO IV – Gráficos de efeitos ETAR Y

➤ Efeitos Principais

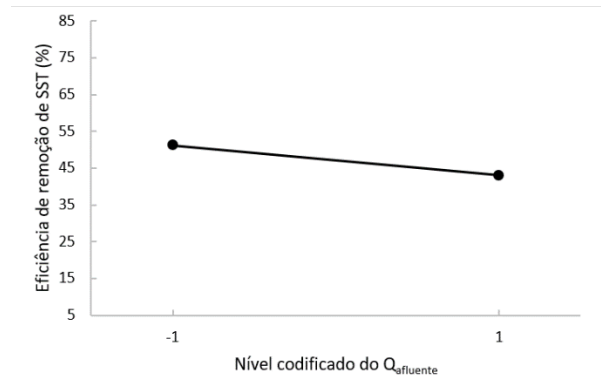


Figura IV. 18. Representação gráfica do efeito do caudal afluente (A) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

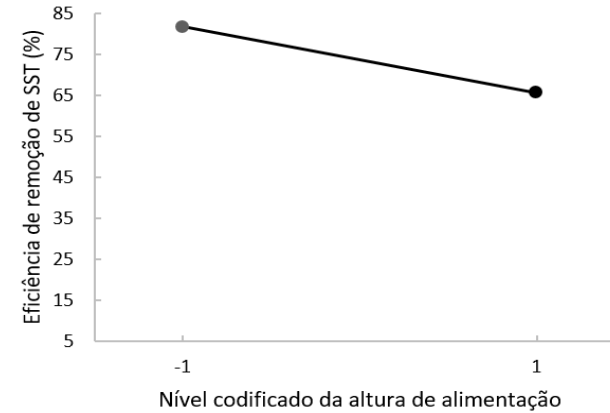


Figura IV. 20. Representação gráfica do efeito da altura de alimentação (C) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y



Figura IV. 19. Representação gráfica do efeito da concentração de SST afluente (B) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

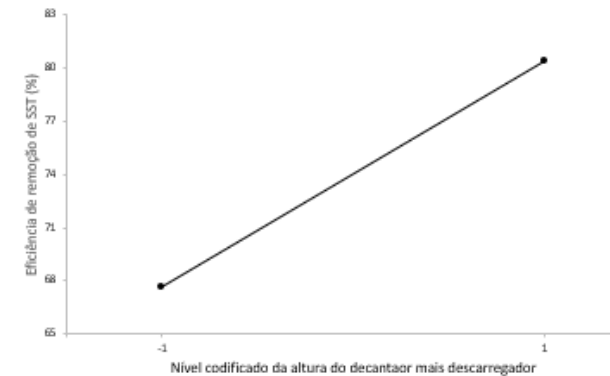


Figura IV. 21. Representação gráfica do efeito da altura do decantador mais descarregador (D) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

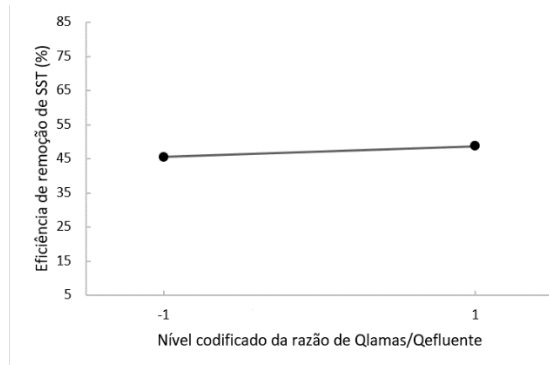


Figura IV. 22. Representação gráfica do efeito da razão de $Q_{\text{lamas}}/Q_{\text{efluente}}$ (E) na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

➤ **Efeitos das interações de 2 factores**

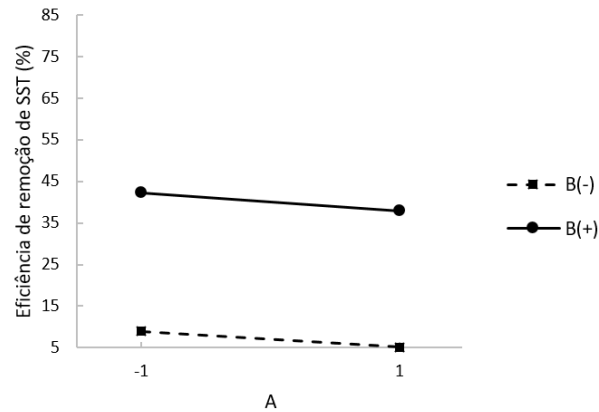


Figura IV. 23. Representação gráfica do efeito da interacção AB na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

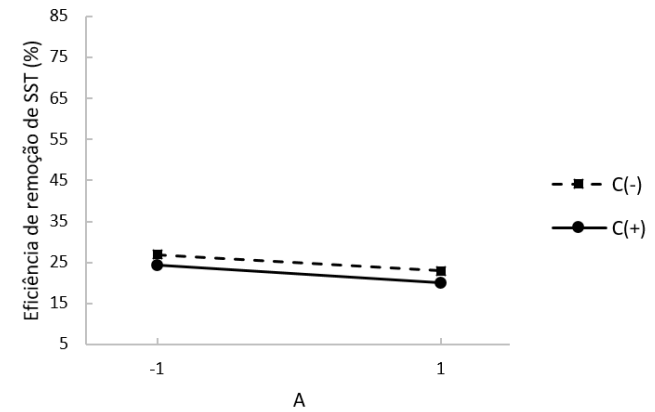


Figura IV. 24. Representação gráfica do efeito da interacção AC na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

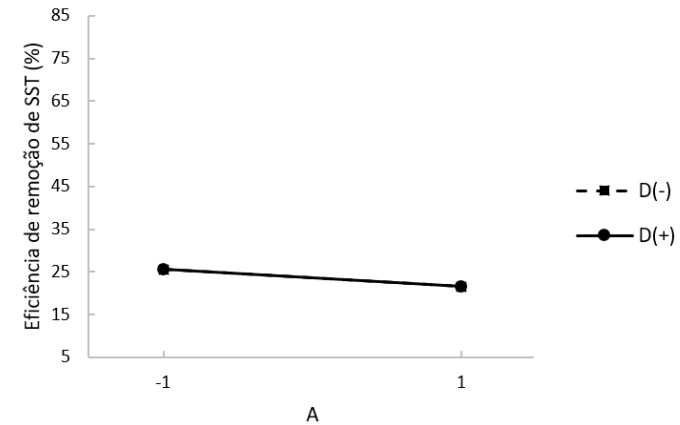


Figura IV. 25. Representação gráfica do efeito da interacção AD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

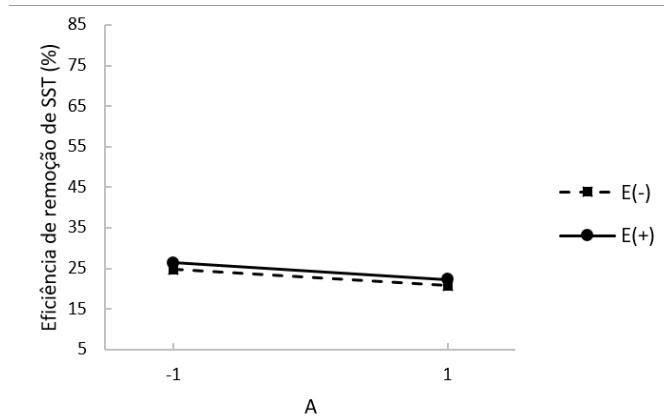


Figura IV. 26. Representação gráfica do efeito da interacção AE na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

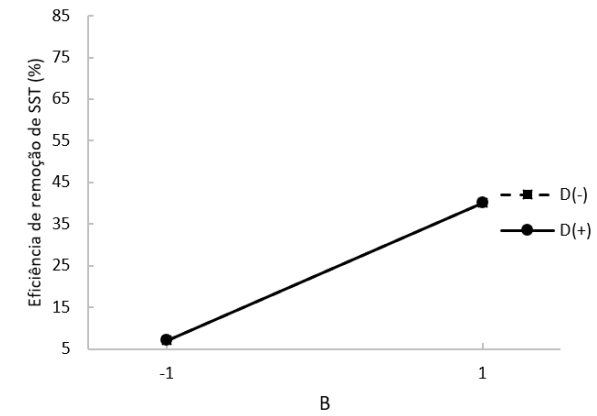


Figura IV. 28. Representação gráfica do efeito da interacção BD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

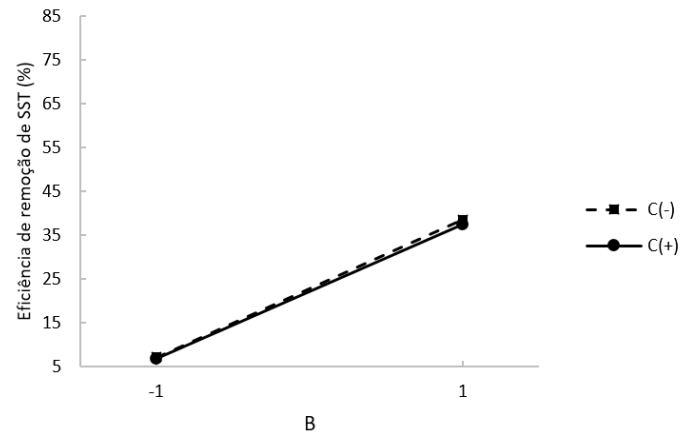


Figura IV. 27. Representação gráfica do efeito da interacção BC na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

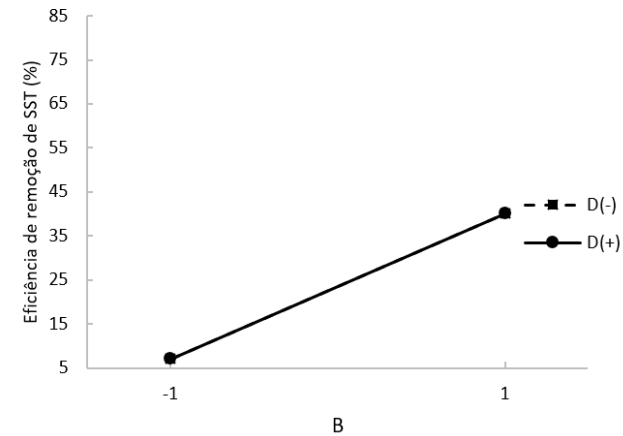


Figura IV. 29. Representação gráfica do efeito da interacção BD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

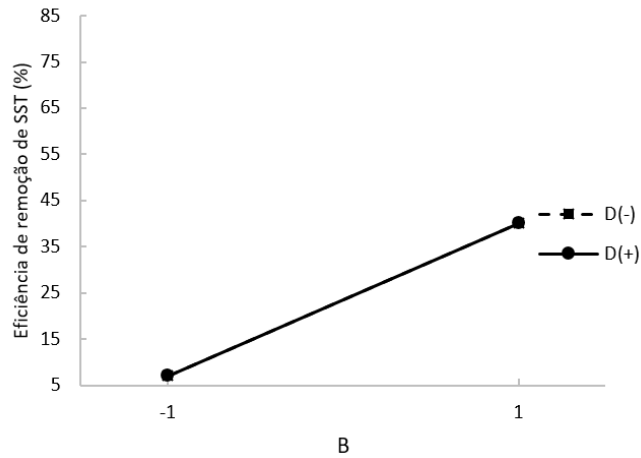


Figura IV. 30. Representação gráfica do efeito da interação BD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

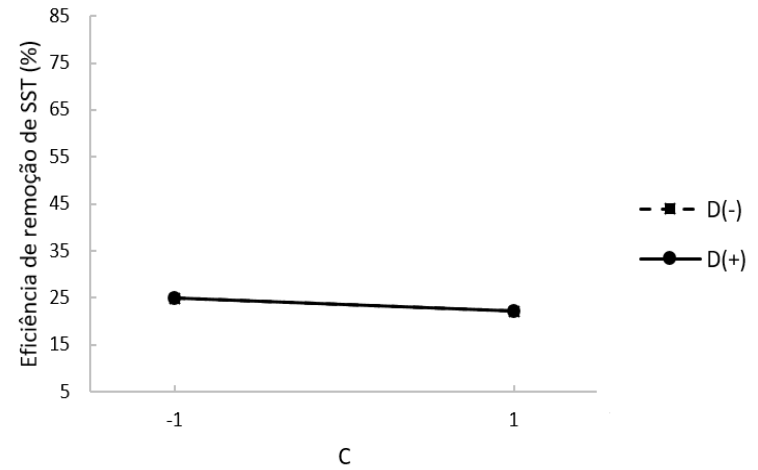


Figura IV. 32. Representação gráfica do efeito da interação CD na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

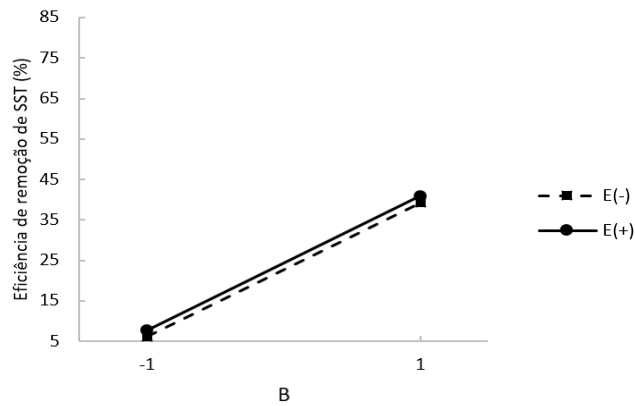


Figura IV. 31. Representação gráfica do efeito da interação BE na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

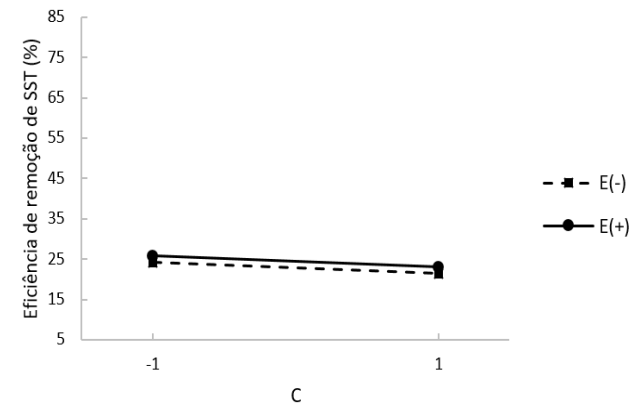


Figura IV. 33. Representação gráfica do efeito da interação CE na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

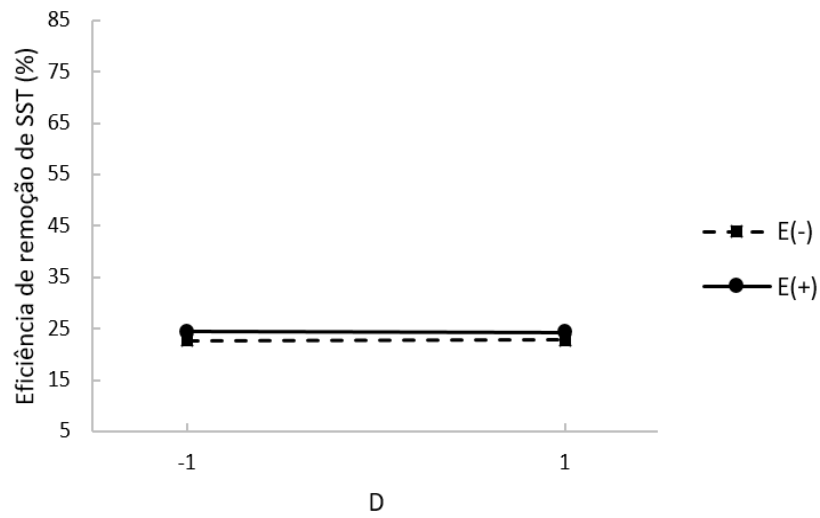


Figura IV. 34. Representação gráfica do efeito da interação DE na eficiência de remoção de SST – ETAR Y

ANEXO V – Gráficos de efeitos factor B fixo nível baixo

➤ Efeitos Principais

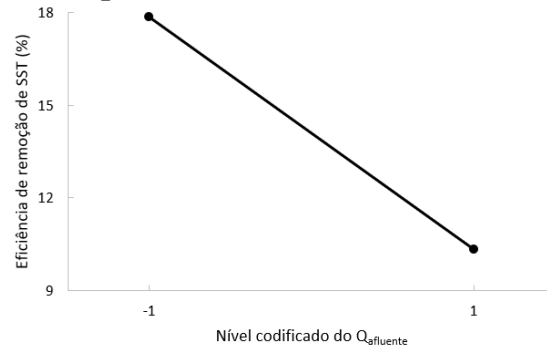


Figura V. 11. Representação gráfica do efeito do caudal afluyente (A) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

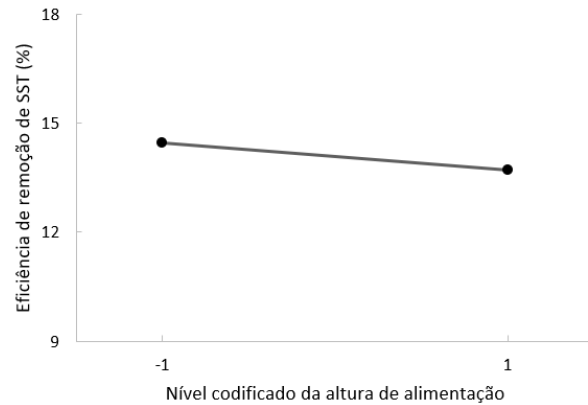


Figura V. 12. Representação gráfica do efeito da altura de alimentação (C) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

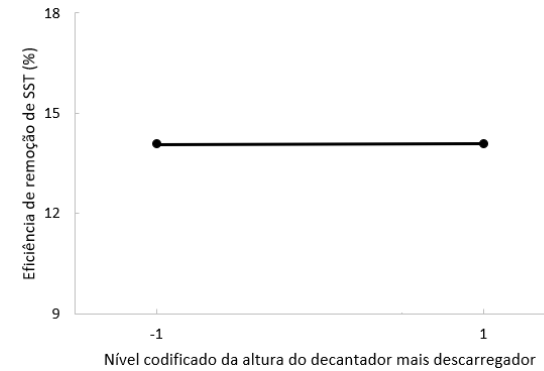


Figura V. 13. Representação gráfica do efeito da altura do decantador mais descarregador (D) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

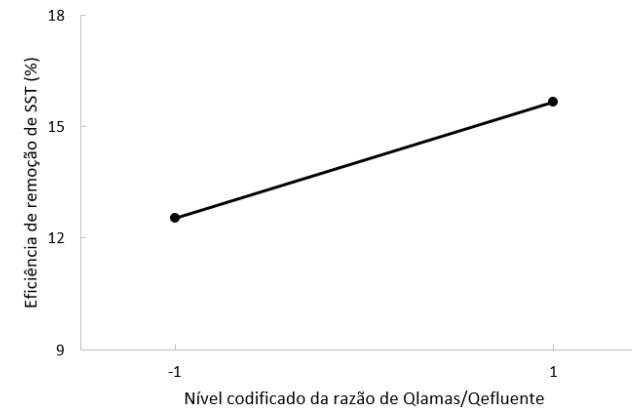


Figura V. 14. Representação gráfica do efeito da razão de $Q_{lamas}/Q_{efluente}$ (E) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

➤ Efeitos das interações de 2 factores

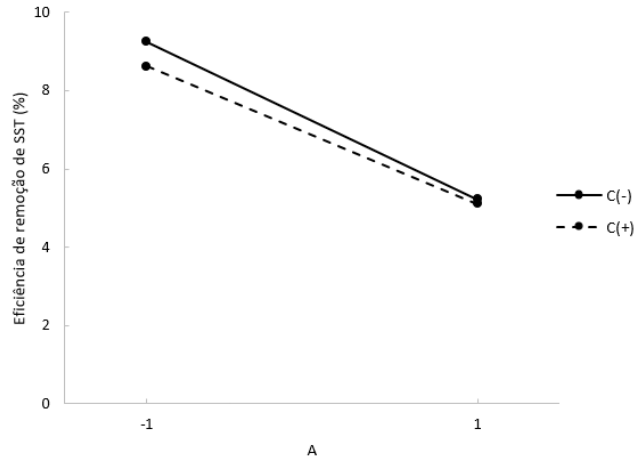


Figura V. 15. Representação gráfica do efeito da interacção AC na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

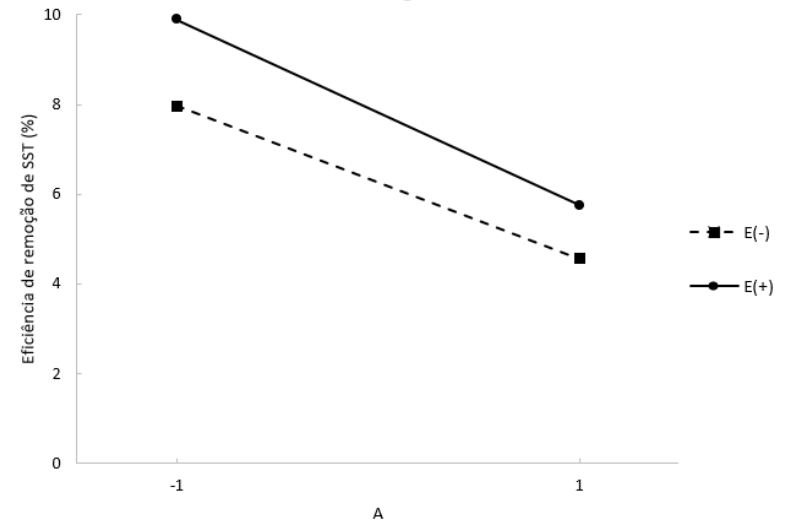


Figura V. 17. Representação gráfica do efeito da interacção AE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

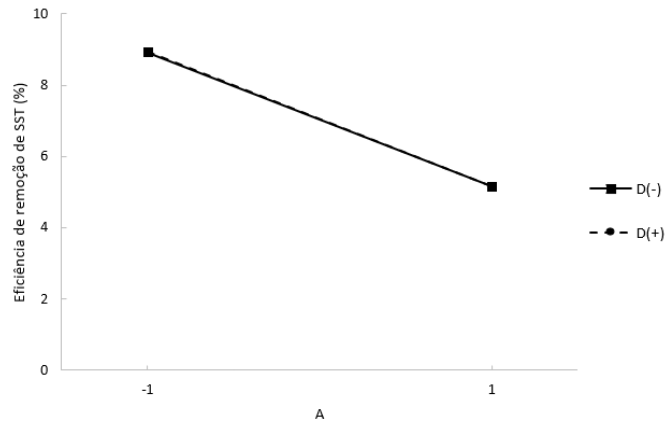


Figura V. 16. Representação gráfica do efeito da interacção AD na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

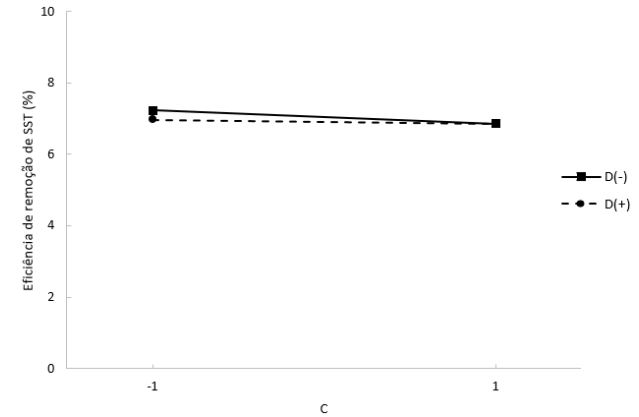


Figura V. 18. Representação gráfica do efeito da interacção CD na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

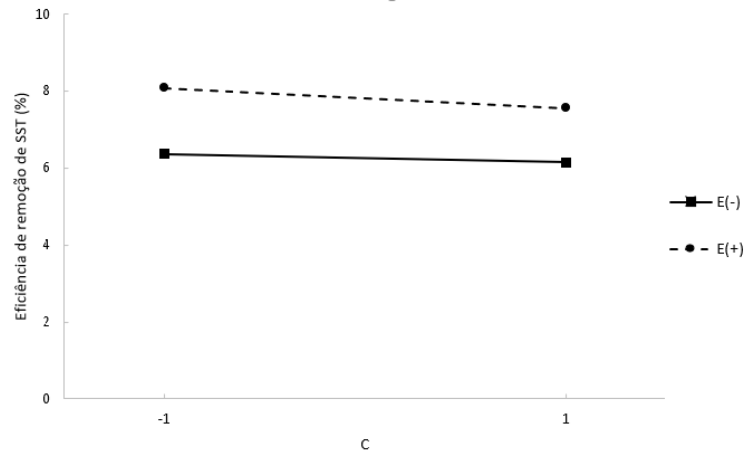


Figura V. 19. Representação gráfica do efeito da interacção CE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

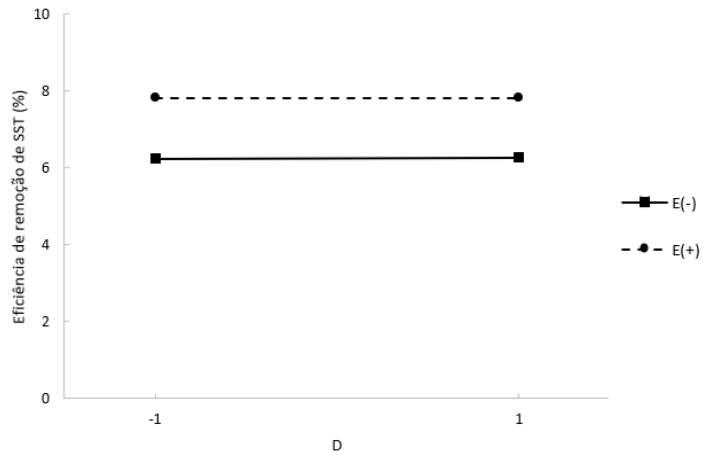


Figura V. 20. Representação gráfica do efeito da interacção DE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

ANEXO VI – Gráficos de efeitos factor B fixo nível alto

➤ Efeitos Principais

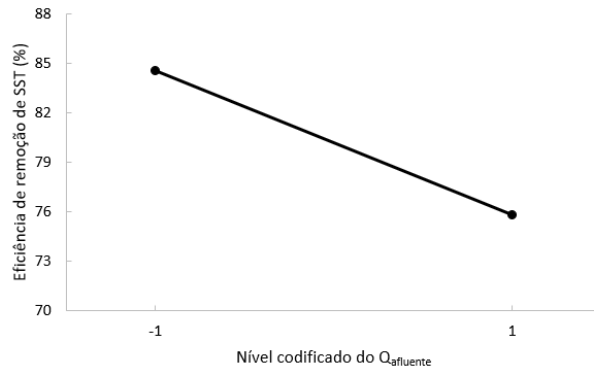


Figura VI. 11. Representação gráfica do efeito do caudal afluente (A) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

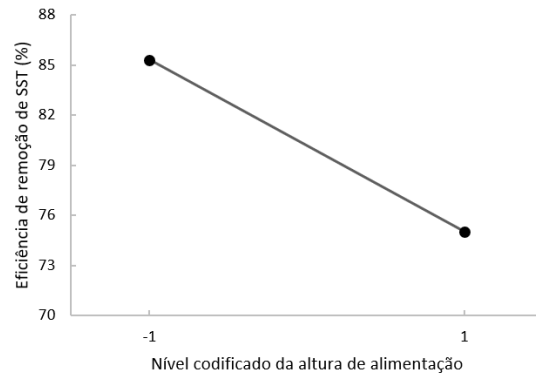


Figura VI. 12. Representação gráfica do efeito da altura de alimentação (C) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

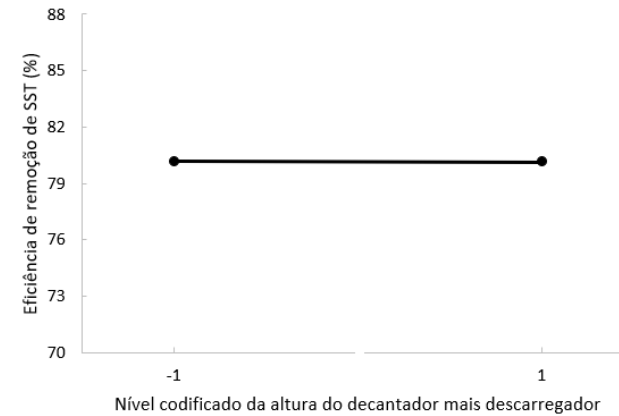


Figura VI. 13. Representação gráfica do efeito da altura do decantador mais descarregador (D) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

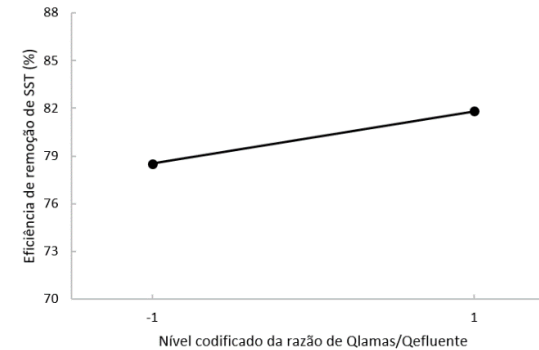


Figura VI. 14. Representação gráfica do efeito da razão de $Q_{lamas}/Q_{efluente}$ (E) na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

➤ Efeitos das interações de 2 factores

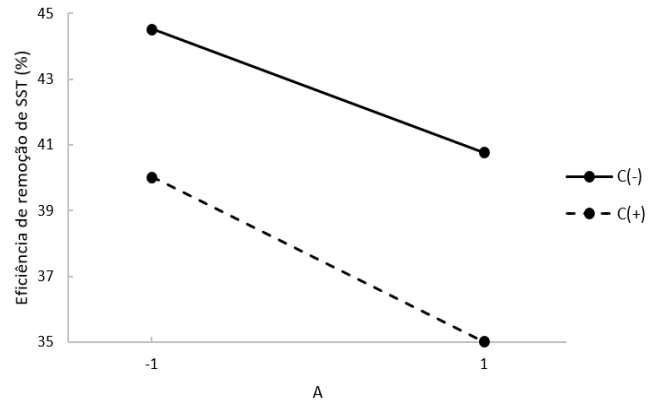


Figura VI. 15. Representação gráfica do efeito da interação AC na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

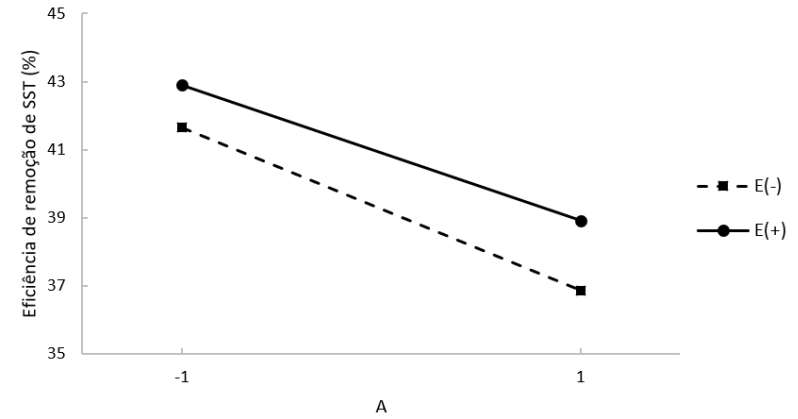


Figura VI. 17. Representação gráfica do efeito da interação AE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

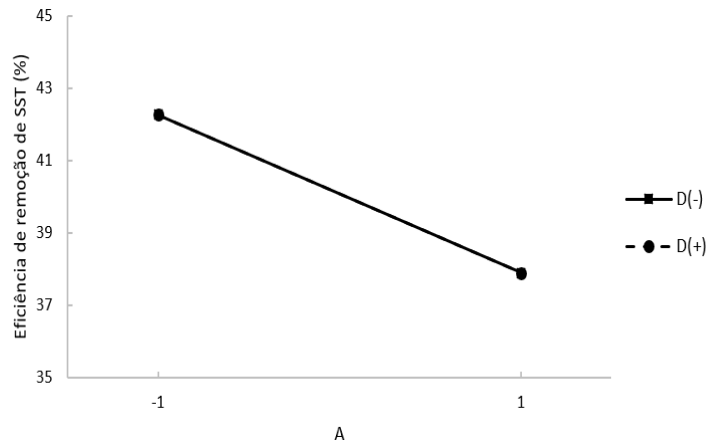


Figura VI. 16. Representação gráfica do efeito da interação AD na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

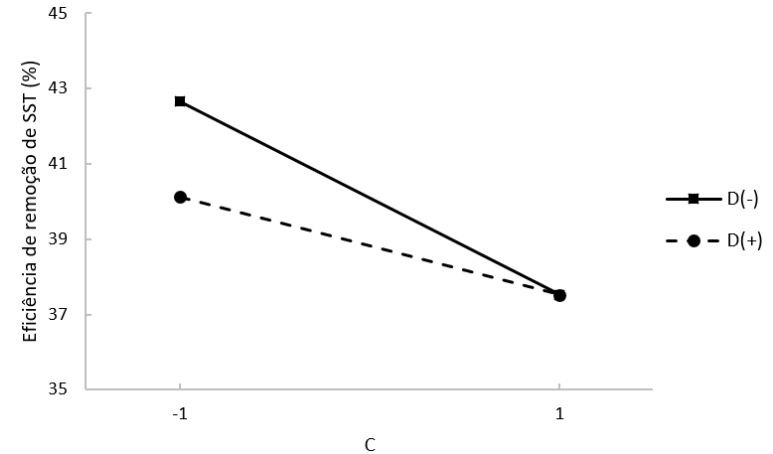


Figura VI. 18. Representação gráfica do efeito da interação CD na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

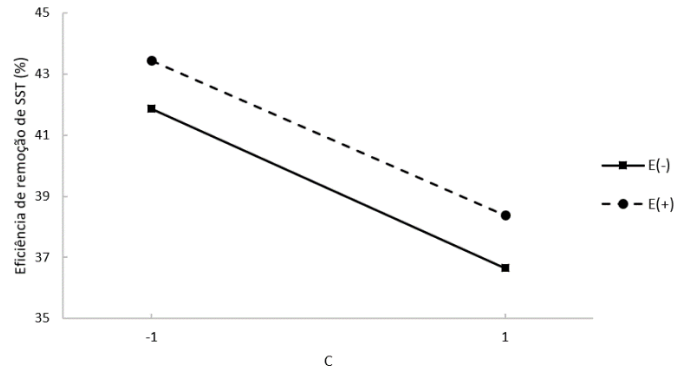


Figura VI. 19. Representação gráfica do efeito da interacção CE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

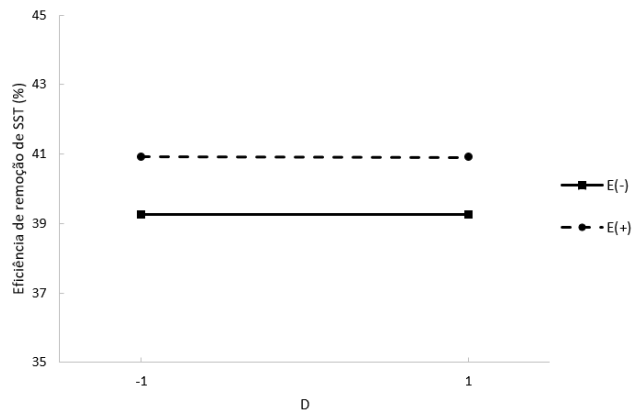


Figura VI. 20. Representação gráfica do efeito da interacção DE na eficiência de remoção de SST, com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

ANEXO VII – Verificação dos pressupostos da ANOVA modelo com factor B nível baixo

O modelo da equação 14 foi utilizado para obter a eficiência de remoção de SST (%) prevista e o valor dos resíduos, para o factor B fixo nos níveis baixo, que se encontra na Tabela VII.1.

Tabela VII. 1. Valores simulados e previstos através do modelo de regressão com factor B fixo no nível baixo e resíduos – ETAR Y

Teste	Nível da variável codificada				Eficiência de remoção de SST (%)		Resíduo
	A	C	D	E	Simulada	Prevista	
1	-1	-1	-1	-1	16,28	16,56	16,56
2	1	-1	-1	-1	9,19	9,25	9,25
5	-1	1	-1	-1	15,54	15,30	15,30
6	1	1	-1	-1	9,06	9,01	9,01
9	-1	-1	1	-1	16,34	16,56	16,56
10	1	-1	1	-1	9,19	9,25	9,25
13	-1	1	1	-1	15,54	15,30	15,30
14	1	1	1	-1	9,07	9,01	9,01
17	-1	-1	-1	1	20,66	20,42	20,42
18	1	-1	-1	1	11,69	11,63	11,63
21	-1	1	-1	1	18,91	19,16	19,16
22	1	1	-1	1	11,34	11,40	11,40
25	-1	-1	1	1	20,66	20,42	20,42
26	1	-1	1	1	11,69	11,63	11,63
29	-1	1	1	1	18,91	19,16	19,16
30	1	1	1	1	11,34	11,40	11,40

Pela Figuras VII. 1. podemos verificar que os resíduos apresentam distribuições normais.

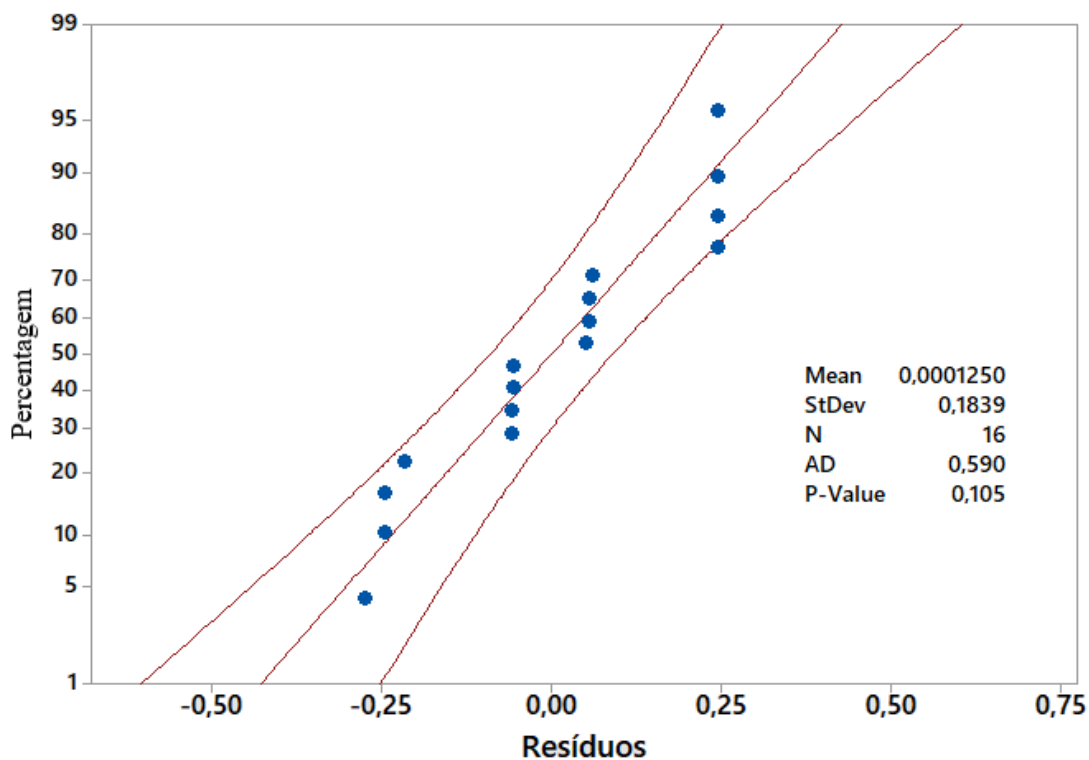


Figura VII. 4. Distribuição normal dos resíduos com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

Na figura VII. 2. não se verifica a existência de estruturas especiais, pelo que a variância é considerada constante.

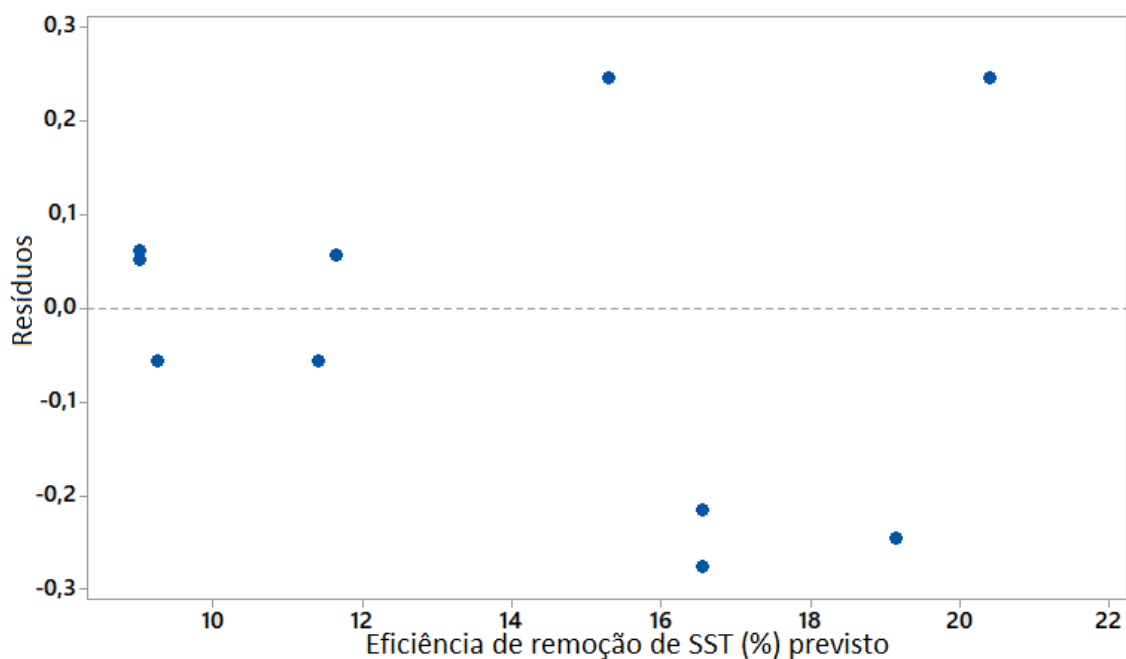


Figura VII. 5. Distribuição dos resíduos em função da eficiência de remoção de SST (%) prevista com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

A Figura VII. 3. os resíduos apresentam tendência na distribuição mostrando correlação entre as observações.

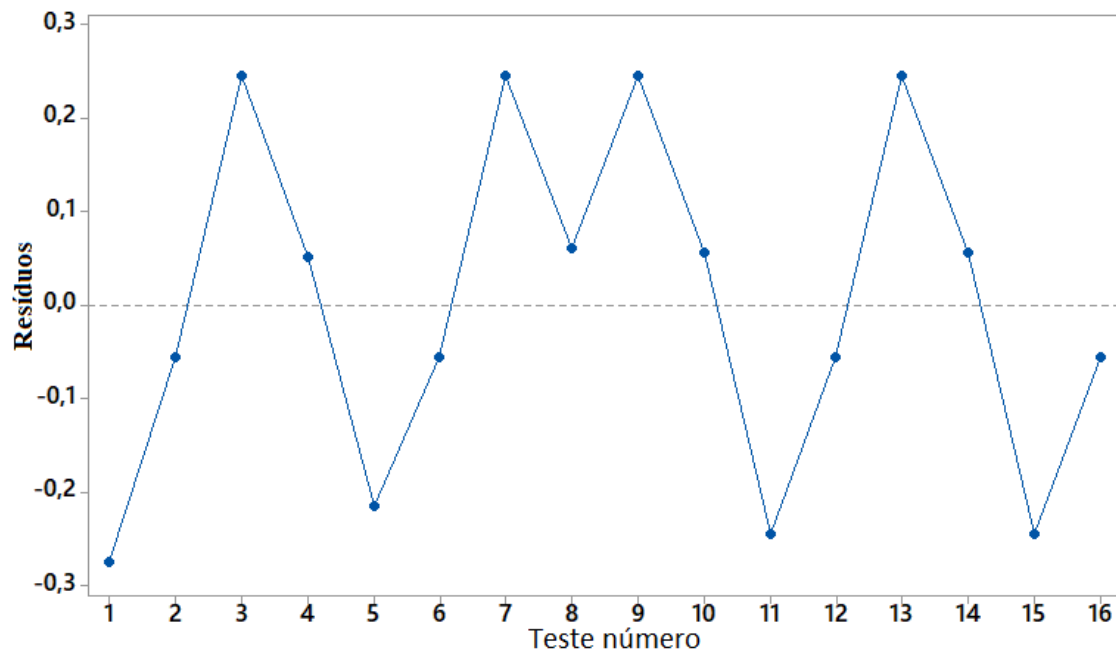


Figura VII. 6. Distribuição dos resíduos em função do teste (tempo) com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

ANEXO VIII – Verificação dos pressupostos da ANOVA modelo com factor B nível alto

O modelo da equação 15 foi utilizado para obter a eficiência de remoção de SST (%) prevista e o valor dos resíduos, para o factor B fixo no nível alto, encontrando-se na Tabela VIII.1.

Tabela VIII. 1. Valores simulados e previstos através do modelo de regressão com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

Teste	Nível da variável codificada				Eficiência de remoção de SST (%)		Resíduo
	A	C	D	E	Simulada	Prevista	
3	-1	-1	-1	-1	87,95	87,81	0,14
4	1	-1	-1	-1	79,52	79,51	0,01
7	-1	1	-1	-1	78,65	78,80	-0,15
8	1	1	-1	-1	67,96	67,97	-0,01
11	-1	-1	1	-1	87,95	87,81	0,14
12	1	-1	1	-1	79,52	79,51	0,01
15	-1	1	1	-1	78,65	78,80	-0,15
16	1	1	1	-1	67,96	67,97	-0,01
19	-1	-1	-1	1	90,15	90,30	-0,14
20	1	-1	-1	1	83,61	83,62	-0,01
23	-1	1	-1	1	81,43	81,29	0,15
24	1	1	-1	1	72,10	72,09	0,01
27	-1	-1	1	1	90,15	90,30	-0,14
28	1	-1	1	1	83,60	83,62	-0,02
31	-1	1	1	1	81,43	81,29	0,15
32	1	1	1	1	72,10	72,09	0,01

Pela Figura VIII.1 pode-se verificar que os resíduos seguem uma distribuição normal, pela razão mencionada nos casos anteriores.

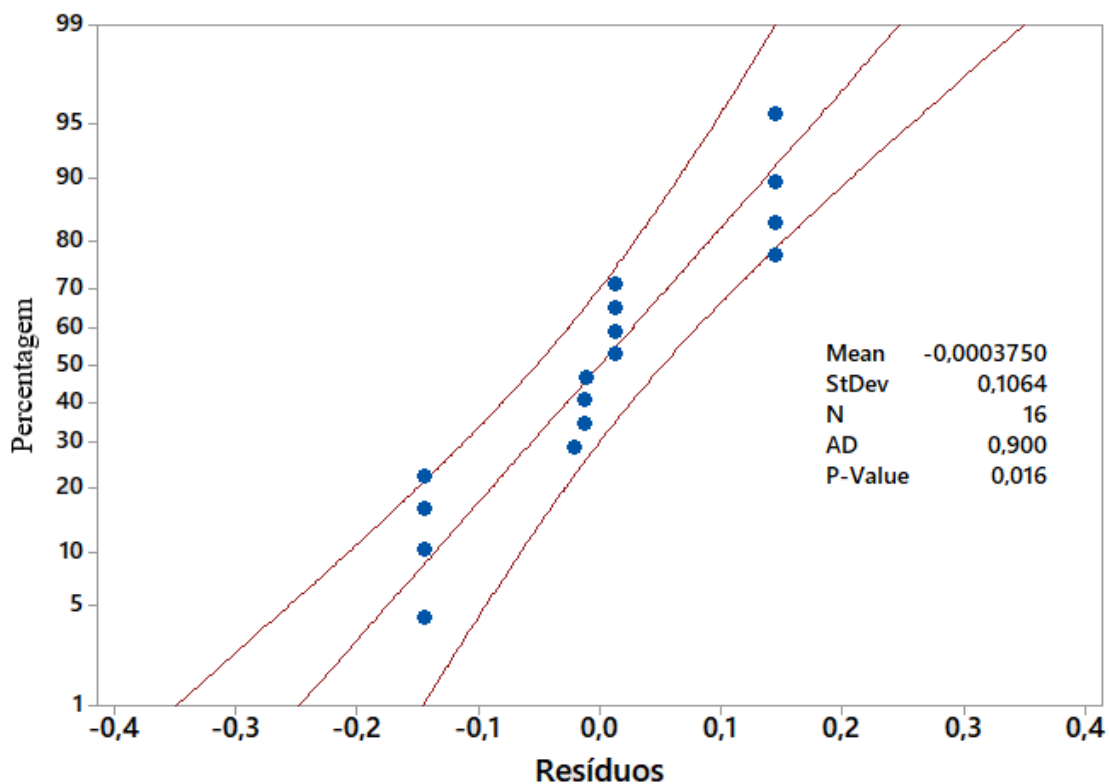


Figura VIII. 4. Distribuição normal dos resíduos com factor B fixo no nível alto– ETAR Y

Através da Figura VIII. 2 verifica-se que a variância é constante, uma vez que não se observa nenhum tipo de estruturas.

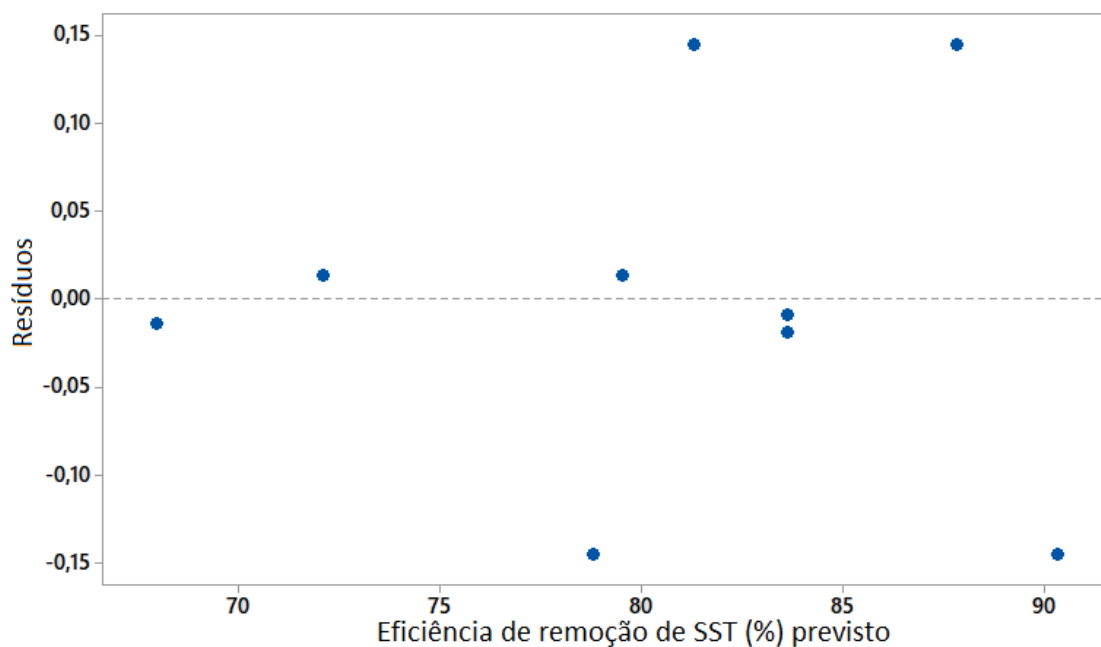


Figura VIII. 5. Distribuição dos resíduos em função da eficiência de remoção de SST (%) prevista com factor B fixo no nível baixo – ETAR Y

A figura 37 apresenta tendência na distribuição, não podendo ser afirmado que as amostras são independentes, evidenciando correlação entre as observações.

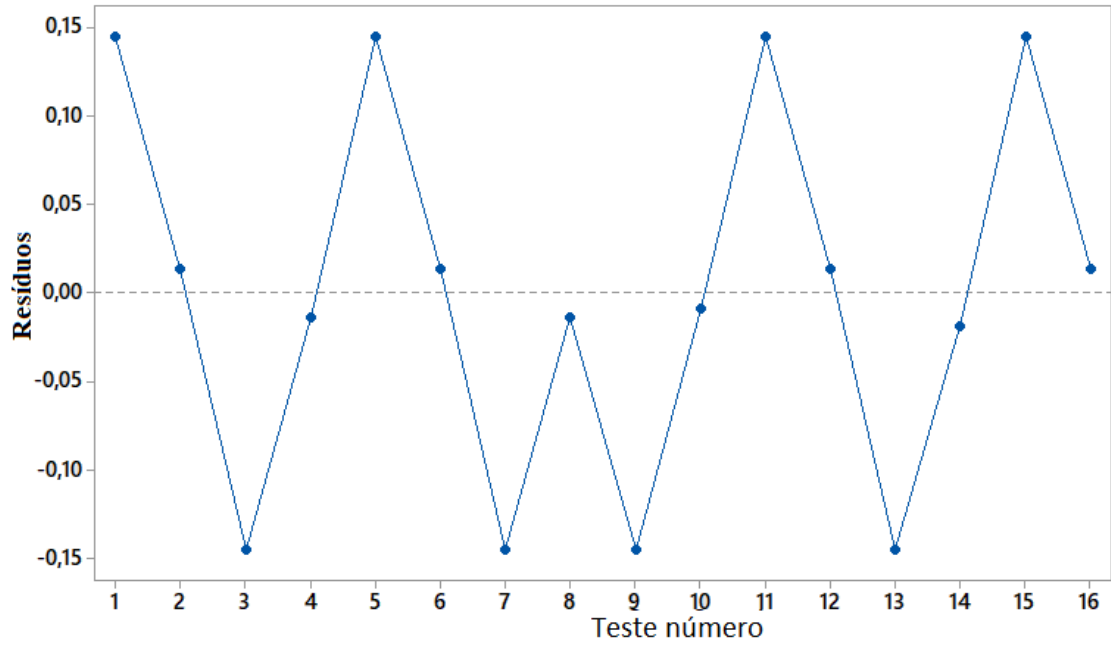


Figura VIII. 6. Distribuição dos resíduos em função do teste (tempo) com factor B fixo no nível alto – ETAR Y

ANEXO IX – Balanço ao decantador Primário – ETAR X

Na Figura IX. 1 apresenta-se um esquema, com os valores médios de caudais e concentrações de SST para o balanço ao decantador primário.

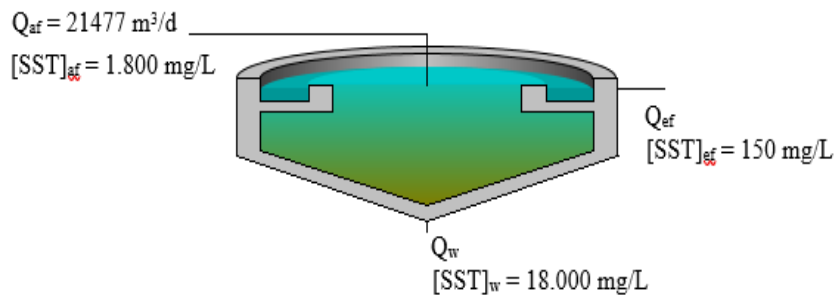


Figura IX. 2. Esquema para balanço ao decantador primário

Simbologia utilizada no esquema:

- Q_{af} – Caudal afluyente ao decantador primário
- Q_{ef} – Caudal efluente do decantador primário
- Q_w – Caudal de lamas primárias
- $[SST]_{af}$ – Concentração de SST afluyente ao decantador primário
- $[SST]_{ef}$ – Concentração de SST efluente do decantador primário
- $[SST]_w$ – Concentração de SST nas lamas primárias

- Determinação do caudal efluente e do caudal de lamas

$$\begin{cases} Q_{af} = Q_{ef} + Q_w \\ Q_{af}[SST]_{af} = Q_w[SST]_w + Q_{ef}[SST]_{ef} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_{ef} = 21477 - Q_w \\ 21477 \times 1800 = 150 \times Q_{ef} + 18000 \times Q_w \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_{ef} = 21087 - Q_w \\ Q_w = \frac{21477 \times 1800}{18000 - 150} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_{ef} = 21477 - 1985,27 = 17491,73 \text{ m}^3/\text{d} \\ Q_w = 1985,27 \text{ m}^3/\text{d} \end{cases}$$

- Determinação da razão $Q_{lamas}/Q_{efluente}$

$$Q_{lamas}/Q_{efluente} = \frac{1985,7}{19491,7} \times 100 = 10,2 \%$$

ANEXO X – Resumo e Poster da comunicação apresentada no Encontro Luso-Galego de Química 2017

Integração da Simulação e Planeamento Fatorial no Tratamento de Águas Residuais – Decantação Primária

Daniela M. Martins^{1,*}, M. T. Santos¹, Isabel M. João¹

¹Área Departamental de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal

*dmamartins90@gmail.com

O tratamento de águas residuais (AR) visa a proteção da saúde pública e do ambiente e realiza-se em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). Nas ETAR a AR é submetida a uma fileira de tratamento que integra diversas operações e processos unitários, entre as quais se encontra a decantação primária. Esta operação de separação sólido-líquido é essencialmente aplicada na remoção de sólidos suspensos totais (SST) da AR [1].

A modelação e a simulação têm sido amplamente aplicadas em estudos de tratamento de AR, uma vez que permitem testar diversos cenários que dificilmente poderiam ser avaliados em condições à escala real. Assim no presente trabalho foi aplicado o *software* de simulação GPS-X [2], que permite implementar esquemas de tratamento de AR.

O objetivo deste trabalho consistiu na otimização da eficiência de remoção de SST, na decantação primária em duas ETAR da região de Lisboa, com tipologia de decantadores e populações servidas distintas. A estratégia de experimentação usada envolveu vários fatores e com recurso ao planeamento fatorial foi possível determinar as variáveis que mais influenciam a eficiência da sedimentação. Para tal os dados foram analisados com recurso a métodos estatísticos, tendo sido testada a validade do modelo.

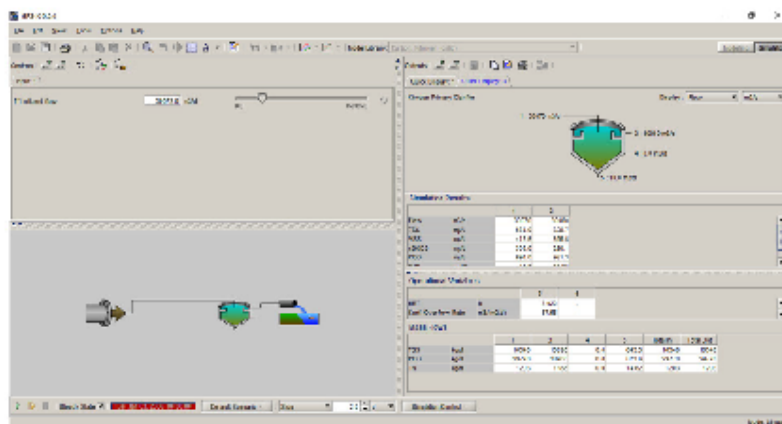


Fig.1. Exemplo de simulação da decantação primária no *software* GPS-X

Agradecimentos

Agradece-se ao Eng. Luis Gomes e a todas as Entidades Gestoras do saneamento de águas residuais.

Referencias

- [1] Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. .in Wastewater Engineering - Treatment and Reuse. (Metcalf & Eddy Inc, Ed.) (5th Eds), 2013.
- [2] Hydromantis. GPS-X Technical Reference. Toronto, Canada: Hydromantis, 2013.
- [3] Montgomery, D. C.. Design and Analysis of Experiments (8th Eds). John Wiley & Sons, Inc.. 2013.

Integração da Simulação e Planeamento Factorial no Tratamento de Águas Residuais – Decantação Primária
Daniela M. Martins¹, M. T. Santos¹, Isabel M. João¹

¹ Área Departamental de Engenharia Química, ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal.

*dmamartins90@gmail.com



ISEL
INSTITUTO SUPERIOR DE
ENGENHARIA DE LISBOA

RESUMO

O tratamento de águas residuais (AR) visa a protecção da saúde pública e do ambiente e realiza-se em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). Nas ETAR a AR é submetida a uma fileira de tratamento que integra diversas operações e processos unitários, entre as quais se encontra a decantação primária. Esta operação de separação sólido-líquido é essencialmente aplicada na remoção de sólidos suspensos totais (SST) da AR [1].

A modelação e a simulação têm sido amplamente aplicadas em estudos de tratamento de AR, uma vez que permitem testar diversos cenários que dificilmente poderiam ser avaliados em condições à escala real. Assim no presente trabalho foi aplicado o software de simulação GPS-X [2], que permite implementar esquemas de tratamento de AR.

O objectivo deste trabalho consistiu na optimização da eficiência de remoção de SST, na decantação primária em duas ETAR da região de Lisboa, com tipologia de decantadores e populações servidas distintas. A estratégia de experimentação usada envolveu vários factores e com recurso ao planeamento factorial foi possível determinar as variáveis que mais influenciam a eficiência da sedimentação. Para tal os dados foram analisados com recurso a métodos estatísticos. Posteriormente pretende-se testar a validade do modelo.

INTRODUÇÃO

Nas ETAR as águas residuais são sujeitas a diversos níveis de tratamento, entre os quais se encontra o tratamento primário, onde se recorre à operação de decantação, promovendo a remoção de SST da água residual.

A decantação primária ocorre em tanques denominados por decantadores, podendo ser circulares ou rectangulares.

A simulação consiste em realizar experiências num modelo, cujo objectivo é poder testar tão facilmente e convenientemente como nos sistemas reais. Quando não é possível experimentar no sistema real, a simulação é a técnica disponível para a análise do comportamento do sistema. Assim a simulação pode ser utilizada para proceder a análise e projecto de sistemas reais [2].

O desenho de experiências (DOE) ou planeamento de experiências assenta num conjunto de técnicas estatísticas usadas na análise de problemas da qualidade e na melhoria continua de produtos e processos produtivos [3].

METODOLOGIA

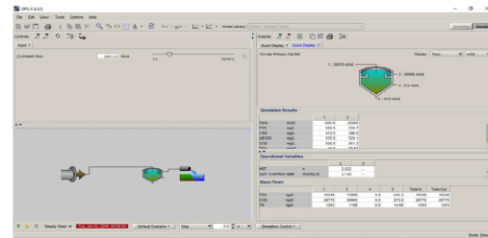
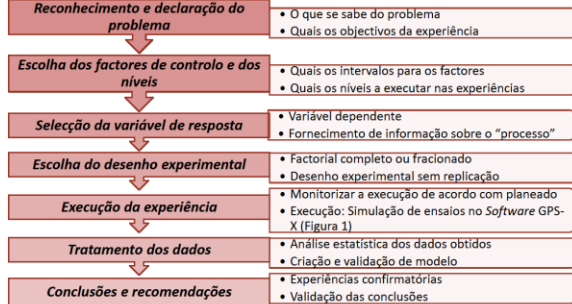


Figura 1: Exemplo de simulação da decantação primária no software GPS-X

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para optimizar a decantação primária é necessário identificar quais as variáveis que influenciam esta operação, encontrando-se na Tabela 1, as variáveis experimentais para a ETAR X e ETAR Y, com os níveis de funcionamento e codificado.

De forma a avaliar de que modo os factores e as suas interacções podem contribuir para o aumento da eficiência de remoção de SST (%) foi aplicado um modelo de planeamento factorial completo, com cinco factores, testados a dois níveis e sem replicação. Os testes foram efectuados recorrendo ao software GPS-X. Na Tabela 2, são apresentados os resultados da eficiência de remoção de SST (%) simulada, para cada combinação dos factores escolhidos.

Recorrendo a métodos de análise estatística foi possível obter os modelos de regressão para as ETAR X e Y, expressões 1 e 2, respectivamente, permitindo determinar quais os factores que influenciam a resposta, assim como os níveis óptimos de funcionamento (Tabela 3).

Tabela 2: Estudo dos cinco factores experimentais e valor de eficiência de remoção de SST (%) simulados para a ETAR X e ETAR Y

ETAR/ Factor	I	a	b	ab	c	ac	bc	abc	d	ad	bd	abd	cd	acd	bcd	abcd	e	ae	be	abe	ce	ace	bce	abce	de	ade	bde	abde	cde	acde	bcde	abcde
ETAR X	77	68	90	85	59	51	75	67	78	69	90	85	59	51	75	67	81	74	91	88	81	54	77	70	81	74	91	88	62	54	77	70
ETAR Y	16	9	88	80	16	9	79	68	16	9	88	80	16	9	79	68	21	12	90	84	19	11	81	72	21	12	90	84	19	11	81	72

$$Ef. rem. de SST (\%) = 73,726 - 4,025A + 6,635B - 8,127C + 2,122E \quad (1)$$

$$Ef. rem. SST (\%) = 47,129 - 4,071A + 33,041B - 2,755C + 1,606E - 2,381BC \quad (2)$$

Tabela 3: Condições óptimas de funcionamento para as ETAR X e Y

Factor	Variável	Nível codificado
A	Q_a (m ³ /d)	-1
B	[SST] _{afluente} (mg/l)	+1
C	H_a (m)	-1
E	Razão Q_{av}/Q_a (%)	+1

O ajuste entre os valores simulados e previstos pelos modelos foi realizada recorrendo a métodos gráficos, evidenciando uma elevada concordância (ETAR X: R²=0,9824; ETAR Y: R²=0,9996).

Na Tabela 4, são apresentadas as eficiências de remoção de SST (%) prevista pelo modelo para cada ETAR, assim como o valor simulado no teste correspondente às condições óptimas. Nesta tabela, são ainda apresentados os intervalos de confiança e de previsão para novas observações, indicando que a sua média se encontra dentro dos limites do primeiro intervalo, sendo que cada observação individual apresentará um valor dentro do segundo intervalo.

Referências bibliográficas

- [1] Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2013). Wastewater Engineering - Treatment and Reuse. (Metcalf & Eddy Inc. Ed.) (4a Edição).
- [2] Hydromantis. (2013). GPS-X Technical Reference. Toronto, Canada: Hydromantis.
- [3] Montgomery, D. C. (2013). Design and Analysis of Experiments (8th Ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Tabela 1: Variáveis experimentais com níveis de funcionamento e codificados para a ETAR X e ETAR Y

Variável/Nível	Funcionamento	Codificado	
		ETAR X	ETAR Y
Caudal afluente – Q_a (m ³ /d) (A)	Mínimo	19.563	7.293
	Máximo	30.073	12.923
[SST] _{afluente} (mg/l) (B)	Mínimo	240	51
	Máximo	550	670
Altura de alimentação do afluente – H_a (m) (C)	Mínimo	1	-1
	Máximo	3	1
Altura do descarregador – H_d (m) (D)	Mínimo	0,05	-1
	Máximo	0,2	1
Razão Q_{av}/Q_a (%) (E)	Mínimo	10	-1
	Máximo	40	1

Tabela 4: Valores de eficiência prevista e simulada, intervalos de confiança e previsão a 95% para cada ETAR nas condições óptimas

ETAR	Eficiência de remoção de SST (%)		Intervalo de confiança (95%)	Intervalo de previsão (95%)
	Previsto	Simulado		
A	94,63	91,36	[91,74; 97,53]	[86,75; 100]
B	90,98	90,15	[90,29; 91,68]	[89,23; 92,74]

CONCLUSÕES

Os estudos foram realizados recorrendo ao software de simulação GPS-X (versão 6.0), implementando apenas o afluente (Q_a , SST_a), a geometria do decantador primário (circular e rectangular) e o efluente (Q_e , SST_e).

Nos modelos obtidos a eficiência de remoção de SST (%) apresenta valores superiores nas seguintes condições:

- Q_a (factor A) e H_a (factor C) nos seus níveis mais baixos;
- [SST]_a (factor B) e Razão Q_{av}/Q_a (factor E) nos seus níveis mais elevados;
- H_d (factor D) não tem influência na variável de resposta.

Nas condições ótimas previstas pelos modelos verifica-se que a ETAR X deve apresentar eficiências de remoção de SST superior a 86,75% e a ETAR Y entre 89,23% e os 92,74%.

Agradecimentos

Agradece-se ao Eng. Luís Gomes das Águas do Tejo e Atlântico e a todas as Entidades Gestoras do saneamento de águas residuais.

