

Estudo da Implementação de um sistema de vigilância e alarme num recurso hídrico

Hélder Ernesto Silva Gonçalves

Novembro de 2011

Orientador: Doutor Christopher A. Sá

Co-orientador: Doutor Luís M. Silva

Agradecimentos

Os meus agradecimentos destinam-se a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, como para toda a minha formação académica.

Assim,

Ao Doutor Christopher Sá, agradeço a orientação, disponibilidade, transmissão de saber, dedicação e incentivo que se tornaram uma mais-valia na realização deste trabalho.

Ao Doutor Luís Silva, agradeço a ajuda e disponibilidade demonstrada em todos os momentos.

Agradeço a todos os professores do departamento de Engenharia Química que contribuíram para a minha formação académica.

Aos meus Pais, agradeço a oportunidade, a ajuda e a presença assídua em todos os momentos.

Ao meu irmão e familiares, agradeço a preocupação e dedicação que sempre demonstraram.

À minha Inês, agradeço todo o amor, carinho, força, paciência, dedicação, compreensão e amizade demonstrada em todos estes anos que passaram.

Ao Doutor Rui Boaventura, agradeço a disponibilidade em ceder o fluorímetro para a realização deste trabalho.

Ao senhor Nuno Olivença, colaborador da Orm, agradeço toda a disponibilidade demonstrada ao longo da realização deste trabalho.

À ARH Norte, agradeço toda a disponibilidade demonstrada para ajudar em tudo o que fosse necessário.

Resumo

Neste trabalho estudou-se a implementação de um sistema de vigilância e alerta da qualidade da água de um recurso hídrico, para um possível caso de poluição.

Em 25 de Agosto de 2008 foram derramadas 4 toneladas de ácido clorídrico acidentalmente para as águas do rio Febros. Este rio situa-se no concelho de Vila Nova de Gaia e é um pequeno afluente do rio Douro, tendo cerca de 14 km de extensão e tem a particularidade de atravessar o Parque Biológico de Gaia. A falta de uma rápida intervenção e da existência de um plano de ação levou a que parte da fauna e flora fosse destruída. Por este motivo realizou-se este estudo que se baseou na criação de um sistema de vigilância e alerta a ser implementado neste rio.

A informação da hidrogeometria do rio e da capacidade de transporte e dispersão de poluentes é indispensável para o bom funcionamento deste sistema. O coeficiente de dispersão longitudinal é um parâmetro muito importante no estudo da qualidade da água. Recorreu-se à utilização da *Rodamina WT* como marcador, determinando assim a evolução da sua concentração ao longo do tempo e espaço. No cálculo do coeficiente de dispersão foi utilizado o modelo *Transient Storage*, que demonstrou ser um bom modelo de ajuste aproximando-se dos valores medidos em campo. Para três estações diferentes com distâncias de 290, 390 e 1100 metros do ponto de injeção, obtiveram-se valores de coeficiente de dispersão de 0,18, 0,15 e 0,39 m²/s respetivamente. Os valores do ajuste expressos sob a forma de coeficiente de correlação foram 0,988, 0,998 e 0,986, para a mesma ordem de estações.

A constante de rearejamento do rio foi também determinada recorrendo ao método dos marcadores inertes, utilizando o propano como marcador gasoso. A constante determinada próximo de Casal Drijo, entre 2 estações de amostragem a 140 e 290 m do local de injeção, foi de 13,4 dia⁻¹.

Com os resultados do coeficiente de dispersão e da constante de rearejamento para além da velocidade e caudal da corrente do rio conseguir-se-á construir o modelo de simulação e previsão de um possível poluente. O sistema de vigilância a implementar sugere-se assim que seja construído por duas partes, uma de análise de evolução da nuvem de poluição e plano de ação outra de monitorização contínua e emissão de alerta. Após uma análise do investimento à implementação deste sistema chegou-se à conclusão que o valor de investimento é de 15.182,00 €.

Abstract

The aim of this work was to study the implementation of a water quality monitoring system in Febros river with a possibility of an alert emission for a possible pollution case.

In 25th of August of 2008 4 tonnes of hydrochloric acid were accidentally spilled in Febros river. The river is located in Vila Nova de Gaia and is a small affluent of Douro river, has about 14 km of extension and crosses Biological Park of Gaia. The fault of a plan of action caused the death of fauna and flora. For this reason this study was taken in order to create a vigilance and alert system to be implemented in this river.

The information of river hydrogeometry and capacity of transport and dispersion of pollutants are indispensable for the good working of this system. *Rodamine WT* was used as a tracer determining the evaluation of its concentration in time and space. *Transient Storage* model was used to determine the dispersion coefficient, adjusting well the concentration values measured in field. For three different sampling stations, with distances of 290, 390 and 110 meters from injection point, dispersion coefficients were 0.18, 0.15 e 0.39 m²/s, respectively. Correlation coefficients values were 0.988, 0.998 e 0.986 for the same order of stations.

The reaeration coefficient of the river was also determined, using the method of an inert tracer (propane) and *Rodamine WT* as a reference tracer. The constant value in the river section studied was 13.4 day⁻¹.

With the results of the dispersion and reaeration coefficients, superficial velocity, time of travel and stream flow rate it is possible to create a simulation model which will predict a plan of action. Thus, the vigilance system will have a continuous monitoring of some water quality parameters, a comparison with restricted values and alert emission in case of accident, and the possibility to simulate a pollution cloud in order to establish as action plan. Finally, this system has an actual cost of 15,182.00 €.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	2
1.1.1 História do rio Febros e sua Importância	3
1.1.2 Acidente ambiental no rio Febros	5
1.1.3 Modelação da qualidade da água em rios.....	6
1.1.4 Sistema de vigilância e alarme.....	7
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Modelo para simular o transporte de um contaminante no rio	7
1.2.2 Sistema de vigilância e alerta.....	8
1.3 Estrutura	8
2. Estado atual dos conhecimentos	9
2.1 Sistema de vigilância e alerta	10
2.1.1 Importância do sistema de vigilância.....	11
2.1.2 Componentes	11
2.1.3 Funcionamento	13
2.2 Simulação de um contaminante no rio.....	13
2.2.1 Mecanismos de Transporte de Poluentes	14
2.3 Rearejamento superficial	21
2.3.1 Constante de rearejamento.....	22
2.3.2 Fatores que afetam o rearejamento	23
2.3.3 Método do patamar	23
2.3.4 Previsão do caudal de propano e quantidade de <i>Rodamina WT</i> a injetar ...	25
3. Materiais e Métodos.....	28
3.1 Método de injeção de corantes em rios	29
3.2 Corantes fluorescentes e suas propriedades	29
3.3 Características do rio Febros.....	32
3.3.1 Determinação das características hidrogeométricas do rio Febros	33

3.4 Método da injeção de propano para determinação da constante de rearejamento	34
3.4.1 Propriedades do Propano	35
4. Resultados e Discussão.....	37
4.1 Determinação da dispersão de um poluente no rio pelo modelo TS.....	38
4.2 Determinação da Constante de Rearejamento.....	44
4.3 Sistema de Vigilância e alerta no rio Febros.....	48
4.3.1 Parâmetros a monitorizar	52
5. Análise do investimento	54
6. Conclusões.....	55
Bibliografia.....	56
Anexos	- 1 -
Anexo A – Determinação do caudal do rio nas diversas estações.....	- 2 -
Anexo B – Determinação da constante de rearejamento.....	- 4 -
Anexo C – Curva de calibração do propano.....	- 5 -
Anexo D – Concentração de <i>Rodamina WT</i> nas diferentes estações.....	- 6 -
Anexo E – Concentração propano nas diferentes estações.....	- 11 -
Anexo F – Determinação dos parâmetros pelo modelo TS.....	- 13 -
Anexo G – Características do Rotâmetro.....	- 22 -

Índice de Figuras

Figura 1 - Pequeno curso do Febros situado no pontão d'Alheira onde podemos verificar a reduzida profundidade.....	3
Figura 2 - Brasões representativos de todas as Juntas de Freguesia por onde passa o rio Febros havendo em cada um deles uma alusão ao rio.....	4
Figura 3 - Curso do Febros onde se pode verificar a enorme diversidade de flora presente ao longo do rio.....	4
Figura 4 - O Monumento à Padeira de Avintes, escultura em bronze assente numa base construída em granito lavrado, é da autoria do escultor Henrique Moreira e foi inaugurada em 1974.....	5
Figura 5 - Imagem que demonstra as consequências do ácido derramado.....	6
Figura 6 - Exemplo de hardwares presentes num sistema de vigilância e alerta.....	12
Figura 7 - Representação da dispersão longitudinal de uma substância.....	15
Figura 8 - Mecanismos do Modelo Transient Storage. As setas indicam o movimento das substâncias entre o canal principal e as zonas de estagnadas. ¹⁸	19
Figura 9 - Sobreposição das curvas de passagem de sucessivas injeções instantâneas (adaptado de Thiago Augusto Formentini, 2010).....	24
Figura 10 - Gráfico usado para prever a quantidade de gás propano a injetar no rio para obter um determinado patamar (Kilpatrick et al., 1989).....	26
Figura 11 - Gráfico utilizado para estimar a quantidade de <i>Rodamina WT</i> a ser injetada instantaneamente no rio para produzir uma concentração no pico mais a jusante de 1 µg/L (Kilpatrick et al., 1989).....	27
Figura 12 - Imagem representativa da injeção instantânea do marcador fluorescente efetuada neste trabalho.....	29
Figura 13 - Fórmulas estruturais dos principais corantes fluorescentes utilizados como marcadores em aplicações hidrológicas. ²³	31
Figura 14 - Fórmula estrutural da <i>Rodamina WT</i> . ¹⁷	32
Figura 15 - Esquema representativo da determinação da área recorrendo à regra dos trapézios (z representa a profundidade do rio e x a largura da margem).	33
Figura 16 - Imagem representativa da injeção de propano efetuada neste trabalho....	35
Figura 17 - Imagem representativa de um troço do rio Febros onde foi realizada a primeira campanha. Aqui está indicado o local de injeção e as três estações de recolha de amostra com a respetiva distância ao ponto de injeção.....	38
Figura 18 - Gráfico representativo da concentração de <i>Rodamina WT</i> em função do tempo com ajuste pelo método TS para a primeira estação.....	39

Figura 19 - Gráfico representativo da concentração de Rodamina WT em função do tempo com ajuste pelo método TS para a segunda estação.....	40
Figura 20 - Gráfico representativo da concentração de Rodamina WT em função do tempo com ajuste pelo método TS para a terceira estação.....	41
Figura 21 - Gráfico representativo da concentração de Rodamina WT nas três estações de recolha de amostras.....	41
Figura 22 - Gráfico representativo da concentração de <i>Rodamina WT</i> em função do tempo com ajuste pelo modelo TS para a primeira estação.....	42
Figura 23 - Gráfico representativo da concentração de <i>Rodamina WT</i> em função do tempo com ajuste pelo método TS para a segunda estação.....	43
Figura 24 - Imagem representativa de um troço do rio Febros onde foi realizada a segunda campanha. Neste troço está indicado o local de injeção e as duas estações de recolha de amostra com a respetiva distância ao ponto de injeção.....	44
Figura 25 - Gráfico representativo do patamar de propano na primeira estação de amostragem.....	45
Figura 26 - Gráfico representativo do patamar de propano na segunda estação de amostragem.....	46
Figura 27 - Gráfico representativo da concentração de propano nas duas estações...	47
Figura 28 - Imagem do local a ser implementado o sistema de vigilância e alerta no rio Febros.....	48
Figura 29 - Imagem representativa da sonda modelo WQC - 24 a utilizar para monitorização do rio Febros.....	49
Figura 30 - Unidade de Telemetria Remota A753 addWAVE GSM/GPRS a utilizar no sistema de vigilância e alerta.....	49
Figura 31 - Painel solar de alimentação da UTR A755 GSM/GPRS.....	50
Figura 32 - Estação de Base A850 que irá receber o sinal enviado pela UTR A755 GSM/GPRS.....	50
Figura 33 - Imagem representativa do medidor de velocidade OTT SLD.....	51
Figura 34 - Software addVANTAGE Pro 6.1 utilizado para consultar os parâmetros monitorizados pela sonda WQC- 24.....	51
Figura 35 - Sistema de Vigilância e alerta instalado no rio Febros.....	52
Figura 36 - Gráfico representativo da curva de calibração do propano que relaciona a concentração com a área do pico do cromatograma.....	5 -
Figura 37 - Imagem representativa da função principal para a aplicação do modelo TS em <i>matlab</i>	- 13 -
Figura 38 - Imagem representativa da equação do modelo TS inserida em <i>Matlab</i>	- 14 -

Figura 39 - Características do Rotâmetro. - 22 -

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores de vários parâmetros para as duas estações no dia 8 de Junho de 2011.....	42
Tabela 2 - Valores de vários parâmetros para as duas estações no dia 29 de Junho de 2011.....	43
Tabela 3 - Valores de concentração de propano obtidos para diferentes tempos na primeira estação de recolha.....	45
Tabela 4 - Valores de concentração de propano obtidos para diferentes tempos na 2ª estação de recolha.....	46
Tabela 5 - Valores necessários de cada estação para a determinação do coeficiente de rearejamento.....	47
Tabela 6 - Descrição do modelo e preço do material a utilizar no sistema de vigilância e alerta.....	54
Tabela 7 - Concentrações dos padrões de propano e as respetivas áreas dos cromatogramas.....	5 -
Tabela 8 - Concentrações de <i>Rodamina WT</i> ao longo do tempo na estação 1.....	6 -
Tabela 9 - Concentrações de <i>Rodamina WT</i> ao longo do tempo na estação 2.....	7 -
Tabela 10 - Concentrações de <i>Rodamina WT</i> ao longo do tempo na estação 3.....	8 -
Tabela 11 - Concentrações de <i>Rodamina WT</i> ao longo do tempo na estação 1.....	9 -
Tabela 12 - Concentrações de <i>Rodamina WT</i> ao longo do tempo na estação 2.....	10 -
Tabela 13 - Concentrações de propano ao longo do tempo na estação 1 e respetiva concentração média.....	11 -
Tabela 14 - Concentrações de propano ao longo do tempo na estação 2 e respetiva concentração média.....	12 -
Tabela 15 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 1.....	15 -
Tabela 16 - Determinação de valores de concentração intermédios pelo modelo TS para a estação 1.....	16 -
Tabela 17 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 2.....	17 -
Tabela 18 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 3.....	18 -
Tabela 19 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 1.....	19 -
Tabela 20 - Determinação de valores de concentração intermédios pelo modelo TS para a estação 1.....	20 -
Tabela 21 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 2.....	21 -

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Em 2008 ocorreu um acidente de viação que teve como consequência o derrame de 4 toneladas de ácido clorídrico para as águas do rio Febros. O rio contaminado diminuiu o seu pH bruscamente, destruindo a maioria da sua fauna. A solução nesse momento foi injetar milhares de metros cúbicos de água para ajudar a diluir todo o ácido, no entanto sem o efeito pretendido porque primeiro a quantidade de água foi insuficiente e depois porque a nuvem de ácido foi apenas arrastada. O modo de agir perante este incidente demonstrou falta de conhecimento em relação às características hidrogeométricas do rio.

Este trabalho surge após alguns estudos realizados pelo ISEP em 2009/2010 com o objetivo de estudar hidrogeometricamente o rio Febros. Recorrendo à literatura científica verifica-se que o estudo do comportamento de um marcador no rio, simulando uma possível descarga, fornece uma das melhores fontes de informação para verificação e validação de modelos hidráulicos utilizados em estudos de qualidade da água e protecção ambiental. O marcador utilizado anteriormente e agora foi a *Rodamina WT*, pelas suas características conservativas e de baixa toxicidade ambiental.

Em paralelo e para melhorar o modelo de transporte e de degradação de um contaminante no rio determinou-se pelo método da injeção do propano a constante de rearejamento, ou seja, a capacidade que o rio tem em restituir o oxigénio consumido na oxidação do poluente.

Após estes dois estudos, houve a necessidade de ir mais longe e estudar a implementação de um sistema de vigilância e alarme no mesmo rio. Esta ferramenta terá a possibilidade de monitorizar a qualidade do rio durante 24 horas e sempre que surja um caso de poluição indicará onde, quando e como intervir.

1.1.1 História do rio Febros e sua Importância

O rio Febros é um pequeno afluente do rio Douro, situado no concelho de Vila Nova de Gaia, com cerca de 14 km de extensão e 35,4 km² de bacia hidrográfica, a profundidade do rio é reduzida (ver figura 1) e varia de acordo com a pluviosidade.



Figura 1 - Pequeno curso do Febros situado no pontão d'Alheira onde podemos verificar a reduzida profundidade.

Este rio é o maior curso de água que nasce e desagua no concelho de Vila Nova de Gaia.¹ Nasce em Seixezelo, no Parque das Corgas, e desagua na margem esquerda do rio Douro, mais precisamente no cais do Esteiro. Ao longo do seu percurso atravessa as freguesias de Seixezelo, Olival, Pedroso, Vilar de Andorinho e Avintes, passando pelo parque biológico de Gaia.²

O rio Febros é também identificado como o rio dos castores, aludindo a uma possível presença de castores ao longo das suas águas. O desaparecimento deste roedor leva-nos para uma época longínqua, não se vislumbrando hoje em dia qualquer vestígio deste animal. Com o fim do povoamento deste animal nos rios já não fazia sentido o nome "*Castor fiber*", dando origem a Febros.³

É no brasão de todas as juntas de freguesia, como se pode ver na figura 2, que o rio está identificado e se encontra homenageado, estando em todos representado através de uma banda esmaltada a azul, reflexo celestial e sinónimo de justiça, doçura, lealdade e dignidade das gentes da terra.⁴



Figura 2 - Brasões representativos de todas as Juntas de Freguesia por onde passa o rio Febros havendo em cada um deles uma alusão ao rio.

O rio Febros em toda a sua extensão alberga também uma enorme quantidade e variedade de fauna e flora. Possui uma grande diversidade de aves, anfíbios, mamíferos e peixes, destacando-se a lontra, desaparecida desde os anos 80 do século XX e recentemente introduzida pelo Parque biológico de Gaia (ver figura 3). Relativamente à flora, ao longo do rio é possível identificar plantas silvestres, amieiros, choupos, salgueiros, sobreiros, entre outros.⁵



Figura 3 - Curso do Febros onde se pode verificar a enorme diversidade de flora presente ao longo do rio.

Desde que o Homem se apercebeu da enorme importância deste recurso, começou a interferir no percurso normal destas linhas de água. Os desvios das águas foram utilizados para os campos de cultivo visando aumentar a produção agrícola, para que a população pudesse sustentar as suas quintas, vinhas e animais.

A moagem de cereais era uma atividade económica muito importante, era a principal atividade económica de Avintes e utilizava o rio como fonte de energia para movimentar os moinhos. A broa de Avintes (ver figura 4), também designada de Boroa

de Avintes, é um dos tipos de pão com maior tradição em Portugal, sendo claramente muito apreciado na gastronomia Portuguesa.⁶



Figura 4 - O Monumento à Padeira de Avintes, escultura em bronze assente numa base construída em granito lavrado, é da autoria do escultor Henrique Moreira e foi inaugurada em 1974.

1.1.2 Acidente ambiental no rio Febros

Em 25 de Agosto de 2008 as águas da ribeira de Jaca e do rio Febros ficaram contaminadas com ácido clorídrico derramado após um despiste de um camião cisterna na A29. Foram aproximadamente 4 toneladas de ácido que afetaram o rio, levando à interdição de cerca de um terço do rio, curso fluvial que atravessava o Parque Biológico de Gaia. A utilização da água para rega foi desaconselhada, assim como para consumo humano e animal.

O rio Febros que recentemente tinha sido recuperado pela autarquia viu a sua fauna e flora ser morta, consequência dos elevados níveis de acidez provocados por este produto tóxico. “Num dia, a água do rio contava com um pH de 7.1, quase boa para ser bebida, um dia depois tinha acidez de 3,2”, explicação dada pelo autarca.



Figura 5 - Imagem que demonstra as consequências do ácido derramado.

Para tentar reduzir tão grande impacto foram lançados milhares de metros cúbicos de água durante o dia para aumentar o caudal e facilitar a diluição, acabando por não ser a medida suficiente para cessar o problema.

No final a Câmara Municipal de Gaia enviou a fatura de todos os trabalhos de limpeza das áreas afetadas para a empresa responsável pelo camião acidentado. A empresa admitiu que fez tudo o que podia ter sido feito (remoção do camião e limpeza da via pública), querendo desmarcar-se dos danos causados porque estes só se fizeram notar 24 horas depois do acidente.⁷

1.1.3 Modelação da qualidade da água em rios

A modelação matemática é um instrumento cada vez mais utilizado e imprescindível por todos que se encontram ligados à gestão dos recursos hídricos porque permite avaliar a eficácia de programas de controlo de poluição. Estes modelos são amplamente utilizados na previsão da distribuição espacial e temporal da concentração de um poluente.

Há questões consideradas essenciais no exercício de modelação, como a necessidade de dispor de um conjunto de dados de monitorização adequados à calibração com representatividade e elevado grau de confiança, assim como um grau de conhecimento dos pressupostos e das formulações.

No caso em estudo, a aplicação de um modelo no rio Febros, permitiu estimar os valores da velocidade média de escoamento e do coeficiente de dispersão longitudinal. Este coeficiente é capaz de indicar a capacidade do rio em dispersar os poluentes derramados segundo uma única direcção.⁸

1.1.4 Sistema de vigilância e alarme

Os recursos hídricos têm como principal objetivo garantir o abastecimento de água em quantidade e qualidade suficientes para satisfazer todos os usuários. O aparecimento de ferramentas e técnicas que ajudam essa gestão é fundamental, como foi o sistema de vigilância.

Um sistema de vigilância e alarme permite monitorizar em tempo real a qualidade da água num ponto de um rio ou albufeira. Os locais a serem monitorizados podem ser escolhidos estrategicamente obedecendo a critérios ambientais específicos como zonas protegidas ou outras particularmente sensíveis à poluição. Os dados dos parâmetros monitorizados são então transmitidos para o sistema de controlo que geralmente opera 24 horas por dia, para que assim se possa agir e prevenindo qualquer situação de poluição.⁹

Os problemas de qualidade que geralmente surgem podem ser causados por descargas de esgotos domésticos, descargas industriais intencionais ou então acidentes acidentais.

1.2 Objetivos

Este trabalho teve como principal finalidade a implementação de um sistema de vigilância e alerta no rio Febros de modo a poder monitorizar a qualidade da sua água e alertar sempre que houver casos de poluição, protegendo assim o Parque Biológico de Gaia.

1.2.1 Modelo para simular o transporte de um contaminante no rio

A simulação do transporte de um contaminante no rio necessita do cálculo do coeficiente de dispersão e da constante de rearejamento. Os resultados de simulações prévias ou em situação de acidente são capazes de indicar a localização da nuvem de poluente e, assim, saber onde atuar.

1.2.2 Sistema de vigilância e alerta

O estudo da implementação do sistema de vigilância e alerta que monitorize a qualidade da água do rio Febros, terá de ter a capacidade de emitir um alerta sempre que haja parâmetros que não estejam dentro dos limites.

1.3 Estrutura

Este trabalho está organizado em capítulos. No primeiro capítulo dá-se a conhecer alguma da história do rio Febros e os objetivos do trabalho. Em seguida, no segundo capítulo, pode-se compreender melhor o conceito e a necessidade da realização deste trabalho. Os métodos de injeção de corantes e propano em rios e os materiais utilizados neste trabalho são apresentados no terceiro capítulo. Para o quarto capítulo reservam-se os resultados experimentais, os parâmetros a serem monitorizados, o local a ser implementado o sistema de alarme, a análise de investimento e as medidas a tomar em caso de alarme. Por fim, no sexto capítulo, são abordadas as principais conclusões e sugeridas algumas ideias para trabalhos a serem realizados no futuro.

2. Estado atual dos conhecimentos

2.1 Sistema de vigilância e alerta

Existem já implementados no Mundo diferentes tipos de sistemas de vigilância que são constituídos de maneira diferente mas com o mesmo propósito, o de proteger os recursos hídricos da poluição.

O rio Reno é um dos mais importantes rios da Europa, onde já houve alguns problemas na qualidade da sua água. O acidente de *Sandoz* (1986) teve um grande impacto negativo nas companhias responsáveis pela água de consumo humano e originou a criação de um plano de ajuda para minimizar os efeitos provocados por essa poluição. O plano consistiu na criação de um sistema de alerta e previsões de transporte de poluentes. As redes de informação criadas recebem rápido e de uma forma relevante toda a informação de pontos de análise no rio. Há uma rede de alarme em que alguns parâmetros de qualidade e quantidade da água são monitorizados por estações criadas para esse efeito e comparados com os valores limite, tentando dessa forma conhecer as substâncias poluentes, e uma rede hidrológica que contém informações fundamentais para prever a dispersão dos poluentes e saber onde e quando atuar para minimizar os efeitos de um poluente. Com estas duas redes, a passagem de um foco de poluição por um determinado ponto de monitorização, fica registada a hora e respetiva concentração, facilitando a atuação das autoridades competentes.¹⁰

Um outro sistema de vigilância foi implementado no rio Danúbio. Criou-se o “*Environmental Programme for the Danube River Basin*” (EPDRB) pelos países dessa Bacia Hidrográfica, que cooperam no desenvolvimento das medidas para superar os possíveis problemas ambientais. O programa “*Accident Emergency Warning System*” (AEWS) foi desenvolvido com o objetivo de comunicar qualquer mudança na qualidade dessa água, em casos de acidentes ambientais transfronteiriços. Em todos os países foram estabelecidos Centros de alerta denominados de PIAC (Principal International Alert Centres) que contêm um sistema de comunicação internacional por satélite. O principal papel dos PIACs consiste num aviso de emergência, o PIAC situado no país onde se deu o acidente, envia uma mensagem inicial para o país a jusante com as características e impactos esperados. Em cada PIAC cooperam três unidades de emergência, a de comunicação que trabalha 24 horas e onde são recebidas/enviadas as mensagens, a de especialistas que avalia os efeitos e impactos de uma situação de poluição e a de tomada de decisões.¹¹

2.1.1 Importância do sistema de vigilância

Um sistema de vigilância e alerta, com o objetivo de controlar a qualidade da água, permite obter informação em tempo real em cada ponto de medida de um rio ou de uma albufeira, facilitando a gestão desse recurso hídrico.

Os problemas de descargas de esgotos domésticos ou industriais, intencionais ou não, podem ser facilmente detetados e resolvidos por este tipo de sistemas. Para *Broer* (1991), apesar do sistema de alarme no rio Reno necessitar de melhorias contínuas, este é sem dúvida uma ferramenta valiosa para a prevenção de danos que podem ser irreparáveis no rio e por consequência de enorme valor ecológico e económico.¹⁰

Na última década a China tem sofrido frequentes contaminações nas águas dos seus recursos hídricos originadas por descargas involuntárias, o que resultou em severas consequências para o abastecimento de águas para consumo humano. Por este motivo, a China tem investido fortemente no desenvolvimento de tecnologias de prevenção de acidentes de poluição da água, por exemplo em 2008 o governo incluiu o controlo da poluição da água como um dos 16 projetos mais importantes.¹² Na década de 90 foram construídas aproximadamente 551 estações de monitoramento de água no rio Yangtze.¹³

Os avanços significativos realizados ao longo dos anos no desenvolvimento de tecnologias de monitorização da qualidade da água são uma demonstração da importância destes programas para o meio ambiente. Cada vez mais existe a necessidade de acompanhar de perto a qualidade das águas e estes sistemas de vigilância estão preparados para isso, tendo a capacidade de detectar em tempo real e durante todo o dia os casos de poluição.¹⁴

2.1.2 Componentes

Um sistema de vigilância contém uma ampla gama de serviços e informações e, por isso, tem de estar munido de diferentes tipos de hardware e software. É recorrendo a estes componentes que o sistema é capaz de realizar funções como: monitorização automática da água, entrada/armazenamento/saída de dados, visualização em tempo real e avaliação, controlo e alerta de riscos.

Existem diferentes tipos de componentes que podem ser usados em sistemas de alerta (ver figura 6).

Relativamente ao hardware, um dos componentes essenciais é o computador, que controlará o sistema. O software de gestão da informação recolhida instalado no computador pode ser considerado o cérebro do sistema. Os sensores de monitorização são igualmente imprescindíveis e estão conectados ao computador por uma rede e uma porta RS485 ou uma placa de aquisição de dados I/O (input/output). Os sinais de saída podem ser responsáveis por controlos de válvulas ou disparos de alarmes.¹⁵

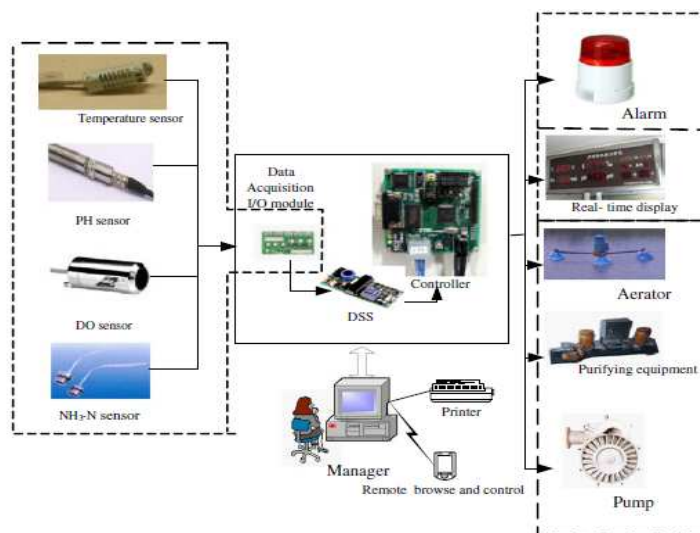


Figura 6 - Exemplo de hardwares presentes num sistema de vigilância e alerta.

A nível de hardware ou tecnologia, recentemente foi desenvolvido o *J-Mar Biosentry* que consiste numa técnica que permite monitorizar a microbiologia numa água em tempo real e durante 24 sobre 24 horas. Outros pequenos instrumentos de cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa (GC-MS), cromatografia líquida acoplada a espectrometria de massa (LC-MS) e cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) também têm sido utilizados. Em locais de difícil acesso, por exemplo existem tecnologias com sensores *wireless* ou recurso a painéis fotovoltaicos.

No que respeita a software existe o CANARY que avalia os dados recebidos da qualidade da água ao longo do tempo e usa técnicas matemáticas e estatísticas para verificar situações anómalas na água. O TEVA-SPOT (Threat Ensemble Vulnerability Assessment and Sensor Placement Optimization Tool) foi desenvolvido pela agência de protecção ambiental dos EUA (EPA) para apoiar a concepção de sistemas de alerta de contaminação. Este software oferece uma linha de comando com uma interface para ferramentas computacionais capaz de calcular os impactos de acidentes de poluição.¹⁴

Por fim, os softwares de informação geográfica como o GIS (*Geographic Information System*) ou de mapeamento como é o caso do *MapInfo* são usualmente utilizados.

2.1.3 Funcionamento

Um sistema eficaz, seguro e capaz de atingir os objetivos pretendidos tem de conter algum tipo de informação armazenada. Uma hipótese passa por elaborar um sistema que esteja dividido em duas redes de informação, conforme referido no sistema de vigilância do rio Reno.

Uma das redes é de controlo/alarme onde são recolhidas todas as informações obtidas nos pontos de monitorização, pelos vários sensores de análise. Estes dados são comparados com os legalmente permitidos e em caso de incumprimento o sistema envia um alerta.

A segunda rede de informação contém toda a informação fundamental para prever a dispersão dos poluentes e permite saber o local onde atuar para minimizar o impacto de um poluente. A rede possui uma base de dados com todas informações relativas ao rio em estudo, como caudal, velocidade superficial, declive, profundidade, largura, assim como uma informação sobre diferentes compostos químicos que poderão surgir no rio como poluentes e as respetivas medidas a tomar para remediação.

Quando os valores monitorizados diferem dos valores legalmente permitidos, o sistema emite um alerta e esta função ativa a segunda rede de informação do sistema. É localizado o foco de poluição e indicado o plano de ação para remediar os efeitos desse poluente.

2.2 Simulação de um contaminante no rio

A gestão de recursos hídricos envolve diagnóstico, monitorização e previsão de cenários futuros. Para auxiliar esta gestão, é importante a utilização de modelos matemáticos de simulação sobre a evolução temporal da concentração de um contaminante no recurso hídrico.

A utilização destes modelos permite também conhecer as variações sazonais da concentração de certos compostos (poluentes ou não) e descrever a sua

hidrodinâmica. Os modelos matemáticos de simulação necessitam ser calibrados, e como já foi referido, depois é possível prever a distribuição espacial e temporal da concentração de poluentes no curso de água, assim como estimar o local da descarga accidental ou não.

Embora sejam sempre simulações da realidade, se consistentes, estes modelos reduzem tempo e custo do plano de remediação. Para essa consistência é necessário que se determine a correta geometria do recurso hídrico, a velocidade média de escoamento e o coeficiente de dispersão longitudinal.¹⁶

2.2.1 Mecanismos de Transporte de Poluentes

Existem diversos mecanismos físicos, químicos e biológicos que alteram o comportamento e a concentração dos poluentes quando estes entram em contato com os cursos de água.

Uma substância poluente ao entrar em contato com o meio aquático sofre logo uma redução da sua concentração pelo efeito de diluição.

O movimento de transporte de um poluente, desde o ponto em que ele é introduzido até outros locais a jusante, faz com que a sua concentração varie no espaço e no tempo. Este transporte proporcionado pelo campo de velocidade da água denomina-se por advecção.

Outro mecanismo que está presente no transporte do poluente é a difusão. A concentração de substâncias dissolvidas ou em suspensão em meios aquáticos é função de dois processos que podem estar presentes e que são a difusão molecular e a difusão turbulenta. A difusão molecular resulta do movimento que ocorre da agitação térmica das partículas existentes no seio do recurso hídrico. A difusão turbulenta provoca uma mistura rápida das substâncias presentes e é mais frequente (é importante lembrar que a presença de turbulência pode ser negativa caso dificulte a sedimentação de partículas coloidais ou suspenda sedimentos do leito desse recurso).

Os mecanismos de advecção e difusão podem atuar em conjunto no transporte de poluentes num recurso hídrico e dão origem a um mecanismo denominado por dispersão.¹⁶

Modelo ADE – (Advection / Dispersion Equation)

A equação de advecção/dispersão é um modelo matemático unidimensional capaz de descrever o transporte e dispersão de poluentes num rio. Este modelo é deduzido a partir de um balanço de massa, onde os fluxos são regulados pela lei de *Fick*. Os parâmetros deste modelo têm de ser conhecidos em campo injetando um traçador, que pode ser a *Rodamina WT* pois tem propriedades fluorescentes, no curso de água em estudo. Assegurando-se que no momento de descarga em impulso da *Rodamina WT* não há dispersão transversal, é possível simplificar o modelo que passa a incluir apenas o conceito de dispersão longitudinal, ou seja, a dispersão de poluentes no sentido do fluxo (ver figura 7).

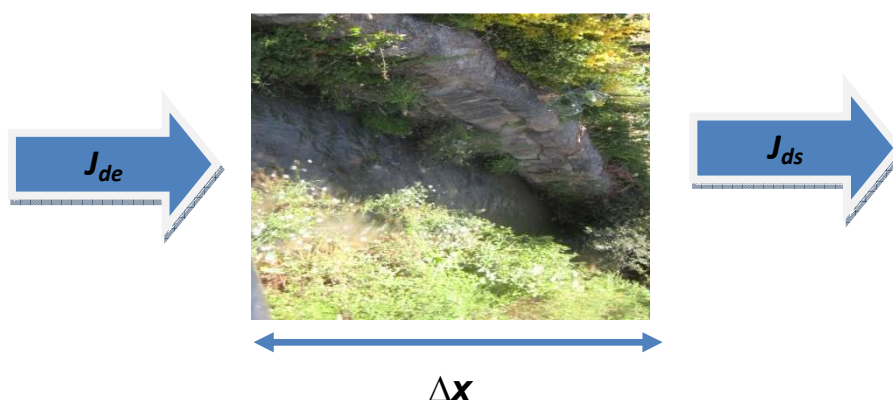


Figura 7 - Representação da dispersão longitudinal de uma substância.

De acordo com a lei de *Fick* e considerando que no início existe apenas o fenómeno da difusão vem:

$$J_d = -D_m \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad [1]$$

onde,

J_d – Fluxo ou taxa de transporte difusivo [$ML^{-2}T^{-1}$];

C – Concentração do constituinte [ML^{-3}];

D_m – Coeficiente de difusão molecular [L^2T^{-1}];

x – direcção na qual o processo se desenvolve [L].

De acordo com o esquema apresentado na figura 7, a variação de massa de uma substância é:

$$m_e - m_s = \frac{\partial m}{\partial t} \quad [2]$$

onde,

m_e - Massa de entrada

m_s - Massa de saída

Para um Δx muito pequeno a equação [2] pode ser reescrita para:

$$m_e - m_s = \frac{\partial(C.A.\Delta x)}{\partial t} \quad [3]$$

Ou ainda:

$$\frac{m_e}{A} - \frac{m_s}{A} = \frac{\partial C}{\partial t} \Delta x \quad [4]$$

Como por definição o fluxo J_d é o fluxo de massa difusivo numa secção de área A , [2] toma a forma de:

$$J_{de} - J_{ds} = \frac{\partial C}{\partial t} \Delta x \quad [5]$$

Aplicando a equação da continuidade para o volume de controlo (Δx), ver figura 7, fica:

$$J_{ds} = J_{de} + \frac{\partial J_d}{\partial x} \Delta x \quad [6]$$

Substituindo esta na equação anterior resulta a expressão:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -\frac{\partial C}{\partial t} \quad [7]$$

Combinando a equação [7] com a [1] tem-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad [8]$$

Dada uma injeção instantânea de massa M de contaminante, uniformemente distribuída numa secção transversal de área A , localizada em $x=0$, a solução diferencial da equação [8] tem as seguintes condições:

Condição 1: $C(x, 0) = M\delta(x)$

Condição 2: $C(\pm\infty, t) = 0$

em que $\delta(x)$ é a função *delta Dirac* e, fisicamente, representa uma unidade de massa de constituinte concentrada num espaço infinitamente pequeno. As propriedades desta função característica são:

$\delta(x) = 0$, excepto para $x=0$ (posição de descarga da massa M)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1 \quad [9]$$

Nestas condições a solução fundamental da equação da difusão é dada por:

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi D_m t}} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{4D_m t}\right)} \quad [10]$$

Esta equação é semelhante à expressão da *distribuição gaussiana* e pode-se aferir que existe um aumento da dispersão da substância com o aumento do tempo após a injeção instantânea em $t=0$.

Para uma distribuição normal, a função densidade de probabilidade da variável aleatória x é descrita por:

$$f dp(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)} \quad [11]$$

em que σ_x^2 representa a variância da distribuição espacial de $f dp(x)$.

Comparando [10] com [11] verifica-se que:

$$4\pi D_m t = 2\pi\sigma_x^2 \quad \text{e} \quad \sigma_x^2(t) = 2D_m t \quad [12]$$

Considere-se agora que os fenómenos de advecção e dispersão em que o fluido apresenta uma velocidade com componente U na direcção longitudinal.

O fluxo advectivo é dado por:

$$J_a = U \cdot C \quad [13]$$

A quantidade de substância transportada segundo uma dada velocidade de componente U tem em conta que: $C=C(x, t)$ e $J_a=J_a(x, t)$.

Da conservação da massa, o fluxo de massa com a presença da advecção e da dispersão é dada por:

$$J = UC - D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad [14]$$

Substituindo a equação [14] em [7] vem:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(UC - D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = - \frac{\partial C}{\partial t} \quad [15]$$

Ou

$$\frac{\partial C}{\partial t} = U \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad [16]$$

Esta equação é então conhecida como a equação da dispersão/advecção de cariz unidimensional e será utilizada na modelação do rio Febros.¹⁷

Com escoamento unidimensional, velocidade U constante segundo uma determinada direcção x , gradientes de concentração desprezáveis segundo direcções transversais, a solução da equação 16 fica:

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi Dt}} \cdot e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Dt}} \quad [17]$$

Modelo TS – (Transient Storage Model)

Os córregos ou rios, em ambientes urbanos ou rurais, apresentam zonas estagnadas devido a desvios e obstruções. Assim uma fração de água corrente entra nestas zonas estagnadas e é temporariamente retida antes de ingressar novamente no canal principal. Qualquer substância ao passar nestas zonas estagnadas, vai apresentar um atraso de tempo t relativamente ao corpo de água conforme se pode perceber por observação da figura 8.

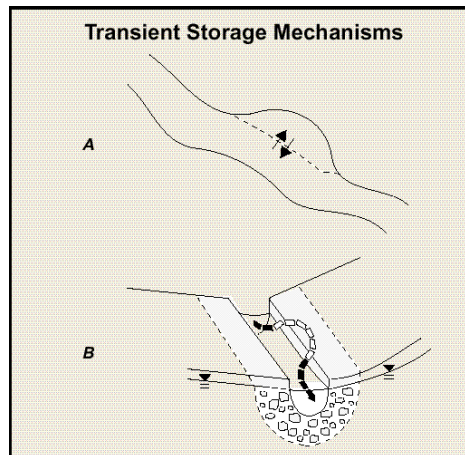


Figura 8 - Mecanismos do Modelo Transient Storage. As setas indicam o movimento das substâncias entre o canal principal e as zonas de estagnadas.¹⁸

O modelo TS divide o escoamento do rio em duas zonas distintas, isto é, uma delas é relativa ao seio do rio, que possui uma marcação média de marcador C , a outra refere-se aos locais estagnados, considerados perfeitamente e uniformemente agitados, assumindo assim uma concentração uniforme C_s . Estes locais estagnados possuem uma área total, A_s , não sendo considerados individualmente mas sim como um somatório de zonas estagnadas e no seio do rio assume-se uma área A .

Este modelo assume que existe apenas um único tipo de zonas estagnadas, perfeitamente agitadas caracterizadas por um único coeficiente de dispersão longitudinal. Aplicando o princípio da conservação da massa, assumindo a existência de uma acumulação de corante em locais estagnados, e segundo *Davis* e seus colaboradores (2000), o modelo de transporte pode ser representado por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = -\frac{1}{\chi^2} \frac{\partial C_s}{\partial \tau} \quad [18]$$

Os primeiros três termos são semelhantes aos da equação [16] enquanto o termo à direita é referente à zona de estagnação.

Nas zonas estagnadas o balanço de massa pode ser representado por:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{\chi^2}{\tau} (C - C_s) \quad [19]$$

em que:

$$\chi = \sqrt{\frac{A}{A_s}} \quad [20]$$

Assim χ representa uma medida da área efetiva das zonas estagnadas incorporadas numa só e T é o tempo que as moléculas de *Rodamina WT* demoram, em média, a passar das zonas estagnadas para o corpo do rio.

As equações [18] e [19] são respetivamente balanços de material efetuados, ao leito do rio e às zonas estagnadas. Para a primeira equação são necessárias duas condições fronteira e uma condição inicial. Para a segunda equação apenas é necessário uma condição inicial.

Condições iniciais:

$$y_{\chi, T} = 0, C_{As} = 0$$

$$y_{\chi, T} = 0, C_A = \frac{m}{A} \delta(\chi)$$

Onde $\delta(x)$ é a função *delta Dirac*.

Condições fronteira:

$$y_{\chi} \quad UA \int_0^{\infty} C(\chi, \tau) dt = m$$

$$\chi \rightarrow \infty \quad C_A \rightarrow 0$$

Aplicando as condições fronteira a esta equação, a solução é dada através de:

$$C_A = \frac{m/A}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{4Dt}\right] * e^{-t/\tau} + e^{-\chi^2} t/\tau * \int_0^t \frac{m/A}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{4Dt}\right] * e^{\chi^2} \theta/\tau * \frac{\chi}{\tau} * e^{-\theta/\tau} \sqrt{\frac{\theta}{t-\theta}} * I_1\left[2\frac{\chi}{\tau}\sqrt{\theta(t-\theta)}\right] d\theta \quad [21]$$

onde θ representa a variável do tempo e I_1 é uma função modificada de *Bessel* de primeiro tipo e primeira ordem. Isto é,

$$I_1(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m+2)} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^{2m+1} \quad [22]$$

e ainda, a função *gamma* definida por:

$$\Gamma(m+2) = \int_0^{\infty} \theta^{m+1} \cdot e^{-\theta} d\theta \quad [23]$$

A expressão [23] pode ser rearranjada de modo a facilitar a determinação:

$$C_A = C_{ADE}(x, t) * e^{-t/\tau} + e^{-x^2/\tau} * \int_0^t C_{ADE}(x, t) * e^{-x^2\theta/\tau} * \frac{x}{\tau} * e^{-\theta/\tau} \sqrt{\frac{\theta}{t-\theta}} * I_1[2\frac{x}{\tau}\sqrt{\theta(t-\theta)}] d\theta$$

[24]

Analisando a expressão e considerando τ infinitamente grande, as moléculas de *Rodamina WT* vão deslocar-se a uma velocidade infinitamente lenta para as zonas estagnadas. Sendo assim, o último termo da equação [18] será nulo e por consequência a equação [19] não existirá, o que leva a que a equação [24] apenas fique com o primeiro termo e por isso igual à equação [17]. Neste caso o modelo TS ficaria igual ao modelo ADE.

O modelo TS é mais complexo e mais realista que o modelo ADE. No ADE apenas é considerado o fenómeno da dispersão propriamente dito, enquanto no TS esta dispersão vem associada à existência de locais estagnados no curso de água, o que a nível teórico, se traduz na diminuição do coeficiente de dispersão longitudinal.¹⁷

2.3 Rearejamento superficial

Um dos principais indicadores da qualidade da água é a quantidade de oxigénio que esta contém. O oxigénio que se encontra na água é um fator determinante para a proliferação e manutenção da vida de seres aquáticos que utilizam este oxigénio no processo de respiração. No entanto a poluição está diretamente relacionada com esta concentração porque a diminui, reduzindo a capacidade dos seres aeróbios em conseguirem sobreviver.

A determinação da constante de rearejamento é um parâmetro que indica a capacidade do rio em reabsorver o oxigénio que foi consumido na degradação do poluente. O conhecimento real das características de rearejamento de um rio é, por isso, de importância para auxílio da sua gestão.

A utilização de marcadores gasosos para medição do coeficiente de rearejamento foi sugerida pela primeira vez por *Tsivoglou* e seus colaboradores em 1965. O método utilizava como marcador gasoso o produto radioativo *Krypton 85* e a *Rodamina WT* era utilizada para fornecer informações sobre os tempos de amostragem. No entanto esta técnica não prevaleceu devido a restrições relacionadas com os marcadores radioativos. Atualmente utilizam-se outras substâncias inertes, como o propano para a realização deste método.^{19,20,25}

2.3.1 Constante de rearejamento

A constante ou coeficiente que mede a reabsorção física do oxigénio atmosférico num escoamento é conhecido como coeficiente ou constante de rearejamento superficial, K_a . Segundo *Kilpatrick* e seus colaboradores (1989) o principal uso deste coeficiente é para utilização em modelos de qualidade de água baseados no oxigénio dissolvido, lembrando que a reabsorção do oxigénio atmosférico pela água é controlada pela fina camada de água à superfície.

Considerando que a absorção de um gás na água pode ser descrita por uma equação de potência de primeira ordem:

$$V \frac{dC}{dt} = K_L A \cdot (C_s - C) \quad [25]$$

Onde VdC/dt é a velocidade de acumulação de oxigénio, A é a área interfacial, K_L é o coeficiente de transferência de massa, C_s a concentração de saturação do gás na água e C a concentração do gás dissolvido na água no instante t .

A constante de rearejamento, K_a , pode ser definida a partir de K_L segundo:

$$K_a = \frac{K_L}{H} \quad [26]$$

Em que H é a profundidade média do troço de água e igual a V/A .

Para *Rathbun* e *Grant* (1978) o uso de marcadores para a determinação experimental do coeficiente de rearejamento superficial, K_a , baseia-se na proporcionalidade direta entre a velocidade de absorção do oxigénio atmosférico pela água e a constante de dessorção de um gás injetado no mesmo trecho de análise, independentemente das condições de agitação e temperatura. Desta forma:

$$K_a = \frac{K}{R} \quad [27]$$

Onde K_a é o coeficiente de absorção do oxigénio ou coeficiente de rearejamento, K a constante de dessorção do marcador gasoso e R é a razão obtida entre os dois valores.

Como a temperatura do marcador gasoso e a velocidade de absorção do oxigénio atmosférico pela água devem permanecer constantes, só serão válidas as comparações que sejam ajustadas para uma temperatura de referência específica. A solubilidade do oxigénio e a constante de rearejamento também são funções da temperatura. *Elmore e West* (1961) determinaram essa relação para uma temperatura padrão de 20°C de acordo com a seguinte equação:

$$K_{a,20} = K_a(1,0241)^{20-T} \quad [28]$$

Onde $K_{a,20}$ é a constante de rearejamento ajustada a 20°C e K_a a mesma à temperatura T .

Nesta técnica pode-se ainda considerar a perda do marcador gasoso (propano) para a atmosfera. A razão (R) entre a velocidade de dessorção do propano e o K_a determinada a 20, 25 e 30°C e com diferente agitação é segundo *Rathnun e os seus colaboradores* (1975) igual a 0,72.

2.3.2 Fatores que afetam o rearejamento

O rearejamento é influenciado por algumas características que se encontram presentes no rio. O aumento da temperatura, por exemplo, pode provocar dois efeitos negativos, diminuiu a solubilidade do oxigénio e acelera o metabolismo dos organismos decompositores, levando a um aumento do consumo de oxigénio. Outra característica do rio que interfere no rearejamento é a velocidade superficial da água, pois quanto maior for essa velocidade, maior será o rearejamento. A velocidade do vento também pode aumentar o rearejamento do rio Assim como a geometria do rio, pois uma maior profundidade do rio reduz a quantidade de oxigénio que pode ser transferido da superfície da água para o volume total de água.

2.3.3 Método do patamar

É possível determinar a constante de rearejamento diretamente no rio e neste trabalho foi utilizado o método do patamar. Este método recorre a uma injeção com fluxo constante de um traçador gasoso que permite a construção de uma curva de passagem teórica do traçador usando o princípio da sobreposição.

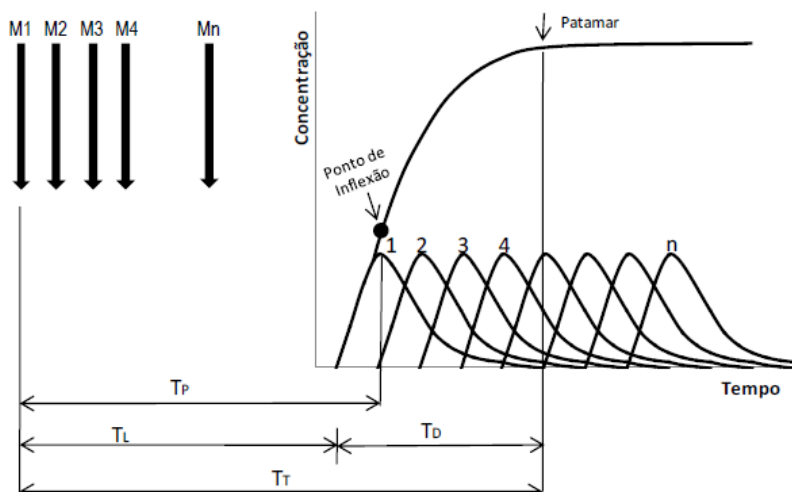


Figura 9 - Sobreposição das curvas de passagem de sucessivas injeções instantâneas (adaptado de Thiago Augusto Formentini, 2010).

A sobreposição de diversas curvas de pequenas injeções pontuais espaçadas em intervalos de tempo curtos e constantes leva a obtenção de um patamar (ver figura 9). O gráfico de resposta apresenta um crescimento que corresponde à curva M1 até que o tempo de pico seja (T_p) atingido, “ponto de inflexão”, e em seguida a concentração do gás sobe lentamente até atingir um patamar. Caso as condições de escoamento e a injeção do gás não sofram alterações, a concentração numa determinada secção deixa de variar.¹⁹

Neste método o coeficiente de dessorção do propano pode ser determinado através de:

$$K = \frac{1}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1} \ln \frac{M_1}{M_2} \quad [29]$$

em que os números 1 e 2 representam respetivamente as localizações a montante e a jusante, \bar{t} representa o tempo médio de viagem do pico das curvas do marcador de referência e M é a massa do marcador gasoso.

Se considerarmos o caudal constante, então:

$$K = \frac{1}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1} \ln \frac{C_1}{C_2} \quad [30]$$

onde C representa a concentração do marcador gasoso.²¹

2.3.4 Previsão do caudal de propano e quantidade de *Rodamina WT* a injetar

Segundo Kilpatrick e os seus colaboradores (1989) é necessário estimar previamente o caudal de gás propano a injetar e o período de tempo que esse caudal deve ser mantido para que seja possível obter um patamar na secção de medição mais a jusante.

Para Rathbun (1987), o caudal de gás necessário para que se forme um patamar na secção mais a jusante de 1 µg/L pode ser relacionado com a eficiência do difusor, o caudal de escoamento rio e a dessorção de primeira ordem do gás propano pela seguinte equação:

$$q = 1,97 \times 10^{-3} [Q_m e^{T_p \cdot K}] / \varepsilon \quad [31]$$

onde q é o caudal de injeção constante do gás (ft³/h), Q_m é o caudal máximo no troço do rio que fica geralmente mais a jusante (ft³/s) e no nosso caso tem um valor de 2,72, T_p é o tempo decorrido até ao pico da secção mais a jusante (h), K é o coeficiente de dessorção do propano (h⁻¹) a 20°C; e ε é a eficiência de absorção.

Na figura 10 é apresentado um gráfico com esta equação para três valores de eficiência de absorção e condições normais.

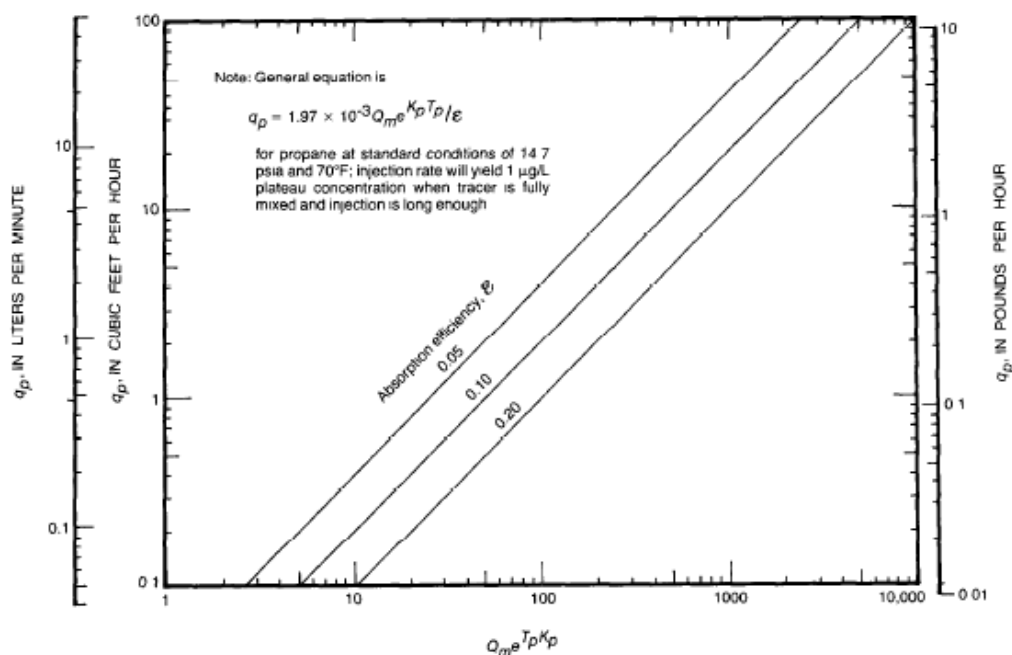


Figura 10 - Gráfico usado para prever a quantidade de gás propano a injetar no rio para obter um determinado patamar (Kilpatrick et al., 1989).

A eficiência de absorção é estimada inicialmente, e se a estimativa se confirmar, mantém-se como referência. Para garantir uma concentração de gás adequada na água é aconselhável que a estimativa seja com valores de eficiência de absorção baixos.

Da mesma maneira que é possível estimar o caudal de gás propano a injetar no rio, é possível determinar a quantidade de *Rodamina WT* a utilizar, recorrendo à seguinte expressão:

$$V_s = 3,79 \times 10^{-5} \frac{QL}{v} C_p \quad [32]$$

onde V_s representa o volume de *Rodamina WT* (mL), Q é a caudal na secção mais a jusante (ft^3/s), L é a distância da secção mais a jusante (ft), v é a velocidade média do escoamento (ft/s) e C_p é a concentração de pico no ponto de amostragem mais a jusante ($\mu\text{g}/\text{L}$).

A concentração máxima admissível de concentração de *Rodamina WT* na água, seja ela para uso direto ou indireto no consumo humano é de $10 \mu\text{g}/\text{L}$. Com base nessa concentração chegou-se a um volume a injetar de 25 mL.

Na figura 11 está representado um método gráfico que nos permite estimar o volume de *Rodamina WT* a injetar instantaneamente, para produzir uma concentração de pico de $1 \mu\text{g}/\text{L}$ na secção mais a jusante. *Kilpatrick* e os seus colaboradores

recomendam uma concentração máxima de pico de 10 µg/L, no entanto o volume de corante pode ser aumentado conforme desejado.^{19,20}

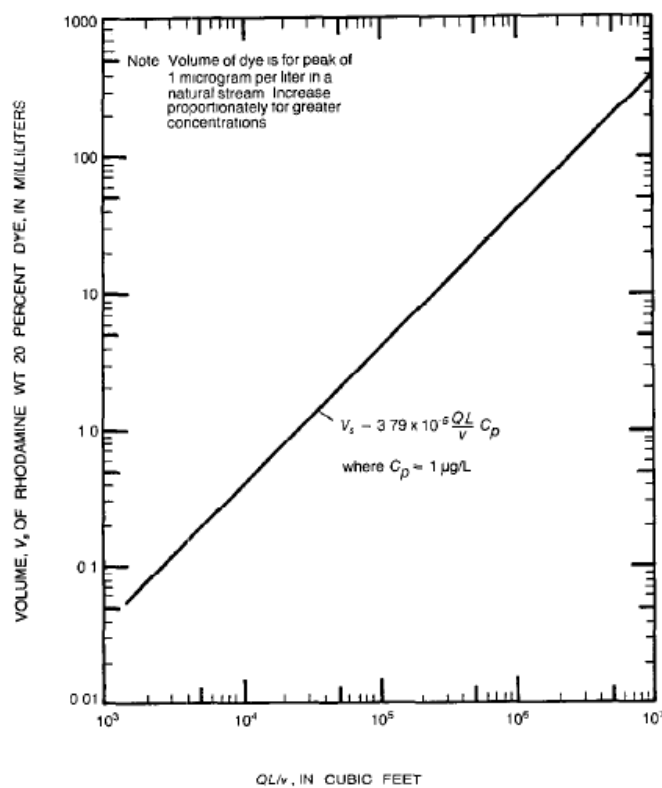


Figura 11 - Gráfico utilizado para estimar a quantidade de *Rodamina WT* a ser injetada instantaneamente no rio para produzir uma concentração no pico mais a jusante de 1 µg/L (Kilpatrick et al., 1989).

3. Materiais e Métodos

3.1 Método de injeção de corantes em rios

A injeção de corantes em rios para determinação da dispersão de poluentes pode ser instantânea ou contínua. O método da injeção instantânea é provavelmente o mais simples, consistindo numa injeção momentânea de um volume de corante previamente definido ao longo da secção transversal do troço do rio. O método da injeção contínua é mais complexo, consiste na injeção sucessiva de corante no seio do curso de água. O método utilizado neste trabalho foi a injeção instantânea de um volume de *Rodamina WT* a 20%, conforme a figura 12.



Figura 12 - Imagem representativa da injeção instantânea do marcador fluorescente efetuada neste trabalho.

Esta forma de injeção afeta o formato das curvas de concentração ao longo do tempo, porque estamos perante uma resposta a um impulso com um atraso de t minutos, até à análise da amostra recolhida. Na Figura 12 é possível verificar que nesta injeção é assegurada de imediato a dispersão transversal ao ser introduzido o corante rapidamente na largura do rio.^{17,22}

3.2 Corantes fluorescentes e suas propriedades

O uso de marcadores ou traçadores para efetuar a monitorização em meios aquáticos é muito antigo.¹⁹ Para *Bedmar* (1972) o traçador é um composto que permite investigar o seu comportamento em determinado processo físico e químico. Pode ser

artificial, se é introduzido intencionalmente pelo homem, ou natural se é incorporado na água em consequência de processos naturais. Quanto á utilização, os marcadores podem-se definir como internos ou externos, os internos ocorrem normalmente no sistema, são elementos estáveis ou radioativos e normalmente de difícil quantificação, os externos são aqueles que são adicionados ao sistema, podendo ser classificados como fluorescentes, biológicos, químicos ou radioativos.

O uso de marcadores permite conhecer a hidrodinâmica de cursos de água por:

- Tempos de viagem;
- Dispersão e mistura de poluentes;
- Circulação e estratificação;
- Prevenção e investigação de efeitos de descargas;
- Estudos de balanço de massa;

A utilização de marcadores fornece uma das mais confiáveis fontes de informação para validação de modelos hidráulicos de estudos de qualidade de água e protecção ambiental. Esta informação é utilizada para determinar picos de concentrações de substâncias indesejáveis e poluentes para os cursos de água. Existem diversos corantes como os que se podem observar na figura 13 que se encontram no mercado numa vasta gama de cores, e normalmente são fluorescentes.

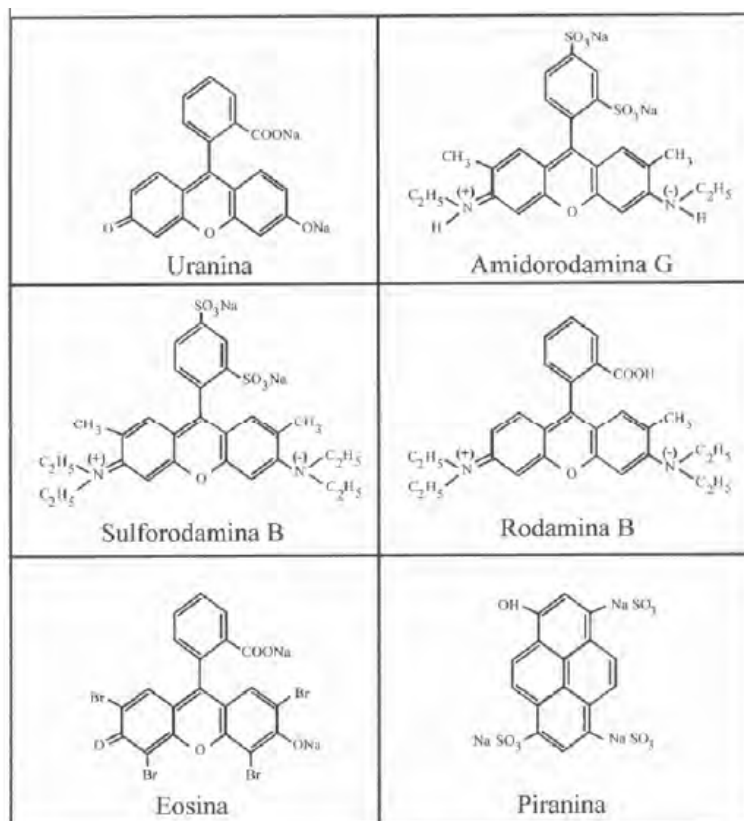


Figura 13 - Fórmulas estruturais dos principais corantes fluorescentes utilizados como marcadores em aplicações hidrológicas.²³

Para determinar a velocidade e a direcção do fluxo de transporte de um poluente é frequentemente utilizado ou a *Rodamina WT* ou a *Rodamina B*, que têm as seguintes características:

- Solúveis em água;
- Altamente detetáveis – fortemente fluorescentes;
- Inofensivos em baixas concentrações;
- Acessíveis a nível económico;
- Razoavelmente estáveis em meio aquático;

O corante utilizado neste trabalho foi a *Rodamina WT*, por ser o corante mais usado em estudos ambientais, cuja fórmula estrutural pode ser observada na figura 14.

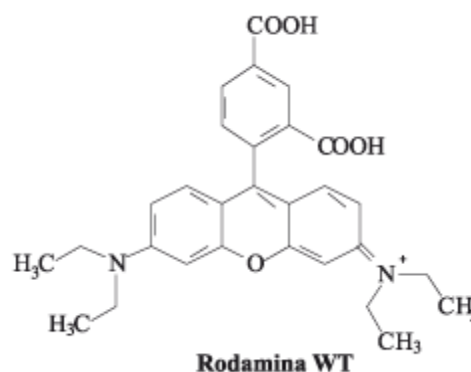


Figura 14 - Fórmula estrutural da *Rodamina WT*.¹⁷

Algumas das propriedades físico-químicas da *Rodamina WT* são:

- Fórmula molecular: $C_{29}H_{29}N_2O_4Na_2$;
- Também se designa por “Acid red #388”;
- Densidade: 1,1 – 1,7
- Pode apresentar-se em pó ou solução a 20%
- LD_{50} : 430 mg/kg
- CAS: 37299-86-8
- Massa molecular: 567 g/mol

Em relação à toxicidade, a concentração máxima recomendável da *Rodamina WT* na água, seja ela para uso direto ou indireto ao consumo humano é de 10 $\mu\text{g/L}$. Estes valores foram estabelecidos pela EPA (*Environmental Protection Agency*) para os Estados Unidos da América. Em Portugal não existe legislação a este nível.¹⁷

3.3 Características do rio Febros

O rio Febros é um pequeno rio com aproximadamente 14 km de extensão. Ao longo de toda a sua extensão a profundidade do rio oscila entre os 20 e 70 centímetros, de acordo com a sua pluviosidade.

O tipo de fundo é uniforme e predominantemente constituído por cascalho e calhaus rolados que normalmente estão cobertos por lama. A vegetação nas margens é normalmente constituída por plantas silvestres, amieiros, choupos, salgueiros e sobreiros. Existe também ao longo do rio abundância de macrófitas.¹⁷

3.3.1 Determinação das características hidrogeométricas do rio Febros

Na modelização do rio Febros para obter um perfil dispersivo de toda e qualquer substância poluente é necessário que se estude algumas características hidráulicas (Caudal, Velocidade e Dispersão) e geométricas (Profundidade, Largura, Declive e Área). Estes aspetos são muito sensíveis às condições atmosféricas e características naturais do curso de água.¹⁷

O método utilizado para a determinação da área da secção do rio é a regra dos trapézios. Esta regra é aplicada à curva da largura da secção em função da profundidade da mesma conforme se pode ver na figura 15.

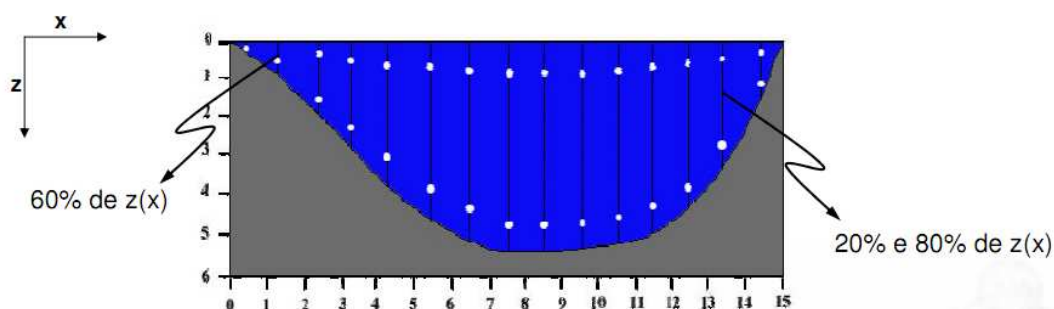


Figura 15 - Esquema representativo da determinação da área recorrendo à regra dos trapézios (z representa a profundidade do rio e x a largura da margem).

Para determinação da área de secção utiliza-se a seguinte expressão:

$$A = \int_0^B Z(X). dx \quad \leftrightarrow \quad A = \sum_{i=0}^n \frac{(Z_t + Z_{t-1})}{2} * (x_t - x_{t-1}) \quad [33]$$

onde B é a largura total da secção escolhida, segmentado em x segmentos com z de profundidade.

Como o rio Febros tem uma profundidade pequena, inferior a 60 centímetros, e aproximadamente constante ao longo do rio, a medição da velocidade é efetuada a

60% da altura do rio. Para esta determinação pode ser usado o método do flutuador que é simples e eficaz e requer apenas um objeto com características flutuantes. O objeto é largado num local (L_0), percorrendo uma distância previamente estipulada (L) num determinado período de tempo (t). A expressão utilizada para determinação da velocidade é a seguinte:

$$u = \frac{L-L_0}{t} \quad [34]$$

E também é possível recorrer ao método do molinete, que consiste num sistema de pás ou hélices que giram impulsionadas pela velocidade de escoamento quando perfeitamente mergulhado na água. É necessária uma calibração prévia onde se estabelece uma proporcionalidade entre o número de voltas por unidade de tempo e a velocidade de escoamento, sendo necessário o conhecimento da área da secção transversal do fluxo.

Com o conhecimento da velocidade e da área é possível determinar o caudal de escoamento, utilizando a seguinte expressão:

$$Q = v \cdot A \quad [35]$$

Tal como a área da secção reta, o caudal é igualmente obtido pela regra dos trapézios para uma dada secção, isto é:

$$Q = v \cdot A \leftrightarrow Q = v \int_0^B z(x) dx \leftrightarrow Q = \sum_{i=0}^n \frac{v_t Z_t + v_{t-1} Z_{t-1}}{2} * (x_t - x_{t-1}) \quad [36]$$

A largura e a profundidade do rio podem ser determinadas recorrendo a uma fita métrica e o declive e a distância são determinados através da leitura no GPS das respetivas cotas e coordenadas em diferentes locais do seu percurso.¹⁷

3.4 Método da injeção de propano para determinação da constante de rearejamento

O método para determinação da constante de rearejamento, K_a , consiste na injeção simultânea de um marcador gasoso e um marcador de referência. O marcador gasoso utilizado para conhecer a troca gasosa e o de referência permite saber aproximadamente a altura da passagem do marcador gasoso.

Com o intuito de reduzir a utilização de material radioativo em corpos de água, Rathbun e Schulz (1975) desenvolveram um método experimental de determinação da constante de rearejamento (K_a) recorrendo ao uso de marcadores inertes. Baseia-se na injeção de um gás hidrocarboneto de baixo peso molecular como o propano, e a utilização da *Rodamina WT* como marcador de referência.

Devido à sua baixa solubilidade em água, a injeção do propano não pode ser efetuada instantaneamente. Geralmente esta injeção é feita durante algumas horas, borbulhando o gás através de um difusor completamente mergulhado na água (ver figura 16).^{21,24,25}



Figura 16 - Imagem representativa da injeção de propano efetuada neste trabalho.

3.4.1 Propriedades do Propano

O propano é um hidrocarboneto que nas condições ambientais é um gás incolor, inflamável e com um odor característico de gás natural. É uma substância não tóxica na natureza. Quando inalado deliberadamente e em grandes quantidades, faz com que haja privação de oxigênio levando a asfixia.

O propano é armazenado em temperatura ambiente, sob pressão e quando sofre combustão, apresenta uma chama clara e visível.

Outras propriedades do gás propano são:

- Fórmula molecular: C_3H_8 ;
- Densidade do vapor: 1,5
- Pode apresentar-se no estado líquido ou gasoso
- Solubilidade em água: 75 mg/l a 20°C
- CAS: 74-98-6
- Massa molecular: 44,1 g/mol

4. Resultados e Discussão

4.1 Determinação da dispersão de um poluente no rio pelo modelo TS

O primeiro ensaio realizou-se no dia 8 de Junho de 2011, teve como objetivos identificar as características físicas do rio e determinar o coeficiente dispersão de um poluente recorrendo ao modelo TS. Foram considerados três pontos para recolha de amostras conforme indica a figura 18 e a injeção instantânea de 25 mL *Rodamina WT* foi realizada às 13 horas e 30 minutos.



Figura 17 - Imagem representativa de um troço do rio Febros onde foi realizada a primeira campanha. Aqui está indicado o local de injeção e as três estações de recolha de amostra com a respetiva distância ao ponto de injeção.

Resultados para a primeira estação:

Os resultados para a primeira estação podem ser observados na figura 18.

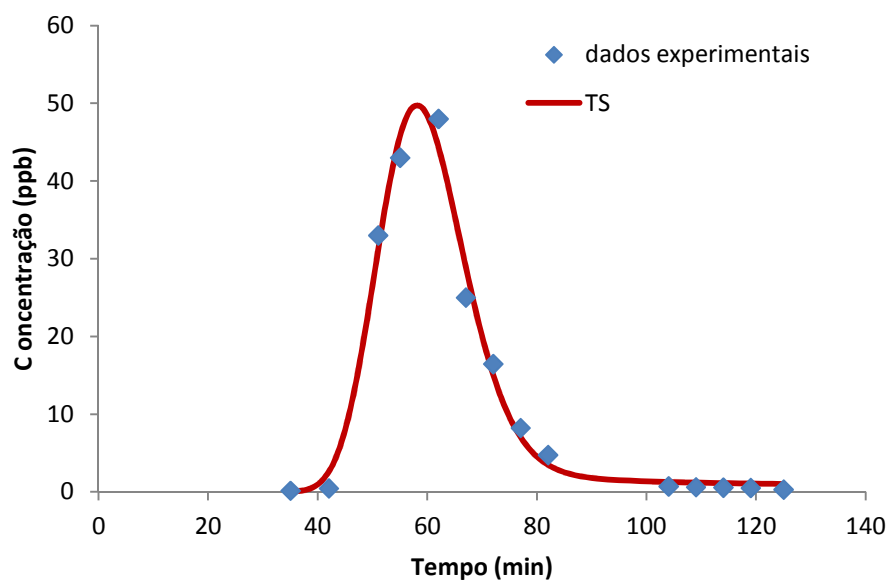


Figura 18 - Gráfico representativo da concentração de *Rodamina WT* em função do tempo com ajuste pelo método TS para a primeira estação.

É possível verificar nesta figura a passagem da nuvem de *Rodamina WT* assim como a curva proporcionada pelo modelo TS. Após a injeção do traçador foram recolhidas amostras de água e o primeiro vestígio apareceu ao fim de aproximadamente 40 minutos. A nuvem de *Rodamina WT* atingiu uma concentração pico de 44,2 ppb e, a partir desse ponto, a concentração decresceu de uma forma lenta. O pico foi atingido 40+20 minutos e demorou aproximadamente 60 minutos até ter novamente valores próximos de zero.

Resultados para a segunda estação:

Os resultados da evolução temporal da concentração de *Rodamina WT* para a segunda estação podem ser observados na figura 19.

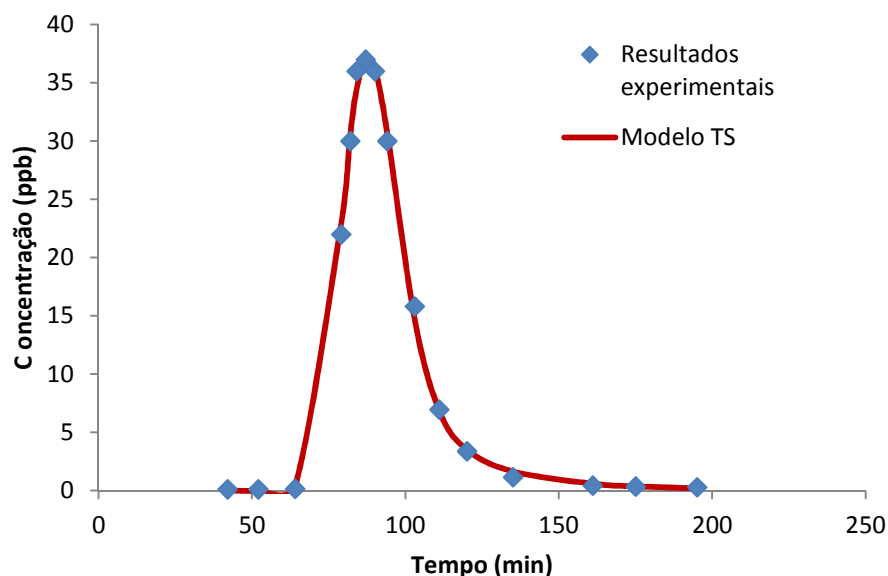


Figura 19 - Gráfico representativo da concentração de Rodamina WT em função do tempo com ajuste pelo método TS para a segunda estação.

Na segunda estação a curva da evolução temporal da concentração de traçador apresentou um comportamento esperado, assemelhando-se à curva da primeira estação, com diferenças no tempo de passagem da nuvem e no valor do pico. A *Rodamina WT* foi detetada após aproximadamente 65 minutos de efetuada a injeção, o pico de 37,2 ppb foi atingido aos 85 minutos, aproximadamente, e no total tem-se cerca de 195 minutos de presença de traçador.

Resultados para a terceira estação:

Os resultados da evolução temporal da concentração de *Rodamina WT* para a terceira estação podem ser observados na figura 20

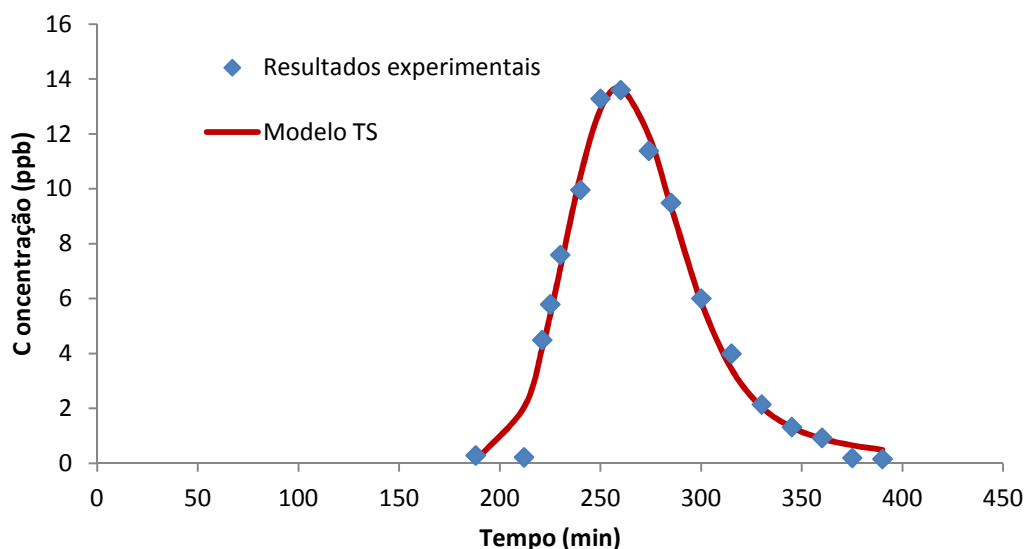


Figura 20 - Gráfico representativo da concentração de Rodamina WT em função do tempo com ajuste pelo método TS para a terceira estação.

A primeira recolha de amostra com traçador demorou aproximadamente 190 minutos após a injeção. O pico de concentração foi de 13,7 ppb e demorou cerca de 190+70 minutos a aparecer. A última recolha de água com *Rodamina WT* foi aos 390 minutos.

A figura 21 contém os picos de *Rodamina WT* nas três estações de recolha de amostras. Pode-se verificar que o pico de concentração decresce em valor ao longo da distância, assim como há um maior alongamento da curva.

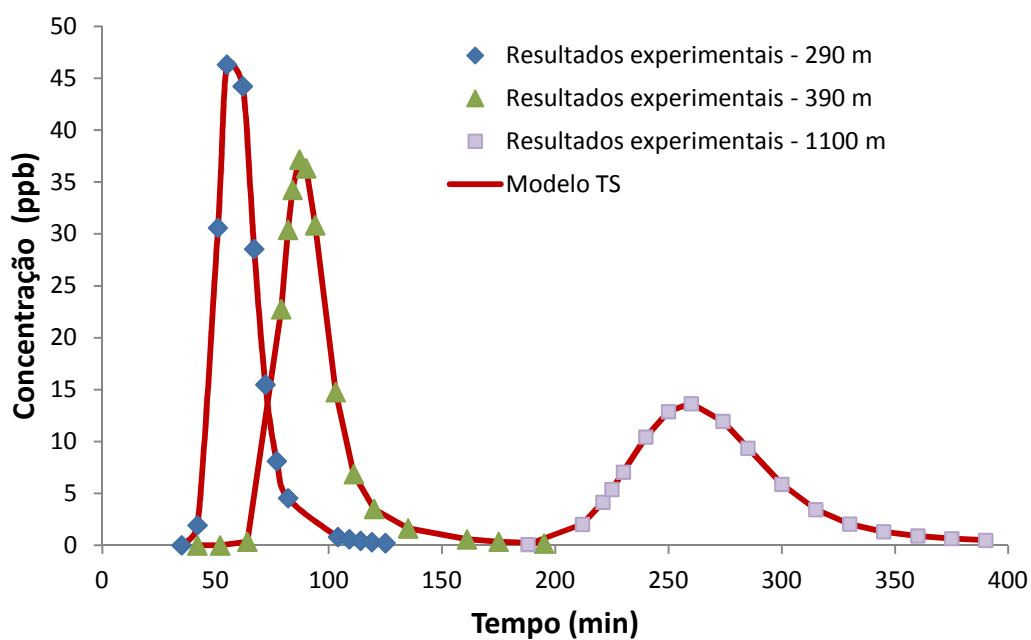


Figura 21 - Gráfico representativo da concentração de Rodamina WT nas três estações de recolha de amostras.

Este ensaio serviu também para indicar o tempo de passagem do traçador gasoso aquando da realização dos ensaios para determinar a constante de rearejamento.

Parâmetros para o modelo TS

Na tabela 1 é possível observar os valores dos parâmetros determinados para o modelo TS, como é o caso da velocidade superficial do rio (U), o caudal (Q) e o coeficiente de dispersão (D).

Tabela 1- Valores de vários parâmetros para as duas estações no dia 8 de Junho de 2011.

Estação	U (m/s)	D (m ² /s)	τ (s)	χ	ToT (min)	R^2	Q (m ³ /s)
290 m	0,084	0,18	4815	1,3	58	0,988	0,037
390 m	0,075	0,15	6945	1,2	87	0,998	0,042
1100 m	0,071	0,39	24002	1,5	258	0,986	0,043

Resultados para a primeira estação:

No dia 29 de Junho injetou-se *Rodamina WT* como traçador de referência para conhecer o tempo de passagem do traçador gasoso. Injetou-se 25 mL de *Rodamina WT* a 20% e recolheu-se amostras em dois pontos a jusante. No primeiro ponto, a evolução temporal da concentração do traçador pode ser observada na Figura 22.

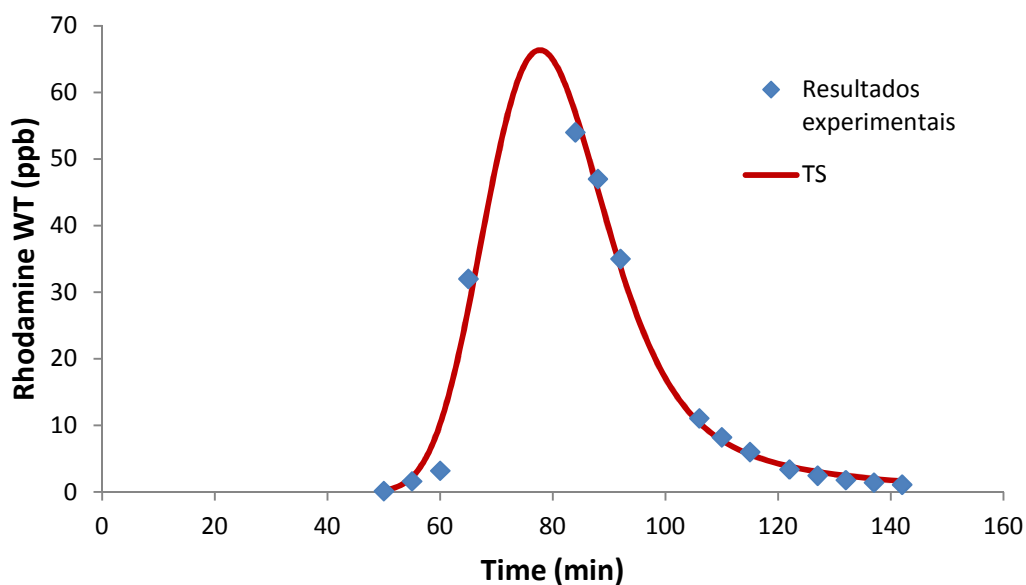


Figura 22 - Gráfico representativo da concentração de *Rodamina WT* em função do tempo com ajuste pelo modelo TS para a primeira estação.

O primeiro vestígio de traçador apareceu aos 50 minutos, aproximadamente, e a nuvem atingiu um pico com a concentração de 69,4 ppb aos 80 minutos, aproximadamente. A última recolha de água com traçador surgiu aos 142 minutos.

Resultados para a segunda estação:

Neste segundo ponto de amostragem o pico de *Rodamina WT* apareceu aos 351 minutos com uma concentração de 12,9 ppb conforme se pode observar na figura 23.

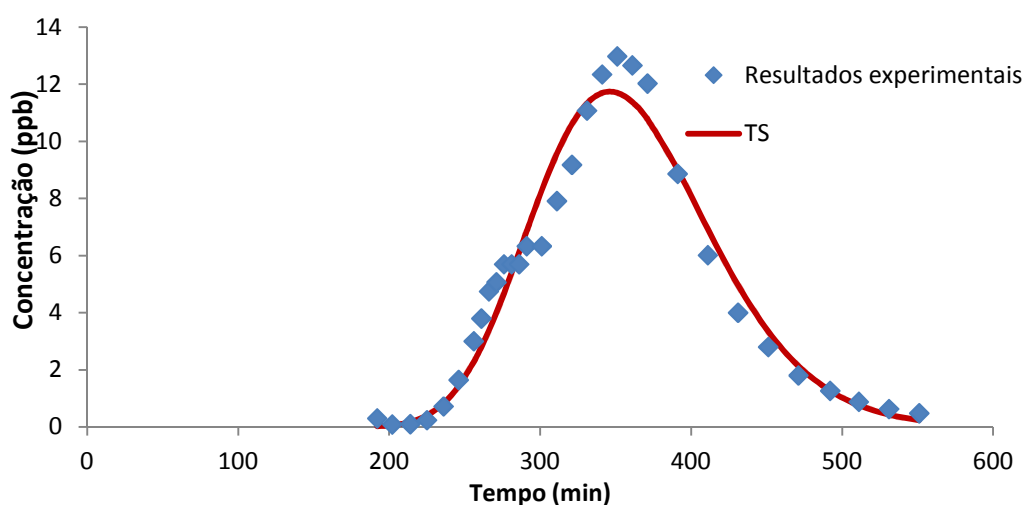


Figura 23 - Gráfico representativo da concentração de *Rodamina WT* em função do tempo com ajuste pelo método TS para a segunda estação.

Nesta figura é também possível verificar a dificuldade do ajuste ao modelo TS, porque há uma pequena deflexão da curva perto dos 300 minutos. Julga-se que as obras decorrentes nas proximidades do rio em que se usavam alguns auto-tanques para remover água possam ser a causa deste desvio. Na tabela 2 estão os valores dos parâmetros e do ajuste ao modelo TS, para o dia 29 de Junho, entre os quais a velocidade superficial (U), o caudal (Q), tempo de viagem (ToT) e o coeficiente de dispersão (D).

Tabela 2 - Valores de vários parâmetros para as duas estações no dia 29 de Junho de 2011.

Estação	U (m/s)	D (m ² /s)	τ (s)	χ	ToT (min)	R^2	Q (m ³ /s)
290 m	0,063	0,15	8762	1,5	77	0,982	0,028
1100 m	0,052	0,81	$2,7 \times 10^8$	659	351	0,957	0,031

Analisando os valores para as duas estações a 290 e a 1100 m é possível verificar o bom ajuste, $R^2 > 0,95$.

4.2 Determinação da Constante de Rearejamento

No dia 29 de Junho de 2011, a campanha no rio Febros teve também como fundamento a determinação da constante ou coeficiente de rearejamento. O método utilizado para esta determinação recorreu à injeção contínua de Propano assim como à injeção de *Rodamina WT* como traçador referência.

A baixa profundidade do rio dificultou a dissolução do propano e, por isso, a concentração deste composto a distâncias iguais ou acima dos 390 m do local de injeção foram consideradas desprezáveis por estarem próximas do limite de deteção do método de análise. Por este motivo foram escolhidas estações de amostragem a 140 e 190 m do local de Injeção (Casal Drijo) conforme se pode verificar na figura 24.

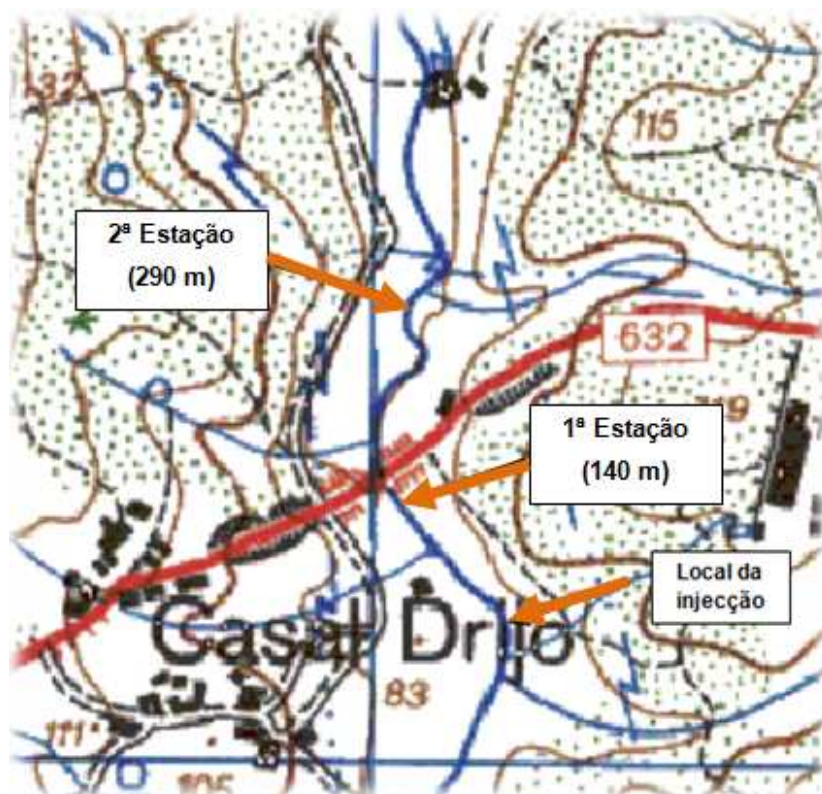


Figura 24 - Imagem representativa de um troço do rio Febros onde foi realizada a segunda campanha. Neste troço está indicado o local de injeção e as duas estações de recolha de amostra com a respetiva distância ao ponto de injeção.

Iniciou-se a injeção contínua do propano às 7 horas e 20 minutos com um caudal de 20 L/min e 10 min depois injetou-se 25 mL de *Rodamina WT*.

O propano dissolvido no rio foi quantificado recorrendo a GC/FID (Cromatografia Gasosa com detetor de ionização de chama) num cromatógrafo marca GAS CROMATOGRAPH SRI modelo 8610C com uma coluna capilar de enchimento de 25 metros e 0,32 mm de diâmetro interno.

As primeiras amostras de Rodamina foram retiradas após 40 minutos da sua injeção, mas só a partir dos 70 minutos é que se começou a remover amostras de rio em seringas de 10 mL para quantificação de propano. A evolução temporal da concentração de propano na primeira estação de amostragem é apresentada na tabela 3 e na figura 25.

Tabela 3 - Valores de concentração de propano obtidos para diferentes tempos na primeira estação de recolha.

Tempo (minutos)	Área média (mV/min)	Concentração Propano (ppb)
70	50,1	10,0
90	59,6	11,2
120	59,9	11,2
Conc. Média Patamar		10,8

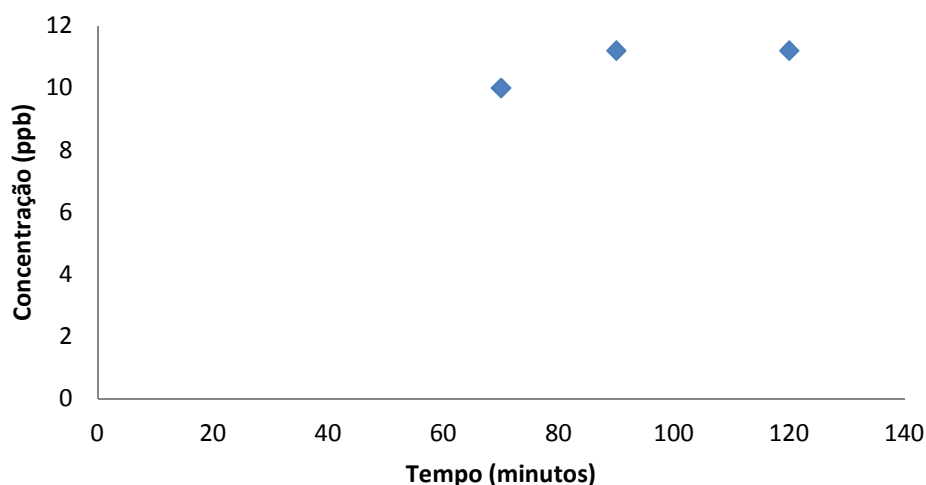


Figura 25 - Gráfico representativo do patamar de propano na primeira estação de amostragem.

Ao fim de 70 minutos a concentração de propano começou a estabilizar, dando origem a um patamar. A velocidade do rio nesta secção era de 0,065 m/s e sendo a área da secção de 0,46 m² o caudal de escoamento considerado foi de 0,030 m³/s.

O valor da concentração média de propano de 10,8 ppb no patamar é considerado relativamente baixo e a justificação é a da dificuldade de dissolução num

rio pouco profundo. Os resultados da evolução temporal da concentração para a segunda estação estão indicados na tabela 4 e figura 26.

Tabela 4 - Valores de concentração de propano obtidos para diferentes tempos na 2ª estação de recolha.

Tempo (minutos)	Área média (mV/min)	Concentração Propano (ppb)
90	32,2	7,9
120	32,4	7,9
140	39,9	8,8
Conc. Média Patamar		8,2

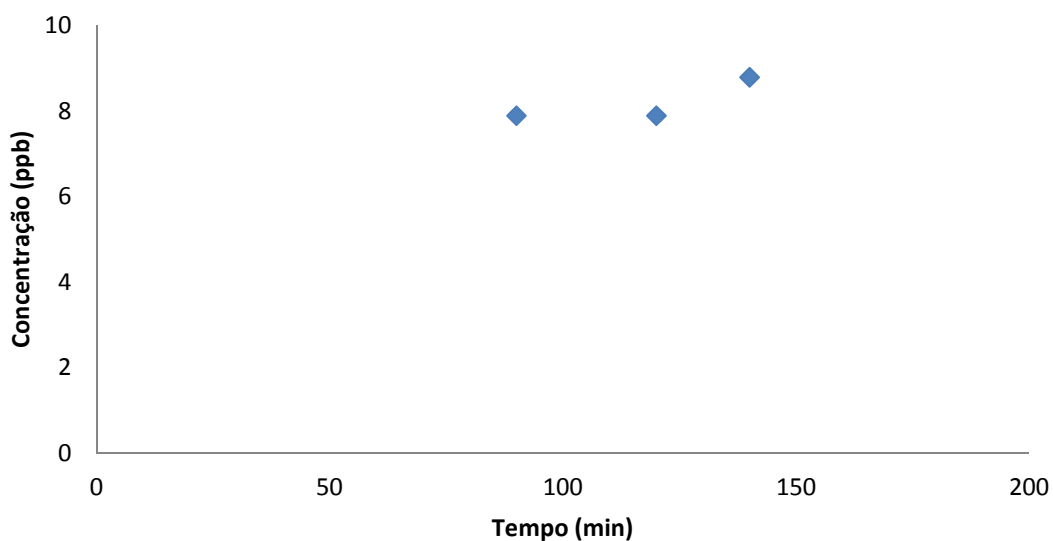


Figura 26 - Gráfico representativo do patamar de propano na segunda estação de amostragem.

Como era esperado a concentração média de propano no patamar desta estação foi inferior ao da primeira estação, com uma concentração média de 8,2 ppb. A velocidade do rio nesta secção era idêntica à anterior (0,065 m/s), no entanto a área transversal do rio neste local era relativamente mais pequena (cerca de 0,45 m²), e por isso o caudal obtido existente era de 0,029 m³/s. Por fim e na Figura 27 é possível perceber as diferenças das concentrações médias de propano nas duas estações.

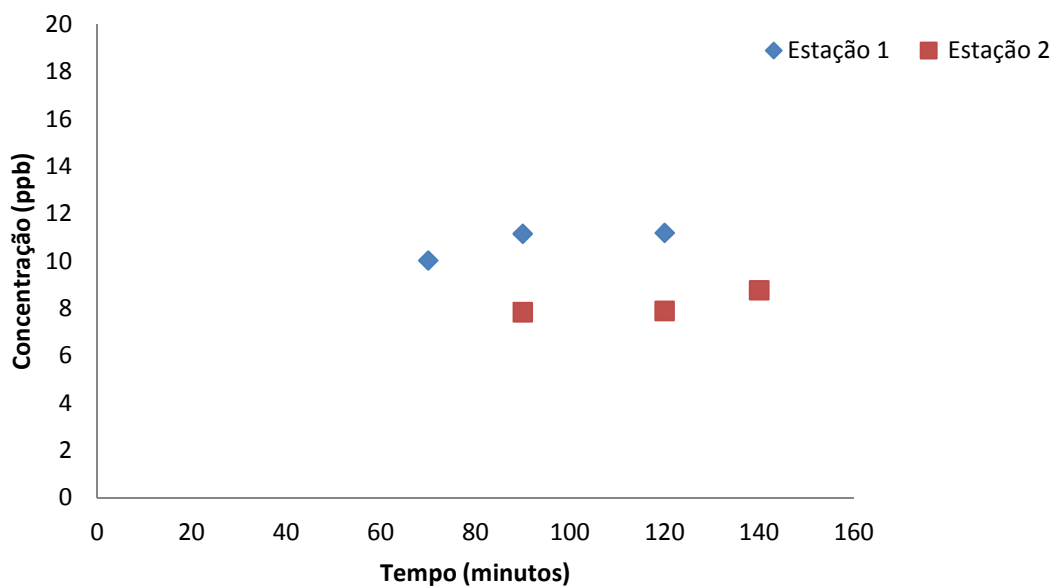


Figura 27 - Gráfico representativo da concentração de propano nas duas estações.

Na tabela 5 reúnem-se os valores dos parâmetros necessários para o cálculo da constante de rearejamento como o caudal, a velocidade superficial, o tempo de viagem entre as estações e a concentração média de propano nos patamares.

Tabela 5 - Valores necessários de cada estação para a determinação do coeficiente de rearejamento.

Parâmetros	1ª Estação	2ª Estação	Secção
Caudal (m ³ /s)	0,029	0,031	
Velocidade (m/s)			0,065
Tempo de viagem (s)	2160,0	4628,6	
Concentração média patamar (ppb)	10,8	8,2	
K _a (s ⁻¹)			0,00011
K _a (dia ⁻¹)			13,4

A constante de rearejamento foi calculada com recurso às equações [27] e [30], resultando no valor para K_a de 13,4 dia⁻¹.

A temperatura média nas duas estações era de 20°C, pelo que não foi necessário proceder a uma correcção do valor da constante por causa da temperatura.

4.3 Sistema de Vigilância e alerta no rio Febros

O sistema de vigilância a ser instalado no rio para proteção do Parque Biológico poderá ser instalado em Pontão de Alheira (ver figura 28), a cerca de 2 km do mesmo de modo a que seja possível ter tempo (7 ou 8 horas) para pôr em prática um plano de remediação. A estratégia de escolha passou por escolher um local fisicamente acessível e que possa ser vigiado por populares para evitar vandalismo.



Figura 28 - Imagem do local a ser implementado o sistema de vigilância e alerta no rio Febros.

O equipamento a instalar conterà um sensor de análise multiparamétrica e um medidor de velocidade superficial para determinação do caudal. O sensor analisará continuamente os parâmetros (pH, temperatura, condutividade, turvação e oxigénio dissolvido) e com ajuda de uma unidade de telemetria enviará os sinais para uma estação base alimentada por um painel fotovoltaico. Essa estação estará ligada a um computador que estará equipado com um software que recebe os dados, analisa-os e compara-os com os valores limite ou recomendáveis e emite um alarme ou aviso caso haja inconformidade.

A dispersão do possível contaminante poderá ser determinada utilizando o modelo TS e a evolução da sua concentração no troço entre Pontão e o Parque poderá ser simulada em software adequado para saber o tempo e local apropriados para realizar o plano de remediação.

Os materiais e software propostos são da marca *Adcon* e *OTT*. No caso da sonda, o modelo WQC-24 é o último existente para analisar a qualidade da água, e foi desenvolvido pela DKK-TOA's. Este sensor (ver figura 29) é capaz de medir até 11

parâmetros em simultâneo, no entanto numa primeira fase apenas monitorizará os 5 parâmetros referidos e terá mais uma ligação para outro parâmetro.

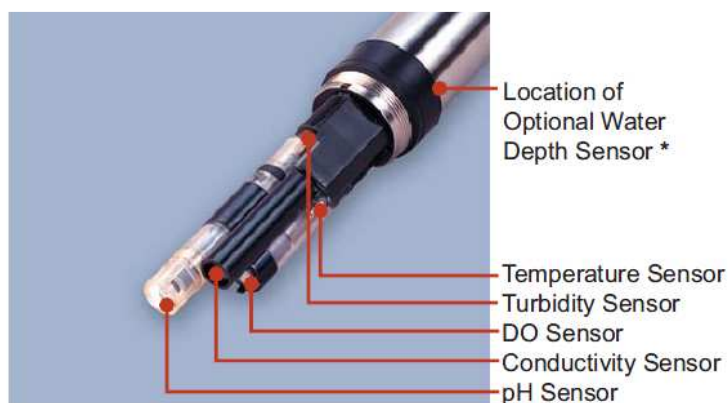


Figura 29 - Imagem representativa da sonda modelo WQC - 24 a utilizar para monitorização do rio Febros.

O modelo da unidade de telemetria remota (RTU) será o A755 addWAVE GPS/GPRS QUAD. Esta unidade (ver figura 30) foi desenvolvida para atender às mais rigorosas necessidades de uma estação de telemetria, é um equipamento com alta resolução e elevada memória, para que em caso de falha da rede GSM ou da conexão GPRS seja possível armazenar todos os dados. Este aparelho pode ser alimentado energeticamente por um pequeno painel fotovoltaico.



Figura 30 - Unidade de Telemetria Remota A753 addWAVE GSM/GPRS a utilizar no sistema de vigilância e alerta.

A fonte de energia a utilizar será um painel fotovoltaico modelo *Solar Set* com 460 mA, 9 VDC e 4,3 W. Este painel (ver figura 31) utiliza células mono cristalinas e é montado na chamada “tecnologia de telha”, fazendo um melhor uso do espaço disponível. Este painel é conetado ao A753 addWAVE GPS/GPRS através de um cabo com um conetor macho de 5 pinos.



Figura 31 - Painel solar de alimentação da UTR A755 GSM/GPRS.

O sinal enviado pela unidade de telemetria é recebido pelo A850 *Telemetry Gateway*. Este equipamento é o núcleo de cada rede de informação *Adcon*, ele sabe exatamente quando e como recuperar os dados de um RTU (*Remote Telemetry Unit*). O A850 (ver figura 32) pode suportar mais do que um RTU se for atualizado com o software adequado e todas as suas funções podem ser acedidas através de uma interface Web por vários utilizadores e ainda tem a opção de configuração offline.



Figura 32 - Estação de Base A850 que irá receber o sinal enviado pela UTR A755 GSM/GPRS.

O OTT SLD (ver figura 33) é um sistema de sensor acústico Doppler para monitorização contínua da velocidade do rio. O baixo consumo de energia permite ao sensor ser alimentado pelo painel solar.



Figura 33 - Imagem representativa do medidor de velocidade OTT SLD.

O software escolhido é da mesma marca que os hardwares, é o addVANTAGE Pro 6.1 (ver figura 34), que é um pacote de software poderoso e universal para arrecadar, armazenar, processar e exibir graficamente os dados em ambiente internet. Este software exibe graficamente ou em tabela todos os dados, informa e/ou emite um alarme ao usuário sempre que haja necessidade e oferece uma série de ferramentas para processar os dados de acordo com as necessidades específicas do cliente.



Figura 34 - Software addVANTAGE Pro 6.1 utilizado para consultar os parâmetros monitorizados pela sonda WQC- 24.

Na Figura 35 é possível verificar a instalação completa do sistema de vigilância e alerta no rio Febros.



Figura 35 - Sistema de Vigilância e alerta instalado no rio Febros.

4.3.1 Parâmetros a monitorizar

Numa primeira fase os parâmetros a ser monitorizados são o pH, condutividade, turvação, oxigénio dissolvido e temperatura. O sistema terá sempre hipótese de a qualquer momento acrescentar outro/s parâmetros que sejam pertinentes.²⁶ A escolha destes parâmetros pode ser explicada pela informação a seguir descrita.

Temperatura

A temperatura é um fator que influencia praticamente todos os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na água, é muito influenciada pelas condições climáticas e varia ao longo do dia. As espécies de animais e plantas que habitam este ecossistema têm preferências térmicas e os seus processos biológicos são influenciados por este parâmetro. Os valores de pH, condutividade e oxigénio dissolvido também são influenciados pela temperatura sendo por isso essencial que a sua medição se faça em simultâneo.

pH

As medições de pH de um rio podem revelar focos de poluição. Este parâmetro em águas naturais varia normalmente entre 6,5 e 8,5, logo uma variação diferente poderá indicar a presença de substâncias indesejáveis. A correção deste parâmetro pode ser conseguida através de uma neutralização ou introdução de uma solução tampão.

Oxigénio Dissolvido

A quantidade de oxigénio dissolvido indica de uma forma direta a qualidade dessa água. O oxigénio na água provém da fotossíntese de alguns organismos aquáticos e da absorção atmosférica e a variação da sua concentração ocorre sazonalmente, ou mesmo durante o dia, em função da temperatura, atividade biológica ou da presença de possíveis poluentes. A falta de oxigénio do rio pode ser solucionada com o seu rearejamento.

Condutividade

A condutividade é definida como a capacidade de se conduzir corrente elétrica. Esse parâmetro indica a quantidade de sais existentes em meio aquático, representando uma medida indireta da concentração de poluentes. Em geral para níveis superiores a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ num rio admite-se a existência de um poluente.²⁶

Turvação

A turvação de uma água pode ser causada por uma enorme variedade de matérias em suspensão, podendo ser de origem orgânica ou inorgânica e variando desde partículas coloidais até sólidos de pequenas ou grandes dimensões. A presença de turvação modifica as condições de iluminação das águas e o alcance da radiação luminosa, influenciando assim a fotossíntese e o crescimento de plantas aquáticas. A eliminação da turvação de uma água pode ser realizada por uma coagulação/sedimentação ou por filtração.

5. Análise do investimento

A implementação de um sistema de vigilância e alerta como já foi mencionado anteriormente requer hardware e software específicos, o que implica alguns custos. O material necessário descrito no ponto 4.3 e os seus custos estão referidos na tabela 6.

Tabela 6 - Descrição do modelo e preço do material a utilizar no sistema de vigilância e alerta.

Material	Modelo	Preço (euros)
Unidade Telemetria Remota	A753 addWAVE GSM/GPRS	1.850,00 €
Painel Solar	9V, 460mA, 4.3W	176,00 €
Estação de Base	A850 Telemetry Gateway	1.380,00 €
Mastro	4 Metros	79,00 €
Caixa de Protecção	Thalassa PLM	200,00 €
Sonda multiparamétrica	WQC-24	2.366,00 €
Software	addVANTAGE Pro 6.1	990,00 €
Cabo de extensão	10 Metros	75,00 €
Conector 7 pinos	Binder	66,00 €
Medidor de Velocidade	OTT SLD	8000,00 €
	Total	15.182,00 €

6. Conclusões

O sistema de vigilância/alarme que neste documento é proposto pretende vir a ser implementado em Pontão d'Alheira, a 2 km do Parque Biológico de Gaia, para em caso de acidente (poluição) ser possível atuar num período de 7 ou 8 horas (atendendo a uma caudal médio de 0,040 m³/s).

Estudar a dispersão de um contaminante e a constante de rearejamento no rio Febros era um objetivo importante para a implementação de um modelo que suportará este sistema de vigilância. Este objetivo foi conseguido para uma parte do troço do rio entre Pontão d'Alheira e o Parque Biológico.

Foram realizadas 2 campanhas de estudo no rio com injeção instantânea de *Rodamina WT* para determinar o coeficiente de dispersão e injeção contínua de propano para determinar a constante de rearejamento. Na primeira campanha (8 de Junho de 2011) a injeção do traçador foi realizada em Casal Drijo e teve três estações de recolha de amostras a 290, 390 e 1100 metros do ponto de injeção. Os valores de coeficiente de dispersão foram de 0,18, 0,15 e 0,39 m²/s, respetivamente, com velocidades de escoamento de 0,084, 0,075 e 0,071 m/s. O ajuste ao modelo TS (Transient Storage) foi bom tendo em conta os coeficientes de correlação de 0,988, 0,998 e 0,986 para a mesma ordem de estações. A segunda campanha (29 de Junho de 2011) teve a injeção de traçador no mesmo local mas apenas duas estações de amostragem a 290 e 1100 metros. Os valores do coeficiente de dispersão foram de 0,15 e 0,81 m²/s, respetivamente, para valores de velocidade de escoamento de 0,063 e 0,052 m/s. Os valores do coeficiente de correlação no ajuste ao modelo TS foram de 0,982 e 0,957 para a mesma ordem de estações.

A constante de rearejamento obtida foi de 13,4 dia⁻¹, que é um valor elevado e que permitiu concluir da elevada dessorção do propano naquele troço do rio devido à baixa profundidade. No entanto este valor permitirá no futuro corrigir a evolução temporal da concentração de um contaminante ao longo do rio e nas zonas estagnadas.

Após uma análise do investimento à implementação deste projeto chegou-se à conclusão que o valor de investimento é de 15.182,00 €.

Bibliografia

1. Andorinha Digital, acessido a 6 de Julho de 2011, <http://andorinhadigital.blogspot.com/2009/12/roteiro-cultural-1-rio-febros.html>
2. Wikipédia, Rio Febros, acessido a 7 de Julho de 2011, http://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Febros
3. Casa de Sarmento, Centro de estudos do património, Febros: uma relíquia lexical zoonímica latina, acessido a 6 de Julho de 2011, http://www.csarmento.uminho.pt/docs/ndat/rq/RG078_23.pdf
4. Junta de Freguesia de Seixezelo, acessido a 6 de Julho 2011, http://jfseixezelo.pt/website/index.php?option=com_content&task=view&id=21&temid=35
5. Um retrato da biodiversidade na área metropolitana do Porto, acessido a 7 de Julho 2011, http://www.campoaberto.pt/wp-content/uploads/2010/12/Retrato_da_biodiversidade_na_AMP.pdf
6. Acessido a 7 de Julho de 2011, http://www.avintes.net/v_avintes/broa.htm
7. Jornal de Notícias, Ácido contaminou afluente do Douro, acessido a 19 de Julho de 2011, http://www.jn.pt/paginainicial/pais/concelho.aspx?Distrito=Porto&Concelho=Porto&Option=Interior&content_id=1004441
8. Coelho, Pedro M. H. S.; **Modelação Matemática da Qualidade da Água em Sistemas Albufeira-Rio**. Dissertação de Doutoramento pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2009.
9. Quadrado, Felisbina, Gomes, Fernanda e Rodrigues, António C.; **Sistema de Vigilância de Qualidade de Água**. INAG-DSRH, 1997.
10. Broer G.J.A.A.; **Alarm System for Accidental Pollution on the River Rhine**. Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, 1991.
11. Pintér, Gyorgy G. and Hartong, Hans J.G.; **The Danube Accident Emergency Warning System in Operation**.
12. Yuan, Xuying, Wu, Yijin, Liang, Shuang, Liao, Wei, Tian, Liangyue, Huang, Xi, Zhang, Hao and Huang, Bei; **Early Warning and Emergency Response System for Water Pollution**. International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 2009.
13. Hu, Bin. Hu, Bo, Wan, JiZheng, Nie, Huilan, and Zhai, Chongzhi; **Safe river water: A ubiquitous and collaborative water quality monitoring solution**. ScienceDirect, 2009.

14. Storey, Michael V., Gaag, Bram van der, and Burns, Brendan P.; **Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems**. ScienceDirect, 2011.
15. Han, Li, Ruimei, Wang, Jian, Zhang, Zetian, Fu and XiaoShuan, Zhang; **Developing a knowledge-based early warning system for fish disease/health via water quality management**. ScienceDirect, 2009.
16. Telles, Wagner R.; **Simulação do transporte horizontal bidimensional de substância conservativa**. Dissertação mestrado, programa de pós graduação em Modelagem Computacional do Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.
17. Lima, Ana S. A.; **Modelação do transporte e dispersão de um marcador corado no rio Febros**. Dissertação de mestrado em Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2009.
18. Runkel, Robert L.; **Using OTIS to Model Solute Transport in Streams and Rivers**. USGS, 2000.
19. Formentini, Thiago A.; **Coeficientes de Desoxigenação e de Reaeração superficial em trechos do rio Vacacaí Mirim**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Santa Maria, 2010.
20. KILPATRICK, Frederick A. *et al.*; **Determination of stream reaeration coefficients by use of tracers**. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Chapter A18. Book 3 - Applications of Hydraulics. 1989.
21. CHAPRA, Steven C.; DI TORO, Dominic M.; **Delta Method for estimating primary production, respiration, and reaeration in streams**. Journal of Environmental Engineering, Vol. 117, No. 5, September/October, 1991.
22. YOTSUKURA, N. *et al.*; **An assessment of steady-state propane-gas tracer method for reaeration coefficients - Cowaselon Creek, New York**. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations 83-4183, 88 p. 1983.
23. Ribeiro, Celso B. M.; **Sistema de alerta ambiental fundamentado em estudo teórico-experimental de transporte e dispersão de poluentes solúveis em cursos de água**. Tese, programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Viçosa, 2007.
24. SCHULZ, H.E.; **Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície**. 1985. 299p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 1985.

25. Gleizer, Simone; **Determinação Experimental do Coeficiente de Reação em Rios com o uso de Traçador Inerte Gasoso**. Dissertação mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992.
26. Mendes, Benilde, Oliveira, J.F.S.; Qualidade da água para consumo humano. LIDEL, 2004.

Anexos

Anexo A – Determinação do caudal do rio nas diversas estações.

Dia 8 de Junho de 2011

Estação 1 (290 metros):

Largura do leito: 1,50 metros

Profundidade: 0,30 metros

Área = 0,45 m²

Velocidade superficial = 0,081 m/s

Caudal = 0,036 m³/s

Estação 2 (390 metros):

Largura do leito: 1,4 metros

Profundidade: 0,4 metros

Área = 0,56 m²

Velocidade superficial = 0,074 m/s

Caudal = 0,041 m³/s

Estação 3 (1100 metros):

Largura do leito: 3 metros

Profundidade: 0,2 metros

Área = 0,6 m²

Velocidade superficial = 0,070 m/s

Caudal = 0,042 m³/s

Dia 29 de Junho de 2011

Estação 1 (290 metros):

Largura do leito: 1,50 metros

Profundidade: 0,30 metros

Área = 0,45 m²

Velocidade superficial = 0,065 m/s

Caudal = 0,029 m³/s

Estação 2 (1100 metros):

Largura do leito: 3 metros

Profundidade: 0,2 metros

Área = 0,6 m²

Velocidade superficial = 0,052 m/s

Caudal = 0,031 m³/s

Anexo B – Determinação da constante de rearejamento.

$$K_p = \frac{1}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1} \ln \frac{C_1}{C_2}$$

$$C_1 = 10,8 \text{ ppb}$$

$$C_2 = 8,2 \text{ ppb}$$

$$\bar{t}_1 = 4628,6 \text{ s}$$

$$\bar{t}_2 = 2160,0 \text{ s}$$

$$K_p = 0,00011 \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{K_p}{K_a} = 0,72$$

$$K_a = 0,00015 \text{ s}^{-1}$$

$$K_a = 13,4 \text{ dia}^{-1}$$

Anexo C – Curva de calibração do propano.

Em laboratório foram preparados vários padrões de propano e realizou-se uma curva de calibração.

Tabela 7 - Concentrações dos padrões de propano e as respectivas áreas dos cromatogramas.

Padrões	Concentração (ppb)	Área (mV.min)
0	9,85	30
1	19,7	87,0
2	39,4	232,5
3	59,1	588,7
4	78,8	764,7
5	118,2	926,6
6	236,4	1580,8
7	472,8	4019,7
8	948,6	7692,9

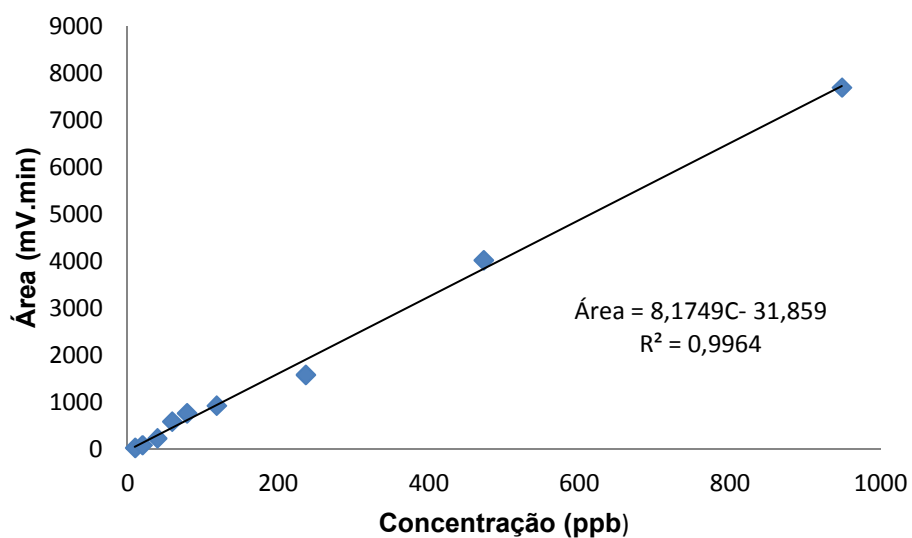


Figura 36 - Gráfico representativo da curva de calibração do propano que relaciona a concentração com a área do pico do cromatograma.

Anexo D – Concentração de *Rodamina WT* nas diferentes estações.

As concentrações apresentadas nas tabelas seguintes são valores de campo. As amostras de rio que continham *Rodamina WT* foram analisadas num Fluorímetro da Turner Designs modelo 10 e convertidas em concentração, tendo em atenção a escala que indicava.

Dia 8 de Junho de 2011

- Estação 1 (290 metros)

Tabela 8 - Concentrações de *Rodamina WT* ao longo do tempo na estação 1.

Hora	Tempo (min)	Escala	Leitura	Concentração (ppb)
14:05	35	X100x31,6	4,8	0,15
14:13	42	X100x10	4,5	0,45
14:22	51	X1x10	3,3	33
14:26	55		4,3	43
14:33	62		4,8	48
14:38	67	X1x31,6	7,9	25
14:43	72		5,2	16,5
14:48	77		2,6	8,2
14:53	82		1,5	4,75
15:15	104	X100x10	7,1	0,71
15:20	109		6,1	0,61
15:25	114		5,6	0,56
15:30	119		5	0,5
15:56	125		3	0,3

- **Estação 2 (390 metros)**

Tabela 9 - Concentrações de *Rodamina WT* ao longo do tempo na estação 2.

Hora	Tempo (min)	Escala	Leitura	Concentração (ppb)
14:12	42	X100x31,6	4,3	0,14
14:22	52		4,3	0,14
14:34	64		5,6	0,18
14:49	79	X1x10	2,2	22
14:52	82		3	30
14:54	84		3,6	36
14:57	87		3,7	37
15:00	90		3,6	36
15:04	94		3	30
15:13	103	X1x31,6	5	15,8
15:21	111		2,2	6,96
15:30	120	X100xMS	3,4	3,4
15:45	135	X100x3,16	3,7	1,17
16:11	161	X100x10	4,5	0,45
16:25	175		3,7	0,37
16:45	195		3,1	0,31

- Estação 3 (1100 metros)

Tabela 10 - Concentrações de *Rodamina WT* ao longo do tempo na estação 3.

Hora	Tempo (min)	Escala	Leitura	Concentração (ppb)
16:38	188	X100x31,6	9,3	0,29
17:02	212		7,2	0,23
17:11	221	X100xMS	4,5	4,5
17:15	225		5,8	5,8
17:20	230		7,6	7,6
17:30	240	X1x31,6	3,2	9,97
17:40	250		4,2	13,3
17:50	260		4,3	13,6
18:04	274		3,6	11,4
18:15	285		3	9,5
18:30	300		1,9	6
18:45	315	X100xMS	4	4
19:00	330	X100x3,16	6,8	2,15
19:15	345		4,2	1,33
19:30	360		2,95	0,93
19:45	375	X100x10	2,05	0,21
20:00	390		1,65	0,17

Dia 29 de Junho de 2011▪ **Estação 1 (290 metros)**Tabela 11 - Concentrações de *Rodamina WT* ao longo do tempo na estação 1.

Hora	Tempo (min)	Escala	Leitura	Concentração (ppb)
08:10	50	X10x31,6	5	0,16
08:15	55		5,1	1,61
08:20	60	X1xMS	3,2	3,2
08:25	65	X1x10	3,2	32
08:44	84		5,4	54
08:48	88		4,7	47
08:52	92		3,5	35
09:06	106	X1x31,6	3,5	11,1
09:10	110		2,6	8,2
09:15	115		1,9	6,0
09:22	122	X100xMS	3,4	3,4
09:27	127	X100x31,6	7,8	2,47
09:32	132		5,7	1,8
09:37	137		4,5	1,42
09:42	142		3,5	1,11

▪ Estação 2 (1100 metros)

Tabela 12 - Concentrações de *Rodamina WT* ao longo do tempo na estação 2.

Hora	Tempo (min)	Escala	Leitura	Concentração (ppb)
10:32	192	X100x10	3	0,3
10:42	202	X100x31,6	2,8	0,09
10:54	214	X100x10	1	0,1
11:05	225		2,4	0,24
11:16	236		7,2	0,72
11:26	246	X100x3,16	5,2	1,65
11:26	256	X100xMS	3	3
11:41	261	X1x31,6	1,2	3,8
11:46	266		1,5	4,7
11:51	271		1,6	5,1
11:56	276		1,8	5,7
12:01	281		1,8	5,7
12:06	286		1,8	5,7
12:11	291		2	6,3
12:21	301		2	6,3
12:31	311		2,5	7,9
12:41	321		2,9	9,2
12:51	331		3,5	11,1
13:01	341		3,9	12,3
13:11	351		4,1	12,97
13:21	361		4	12,65
13:31	371	3,8	12,0	
13:51	391	2,8	8,9	
14:11	411	1,9	6,0	
14:31	431	X100xMS	4	4
14:51	451	X100xMS	2,8	2,8
15:11	471	X100x3,16	5,7	1,8
15:32	492	X100x3,16	4	1,26
15:51	511	X100x10	8,8	0,88
16:11	531		6,3	0,63
16:31	551		4,8	0,48

Anexo E – Concentração propano nas diferentes estações.

As tabelas em baixo indicam os valores de concentração nas duas estações. A área é determinada recorrendo a Cromatografia gasosa e através da curva de calibração é convertida em concentração.

▪ Estação 1 (140 metros)

Tabela 13 - Concentrações de propano ao longo do tempo na estação 1 e respetiva concentração média.

Tempo (min)	Área	Concentração (ppb)	Concentração Média (ppb)	
70	44,2	9,3	10,0	
70	54,7	10,6		
70	51,4	10,2		
90	60,6	11,3	11,2	
90	56,7	10,8		
90	61,6	11,4		
120	59,9	11,2	11,2	
			Concentração Média Total (ppb)	10,8

- **Estação 2 (290 metros)**

Tabela 14 - Concentrações de propano ao longo do tempo na estação 2 e respetiva concentração média.

Tempo (min)	Área	Concentração (ppb)	Concentração Média (ppb)
90	35,8	8,3	7,9
90	28,6	7,4	
120	32,4	7,9	7,9
140	46,5	9,6	8,8
140	38,3	8,6	
140	43,4	9,2	
140	31,5	7,7	
Concentração Média Total (ppb)			8,2

Anexo F – Determinação dos parâmetros pelo modelo TS.

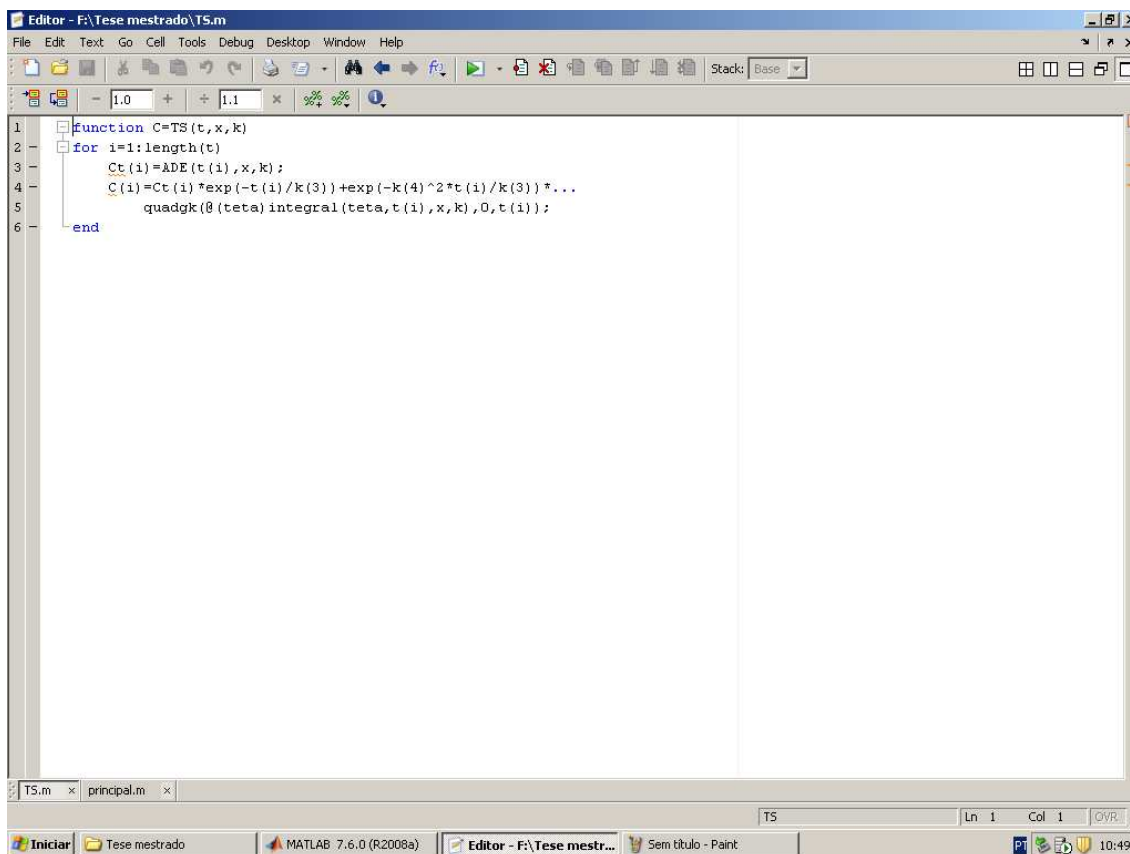
Estes valores foram determinados recorrendo à ferramenta *Matlab*. As imagens seguintes representam as funções criadas em *Matlab* para que seja possível determinar os vários parâmetros.

```

1 clear all; clc; close all; format short g;
2
3 global x area
4 %tdata=xlswrite('Tratamento_resultados_actua', 'Pinheiral 23-10', 'g5:g32');
5 %tdata=xlswrite('Tratamento_resultados_actua', 'PA 23-10', 'g5:g62');
6 %tdata=xlswrite('Tratamento_resultados_actua', 'Menesas', 'g5:g36');
7 %tdata=xlswrite('Tratamento_resultados_actua', 'Giestas', 'f5:f50');
8 tdata=xlswrite('F:\Tese_mestrado\Campanha 29_06_2011.xlsx', '1100 m', 'e6:e36'); %valores lidos do ficheiro
9 tdata=tdata*60;
10 %Cdata=xlswrite('Tratamento_resultados_actua', 'Pinheiral 23-10', 'h5:h32');
11 %Cdata=xlswrite('Tratamento_resultados_actua', 'PA 23-10', 'h5:h62');
12 %Cdata=xlswrite('Tratamento_resultados_actua', 'Menesas', 'h5:h36');
13 %Cdata=xlswrite('Tratamento_resultados_actua', 'Giestas', 'g5:g50');
14 Cdata=xlswrite('F:\Tese_mestrado\Campanha 29_06_2011.xlsx', '1100 m', 'g6:g36');
15 x=input('distância ao ponto de injeção=');
16 k0=[.01, 1, 10000, 1];
17 opcao=optimset('maxfunvals', 10000, 'maxiter', 10000, 'tolfun', 1e-6, 'tolx', 1e-6);
18 [k, f]=fminsearch(@(k) sse(tdata, Cdata, x, k), k0, opcao);
19 areal=quadgk(@(t) TS(t, x, k), 0, tdata(end))/1000*k(1);
20 area
21 R2=1-f/var(Cdata)/(length(Cdata)-1);
22 R2ajustado=1-f/(length(Cdata)-length(k)-1)/var(Cdata);
23 t=[11520:120:33060];
24 C=TS(t, x, k)*areal;
25 xlswrite('F:\Tese_mestrado\Campanha 29_06_2011.xlsx', t/60, '1100 m', 'h6:h186');
26 xlswrite('F:\Tese_mestrado\Campanha 29_06_2011.xlsx', C, '1100 m', 'i6:i186');

```

Figura 37 - Imagem representativa da função principal para a aplicação do modelo TS em *matlab*.



```
1 function C=TS(t,x,k)
2 for i=1:length(t)
3     Ct(i)=ADE(t(i),x,k);
4     C(i)=Ct(i)*exp(-t(i)/k(3))+exp(-k(4)^2*t(i)/k(3))*...
5         quadgk(@(teta) integral(teta,t(i),x,k),0,t(i));
6 end
```

Figura 38 - Imagem representativa da equação do modelo TS inserida em *Matlab*.

Dia 8 de Junho de 2011

▪ **Estação 1 (290 metros)**

Tabela 15 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 1.

Hora	Tempo (min)	C (ppb)	C_{TS} (ppb)
14:05	35	0,15	0,014
14:13	42	0,45	1,93
14:22	51	33	30,6
14:26	55	43	46,3
14:33	62	48	44,2
14:38	67	25	28,6
14:43	72	16,5	15,5
14:48	77	8,2	8,11
14:53	82	4,7	4,56
15:15	104	0,71	0,81
15:20	109	0,61	0,59
15:25	114	0,56	0,44
15:30	119	0,5	0,32
15:56	125	0,3	0,23

Devido a escassez de pontos e para um melhor ajuste do modelo houve a necessidade de através do Matlab criar no mesmo tempo de amostragem pontos intermédios.

Tabela 16 - Determinação de valores de concentração intermédios pelo modelo TS para a estação 1.

Tempo (min)	C_{TS} (ppb)	Tempo (min)	CTS (ppb)
35	0,032141	81	3,98962
37	0,151565	83	3,124665
39	0,551685	85	2,546152
41	1,610068	87	2,161864
43	3,885929	89	1,905579
45	7,956045	91	1,731796
47	14,11336	93	1,610362
49	22,07928	95	1,521886
51	30,92135	97	1,454195
53	39,26339	99	1,399786
55	45,70159	101	1,354091
57	49,22863	103	1,31434
59	49,48467	105	1,278845
61	46,76449	107	1,246561
63	41,8296	109	1,216819
65	35,63743	111	1,189178
67	29,09582	113	1,163327
69	22,90575	115	1,139039
71	17,50385	117	1,116138
73	13,08173	119	1,094481
75	9,646715	121	1,07395
77	7,092912	123	1,054446
79	5,262594	125	1,03588

▪ **Estação 2 (390 metros)**

Tabela 17 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 2.

Hora	Tempo (min)	C (ppb)	C_{TS} (ppb)
14:12	42	0,136076	7,77E-11
14:22	52	0,14	7,32E-05
14:34	64	0,18	0,36
14:49	79	22	22,75
14:52	82	30	30,4
14:54	84	36	34,26
14:57	87	37	37,16
15:00	90	36	36,34
15:04	94	30	30,85
15:13	103	15,82	14,77
15:21	111	6,96	6,88
15:30	120	3,4	3,51
15:45	135	1,17	1,64
16:11	161	0,45	0,59
16:25	175	0,37	0,36
16:45	195	0,31	0,16

▪ Estação 3 (1100 metros)

Tabela 18 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 3.

Hora	Tempo (min)	C (ppb)	C_{TS} (ppb)
16:38	188	0,29	0,087
17:02	212	0,23	1,99
17:11	221	4,5	4,13
17:15	225	5,8	5,36
17:20	230	7,6	7,06
17:30	240	9,97	10,48
17:40	250	13,29	12,95
17:50	260	13,61	13,68
18:04	274	11,39	11,88
18:15	285	9,49	9,28
18:30	300	6,01	5,87
18:45	315	4	3,56
19:00	330	2,15	2,27
19:15	345	1,33	1,58
19:30	360	0,93	0,95
19:45	375	0,21	0,82
20:00	390	0,17	0,74

Dia 29 de Junho de 2011

▪ **Estação 1 (290 metros)**

Tabela 19 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 1.

Hora	Tempo (min)	C (ppb)	C_{TS} (ppb)
08:10	50	0,158	0,387
08:15	55	1,614	2,76
08:20	60	3,2	10,83
08:25	65	32	26,86
08:44	84	54	56,285
08:48	88	47	45,931
08:52	92	35	34,694
09:06	106	11,076	9,755
09:10	110	8,228	6,995
09:15	115	6,013	5,019
09:22	122	3,4	3,714
09:27	127	2,46	3,258
09:32	132	1,804	2,969
09:37	137	1,424	2,762
09:42	142	1,108	2,599

Nesta estação houve também a necessidade de criar pontos intermédios com recurso ao *MATLAB* para que a curva do modelo TS se ajusta-se melhor.

Tabela 20 - Determinação de valores de concentração intermédios pelo modelo TS para a estação 1.

Tempo (min)	C_{TS} (ppb)	Tempo (min)	C_{TS} (ppb)
50	0,24633	98	20,34095
52	0,655299	100	17,09375
54	1,531007	102	14,40388
56	3,186046	104	12,19887
58	5,977953	106	10,40238
60	10,22053	108	8,94173
62	16,07054	110	7,752154
64	23,42907	112	6,778565
66	31,89847	114	5,975701
68	40,81824	116	5,307323
70	49,37406	118	4,744979
72	56,74812	120	4,266625
74	62,26707	122	3,855331
76	65,50883	124	3,498139
78	66,34715	126	3,185127
80	64,93337	128	2,908658
82	61,6314	130	2,662808
84	56,92958	132	2,442929
86	51,35237	134	2,245325
88	45,38837	136	2,067017
90	39,44306	138	1,905567
92	33,81672	140	1,758955
94	28,70312	142	1,625482
96	24,20235		

- **Estação 2 (1100 metros)**

Tabela 21 - Concentrações determinadas pelo modelo TS para a estação 2

Hora	Tempo (min)	C (ppb)	C_{TS} (ppb)
10:32	192	0,3	0,02
10:42	202	0,089	0,058
10:54	214	0,100	0,174
11:05	225	0,240	0,405
11:16	236	0,720	0,826
11:26	246	1,646	1,43
11:26	256	3,000	2,278
11:41	261	3,797	2,795
11:46	266	4,747	3,371
11:51	271	5,063	3,999
11:56	276	5,696	4,672
12:01	281	5,696	5,378
12:06	286	5,696	6,105
12:11	291	6,329	6,84
12:21	301	6,329	8,273
12:31	311	7,911	9,563
12:41	321	9,177	10,608
12:51	331	11,076	11,334
13:01	341	12,342	11,702
13:11	351	12,975	11,709
13:21	361	12,658	11,384
13:31	371	12,025	10,778
13:51	391	8,861	8,997
14:11	411	6,013	6,906
14:31	431	4	4,932
14:51	451	2,8	3,307
15:11	471	1,804	2,099
15:32	492	1,266	1,236

Anexo G – Características do Rotâmetro.

GEMÜ®

Série 10A6131

Rotômetros metálicos

Materiais de construção

Tubo borossilicato
 Flutuadores vidro negro, inox ou safira
 Acessórios de ligação aço inox 316
 Válvula de agulha aço inox com empanques em teflon
 Válvula de retenção esfera de nylon
 Corpo aço inox 304
 "O" rings viton A



Características técnicas

Ligações rosca 1/4 NPT fêmea por trás
 Montagem em linha
 Escala em percentagem
 Temperatura máxima 120°C
 Pressão máxima 18 bar

Água		Ar		Tubo	Flutuador
[cm ³ /min.]	[l/h]	[Ncm ² /min]	[N l/h]		
4,6	0,28	380	23	FP-1/8-08-P-3/37	BG-18
8,5	0,5	560	34	FP-1/8-08-P-3/37	SA-18
20	1,2	900	54	FP-1/8-08-P-3/37	SS-18
29	1,7	1600	95	FP-1/8-20-P-3/37	BG-18
48	2,9	2000	120	FP-1/8-20-P-3/37	SA-18
90	5,4	3200	190	FP-1/8-20-P-3/37	SS-18
135	8	6500	380	FP-1/8-15-P-3/37	CD-14
200	12	9500	560	FP-1/4-20-P-3/37	CD-14
400	24	13000	800	FP-1/4-15-P-3/37	SS-14
450	27	18600	1100	FP-1/4-41-G-3/37	CD-14
580	34	19000	1150	FP-1/4-20-P-3/37	SS-14
1250	75	40000	2300	FP-1/4-41-G-3/37	SS-14

gerar o manual de instalação

Figura 39 - Características do Rotâmetro.