

**OPTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO,  
CONTROLO E SUPERVISÃO DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA**

Cláudia Marisa Martins Moreira

Licenciada em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela Faculdade de  
Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre  
em  
Automação, Instrumentação e Controlo

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**  
Mestrado em Automação, Instrumentação e Controlo  
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

Setembro de 2004

Dissertação realizada no âmbito do programa do  
Mestrado em Automação, Instrumentação e Controlo da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação realizada sob a supervisão do  
Professor Doutor António Paulo Gomes Mendes Moreira  
Professor Auxiliar do Departamento de  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## **Resumo**

Uma Estação de Tratamento de Água (ETA) envolve processos complexos decompostos em diversas fases. De acordo com a qualidade da água captada, o processo de tratamento de água pode ter mais ou menos fases e os reagentes utilizados diferem. No entanto, genericamente este processo é composto por 5 fases: Pré Oxidação, Coagulação, Floculação, Filtração e Desinfecção Final.

Para o correcto funcionamento de uma ETA, máxima rentabilização desta e controlo perfeito da qualidade da água, todas as fases devem estar optimizadas, quer em termos de funcionamento (equipamentos, programação e algoritmos de controlo), quer em termos de monitorização e comando (supervisão).

Constata-se, no entanto, que por vezes, os sistemas funcionam correctamente obtendo um produto final com qualidade, mas não funcionam de uma forma óptima em termos de gastos energéticos, gastos de reagentes, perdas de água, tempos de resposta, eficiência na manutenção preventiva e outros. O funcionamento destes sistemas não é muitas vezes modificado ou optimizado porque sempre funcionaram bem e da mesma forma.

Existem indicadores, como por exemplo gastos energéticos, que sendo elevados são rapidamente detectados e geram uma série de acções como tentativa de correcção. Há no entanto muitos outros, como por exemplo gastos em reagentes, que só com um espírito mais crítico e com um conhecimento profundo, quer da programação e dos algoritmos de controlo utilizados na automação de todo o processo, quer do processo em si, se consegue avaliar se é possível e viável optimizar.

Este trabalho consistiu no estudo e implementação de melhoramentos nos sistemas de automação, controlo e supervisão de Estações de Tratamento de Água. Para a sua realização foram utilizadas duas instalações da empresa Águas do Douro e Paiva: a ETA de Castelo de Paiva e a ETA de Lousada.

Numa fase inicial, realizou-se um estudo do processo de tratamento de água e do sistema de automação, supervisão e controlo. De seguida, fez-se uma análise dos pontos a intervir. Estudou-se a forma e a viabilidade de melhorar ou optimizar, chegando à conclusão, que no caso dos algoritmos de controlo, teria de ser efectuado um trabalho prévio, para permitir a aquisição de dados. Desenvolveu-se de raiz uma nova supervisão e melhorou-se a rede de campo, por forma a criar condições para efectuar registos e

guardar histórico das variáveis do processo. Também foi necessário o estudo, aquisição e implementação de instrumentação para incluir nos registos algumas variáveis do processo, importantes para o desenvolvimento de novos algoritmos. Recolheram-se dados e identificou-se o modelo dinâmico do processo de doseamento de Cloro. Com base nesse modelo, projectou-se e implementou-se um controlo automático de doseamento de Cloro. Por fim, comparou-se com a situação inicial e fez-se uma avaliação dos benefícios conseguidos.

## **Abstract**

A Water Treatment Plant (WTP) combines complex processes divided in different stages. According to the collected raw water quality, the process of water treatment may have more or less stages and the chemicals used vary. Yet, in general, this process has five stages: pre-oxidation, coagulation, flocculation, filtration and final disinfection.

For a good behavior of a WTP and a perfect control of water quality, all stages must be optimized both in terms of operation (equipment, programming and control algorithms) and in terms of monitorization and command (supervision).

However, sometimes, systems run properly and the final product is achieved with quality, but these same systems don't run in an optimal way in terms of energetic and chemical costs, water losses, response times, preventive maintenance and others. The way this systems run is not often modified or optimized because they always run well and in the same way.

There are some indicators, for example energetic costs, which when are high are immediately detected and create a serial of actions with the purpose to correct this situation. There are many others, for example chemical costs, that only with a critical point of view and a deeper knowledge, both in programming and control algorithms used in process automation and in the process itself, can be valuated if it's possible and feasible to optimize.

This work consists on the study and implementation of improvements in the automation, control and supervision systems of Water Treatment Plants. The plants here referred are both from the Águas do Douro e Paiva company: WTP of Castelo de Paiva and the WTP of Lousada.

At first, a study of the water treatment process and of the automation, supervision and control systems was conducted. Then, an analysis of the points to study was made. The feasibility and the way to improve or optimize were studied, and it came to the conclusion that, in case of the control algorithms, some previous work should be done to allow data acquisition. So, a new supervision was developed and the field net was improved, in order to create ways to gather data and store the values of the process variables. It was also necessary the study, acquisition and implementation of instrumentation to include in the records some process variables, important to the

development of new algorithms. Data was collected and the dynamic model of the chlorine dosing process was identified. Based in this model, an automatic control of the chlorine dosage was projected and implemented. Finally, this was confronted with the initial situation and a valuation of the benefits achieved was conducted.

# Índice

1.	Introdução .....	2
1.1	Motivação .....	2
1.2	Objectivos da Tese.....	3
1.3	Organização da Tese.....	3
2	Processo e sistema de automação .....	6
2.1	Descrição do processo de captação, tratamento e entrega de água.....	6
2.1.1	Captação e Elevação de água bruta.....	7
2.1.2	Obra de Entrada .....	8
2.1.3	Pré Oxidação.....	8
2.1.4	Saturação.....	9
2.1.5	Coagulação e Floculação .....	10
2.1.6	Filtração e Remineralização.....	11
2.1.7	Lavagem dos filtros .....	13
2.1.8	Correcção de pH .....	14
2.1.9	Cloragem.....	15
2.1.10	Armazenamento de água tratada.....	15
2.1.11	Elevação de água tratada.....	16
2.1.12	Espessamento.....	16
2.1.13	Desidratação de Lamas .....	17
2.1.14	Armazenamento e Expedição de Lamas.....	17
2.2	Descrição do sistema de Automação e Supervisão.....	18
3	Análise crítica e estratégia de acção .....	24
3.1	Supervisão.....	25
3.2	Autómatos e rede de campo.....	29
3.3	Algoritmos de controlo .....	30
3.4	Instrumentação.....	32
3.5	Estratégia de Acção .....	38
4	Melhoramentos implementados no sistema de automação.....	44
4.1	Supervisão.....	44
4.1.1	Ligações efectuadas .....	44

4.1.2	Desenvolvimento.....	46
4.1.3	Implementação .....	55
4.1.4	Resultados .....	57
4.2	Autómatos e rede de campo .....	57
4.2.1	Alterações efectuadas .....	58
4.2.2	Resultados .....	59
4.3	Controlo automático de doseamento de Cloro .....	60
4.3.1	Identificação do modelo do processo .....	63
4.3.2	Projecto do controlador .....	74
4.3.3	Implementação e teste do controlador.....	88
4.4	Instrumentação adicionada.....	92
4.4.1	Controlo automático de doseamento de Dióxido de Cloro .....	92
4.4.2	Controlo da turvação da água filtrada .....	94
5	Considerações finais.....	98
5.1	Objectivos alcançados .....	98
5.2	Conclusões .....	99
5.3	Desenvolvimentos futuros.....	99
5.3.1	Sistema servidor-cliente .....	99
5.3.2	Controlo automático de doseamento de Dióxido de Cloro .....	100
5.3.3	Controlo automático de doseamento de Cloreto Férrico.....	100
5.3.4	Lavagem dos filtros.....	101
Anexo A	Sinópticos da supervisão desenvolvida .....	104
	Bibliografia.....	123

## Índice de figuras

Figura 2-1 Diagrama do processo de tratamento de água (ETA de Castelo de Paiva).....	7
Figura 2-2 Obra de Entrada. ....	8
Figura 2-3 Pré Oxidação. ....	8
Figura 2-4 Saturação. ....	9
Figura 2-5 Coagulação e Floculação. ....	10
Figura 2-6 Filtração e Remineralização. ....	11
Figura 2-7 Correção de pH. ....	14
Figura 2-8 Cloragem. ....	15
Figura 2-9 Armazenamento. ....	16
Figura 2-10 Equalização de águas de lavagem. ....	16
Figura 2-11 Espessamento. ....	17
Figura 2-12 Desidratação de Lamas. ....	17
Figura 2-13 Diagrama da Rede de Automação. ....	19
Figura 3-1 Procedimento para identificação do modelo do processo. ....	39
Figura 3-2 Estratégia de acção. ....	41
Figura 4-1 Colocação da nova supervisão na rede de automação. ....	45
Figura 4-2 RSLinx: configuração das redes DH+ e DH-485. ....	46
Figura 4-3 Exemplificação: botões e ligações (sinóptico principal). ....	48
Figura 4-4 Exemplificação: informação por sinóptico (sinóptico dos filtros). ....	50
Figura 4-5 Exemplificação: informação por filtro (sinóptico do filtro 3). ....	51
Figura 4-6 Exemplificação: evidenciar informação (sinóptico amostragem). ....	52
Figura 4-7 Exemplificação: situação de alarme (sinóptico tratamento de lamas). ....	53
Figura 4-8 Exemplificação: listagem de alarmes (sinóptico alarmes). ....	54
Figura 4-9 Exemplificação: gráficos (gráfico de vibrações do grupo 2). ....	55
Figura 4-10 Controlo manual do doseamento de Cloro (alterações muito brusca). ....	61
Figura 4-11 Controlo manual do doseamento de Cloro (alterações muito suaves). ....	62
Figura 4-12 Diagrama de blocos do sistema. ....	63
Figura 4-13 Resposta do processo a um impulso. ....	67
Figura 4-14 Pontos de injeção e leitura do Cloro. ....	68
Figura 4-15 Subtracção do ponto inicial de funcionamento. ....	69

Figura 4-16 Variação em relação à recta.....	70
Figura 4-17 Resposta do processo (Cloro residual) e do modelo calculado.....	71
Figura 4-18 Verificação do modelo com o 2º conjunto de dados.....	71
Figura 4-19 2º Modelo.....	72
Figura 4-20 Verificação do 1º modelo com o 3º conjunto de dados.....	73
Figura 4-21 Verificação do 2º modelo com o 3º conjunto de dados.....	73
Figura 4-22 3º Modelo.....	74
Figura 4-23 Simulação com Matlab – cálculo do ganho do controlador.....	78
Figura 4-24 Simulação da pior combinação dos três modelos com ganho de 0,037.....	79
Figura 4-25 Simulação da pior combinação dos três modelos com ganho 0,06.....	80
Figura 4-26 Simulação com o 1º modelo.....	80
Figura 4-27 Simulação com o 2º modelo.....	81
Figura 4-28 Simulação com o 3º modelo.....	81
Figura 4-29 Função PID.....	88
Figura 4-30 Menu de configuração da função PID.....	89
Figura 4-31 Conversão da saída do PID.....	89
Figura 4-32 Cálculo do tempo entre impulsos.....	90
Figura 4-33 Temporizador do tempo entre impulsos.....	90
Figura 4-34 Temporizador do tempo de duração dos impulsos.....	90
Figura 4-35 Saída automático - comando bomba de impulsos.....	90
Figura 4-36 Comportamento controlador PI (saída 0 a 655).....	91
Figura 4-37 Resposta do sistema a alterações de “setpoint”.....	92
Figura 4-38 Caudalímetro.....	93
Figura 4-39 Princípio de funcionamento do turbidímetro.....	95
Figura A-1 Sinóptico Principal.....	104
Figura A-2 Sinóptico Captação.....	105
Figura A-3 Sinóptico Captação Medidas.....	106
Figura A-4 Sinóptico Dióxido de Cloro e Cloro.....	107
Figura A-5 Sinóptico Dióxido de Carbono e Cloreto Férrico.....	108
Figura A-6 Sinóptico Filtros.....	109
Figura A-7 Sinóptico Filtros – detalhe “Setpoints”.....	110
Figura A-8 Sinóptico Filtro 1.....	111

Figura A-9 Sinóptico Filtro 3 – detalhe válvula VD306.....	112
Figura A-10 Sinóptico Elevação.....	113
Figura A-11 Sinóptico Elevação ETA Medidas.....	114
Figura A-12 Sinóptico Lamas.....	115
Figura A-13 Sinóptico Lamas – detalhe alarme.....	116
Figura A-14 Sinóptico Amostragem.....	117
Figura A-15 Sinóptico Quadros e Comunicações.....	118
Figura A-16 Sinóptico Alarmes.....	119
Figura A-17 Gráfico Temperaturas Grupo 2.....	120
Figura A-18 Sinóptico Gráfico Vibrações Grupo 2.....	121

## Índice de tabelas

Tabela 2-1 Localização e funcionalidade dos autómatos.....	20
Tabela 4-1 Parâmetros do controlador PI: Cohen-Coon e ITAE. ....	83
Tabela 4-2 Simulações para o modelo "piores caso".....	84
Tabela 4-3 Simulações para o 1º modelo.....	85
Tabela 4-4 Simulações para o 2º modelo.....	86
Tabela 4-5 Simulações com o 3º modelo.....	87

## Siglas

CCG - Carbonato de Cálcio Granular.

ETA – Estação de Tratamento de Água.

PCU – “Process Control Unit”.

POPER – Plano de Controlo de Operação.

SIGI – Sistema de Gestão Integrado.

USEPA - “United States Environmental Protection Agency”.

## **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor António Paulo Moreira pela orientação e disponibilidade.

Ao Eng.º Miguel Ferreira pelo incentivo, sugestões e disponibilidade de recursos para a realização deste trabalho.

Ao Dr. João Vilaça pelos esclarecimentos em relação às Estações de Tratamento de Água onde foi desenvolvido este trabalho e pelas sugestões.

À minha família e amigos pela constante motivação e compreensão.

A todos os colegas que de alguma forma contribuíram para o presente trabalho.

*Cláudia Marisa Martins Moreira*



## **CAPÍTULO 1 – Introdução**

---

# 1. Introdução

## 1.1 Motivação

Para o correcto funcionamento de uma ETA, todas as fases do processo devem estar optimizadas, quer em termos de gastos, quer em termos temporais ou outros. Constatase no entanto, que é vulgar encontrarmos sistemas, que embora estejam a funcionar correctamente, obtendo um produto final com qualidade, não estão a funcionar em condições óptimas. Certos procedimentos são assumidos com base em razões históricas ou de tradição pois “sempre se fez assim” ou com base no conhecimento empírico de alguns utilizadores, sem se questionar o porquê de se fazer assim e se não existiria uma melhor forma de o fazer.

Este trabalho foi desenvolvido em duas instalações da empresa Águas do Douro e Paiva, S.A., (AdDP): a ETA de Castelo de Paiva e a ETA de Lousada. Contudo, os melhoramentos implementados nestas duas instalações são aplicáveis a outras, que envolvam processos semelhantes.

A AdDP é uma empresa certificada em Qualidade, Ambiente e Segurança pelas normas NP EN ISO 9001:2000, NP EN ISO 14001:1999 e OHSAS 18001:1999 (NP 4397):2001. As suas Visão, Missão e Política Empresarial estão bem definidas e servem como base ao planeamento dos objectivos a atingir.

A Visão da AdDP é “Ser uma empresa de referência no sector da indústria da água e um instrumento eficaz para o desenvolvimento da região em que se insere”.

A sua Missão é “Conceber, construir e gerir o sistema de captação, tratamento e adução de água em alta do Grande Porto Sul, garantindo aos municípios aderentes o fornecimento das quantidades necessárias de um produto de qualidade através de processos de produção eficientes e respeitadores dos valores sociais e ambientais mais elevados”.

Na Política Empresarial da empresa, estão expressas as suas principais preocupações. Uma das preocupações da AdDP assenta “na melhoria contínua dos processos, estabelecendo objectivos competitivos que estimulem a AdDP a atingir níveis de desempenho sempre mais elevados, num quadro de eficiência económica e ambiental”.

O presente trabalho foi desenvolvido neste âmbito. Embora as duas instalações se encontrem a funcionar correctamente, produzindo água de qualidade, questionou-se se poderiam funcionar melhor.

A motivação deste trabalho assenta por isso, numa constante preocupação de melhoria contínua dos processos.

### **1.2 Objectivos da Tese**

O objectivo principal deste trabalho foi o de otimizar o sistema de automação, controlo e supervisão de Estações de Tratamento de Água.

Por forma a averiguar a possibilidade de otimizar, fez-se um levantamento de pontos a melhorar em termos de automação, controlo e supervisão de duas Estações de Tratamento de Águas, escolhidas como exemplo. Feito o levantamento e de acordo com as necessidades verificadas, foram definidos quatro objectivos parciais:

1. Desenvolver de raiz um sistema de supervisão (sistema SCADA – “Supervisory, Control and Data Acquisition System”). O programa desenvolvido deveria preencher as lacunas do existente e ir de encontro às necessidades dos seus utilizadores. Teria ainda, a função de aquisição de dados. A criação de histórico das variáveis importantes do processo é de extrema importância, tanto a nível de operação no controlo do processo, como para estudos futuros e criação de novos algoritmos de controlo;
2. Pesquisar, adquirir e implementar, instrumentação “on-line”, que possibilite a automatização de certos procedimentos e desenvolvimento de novos algoritmos;
3. Tornar a rede de automação mais rápida, fiável, segura e com sistema de redundância;
4. Desenvolver e implementar um controlo automático de doseamento de Cloro.

### **1.3 Organização da Tese**

Este trabalho é composto por 5 capítulos organizados da seguinte forma:

#### **Capítulo 1 – Introdução**

Apresenta-se de forma resumida, a motivação que deu origem a este trabalho, os objectivos que se propõe atingir e a sua organização.

### **Capítulo 2 – Processo e sistema de automação**

Faz-se a descrição do processo de tratamento de água e do sistema de automação e supervisão da ETA de Castelo de Paiva.

### **Capítulo 3 – Análise crítica e estratégia de acção**

Descreve-se o estudo efectuado, em termos de metodologia aplicada. Faz-se um levantamento de todos os pontos a melhorar, na ETA de Castelo de Paiva e na ETA de Lousada, e listam-se pontos chave para o desenvolvimento de uma supervisão, uma rede de automação e algoritmos de controlo. Descreve-se ainda, a estratégia de acção adoptada, transmitindo uma ideia global do enquadramento do trabalho.

### **Capítulo 4 – Melhoramentos implementados no sistema de automação**

Apresentam-se os melhoramentos implementados e os resultados obtidos. São as alterações efectuadas: uma supervisão desenvolvida de raiz; alteração da programação dos autómatos; substituição de alguns processadores; desenvolvimento de um controlo automático de doseamento de Cloro e implementação de instrumentação.

### **Capítulo 5 – Considerações finais**

Fala-se dos objectivos atingidos, conclusões do trabalho e desenvolvimentos futuros.

## **CAPÍTULO 2 – Processo e sistema de automação**

---

## **2 Processo e sistema de automação**

Neste capítulo, descreve-se o processo [1] e o sistema de automação da ETA de Castelo de Paiva, tal como se encontravam antes da realização do presente trabalho.

### **2.1 Descrição do processo de captação, tratamento e entrega de água**

A maioria das Estações de Tratamento de Água têm um processo semelhante em termos das etapas que o compõe. As principais diferenças entre elas prendem-se com a capacidade produtiva (o dimensionamento depende da população abastecida) e os reagentes utilizados em cada etapa (os reagentes utilizados são escolhidos de acordo com a qualidade química da água captada: pH, alcalinidade, dureza, condutividade, oxigénio dissolvido, turvação, cheiros, sabores, etc. e com a qualidade biológica da água captada: bactérias, vírus, algas e protozoários).

Para descrição do processo é utilizada a ETA de Castelo de Paiva, por ser uma instalação típica, no âmbito do tratamento de água.

Apresenta-se de seguida (Figura 2-1) o diagrama do processo desta ETA. Cada algarismo representa uma etapa e cada letra representa um reagente que é adicionado em determinada etapa.

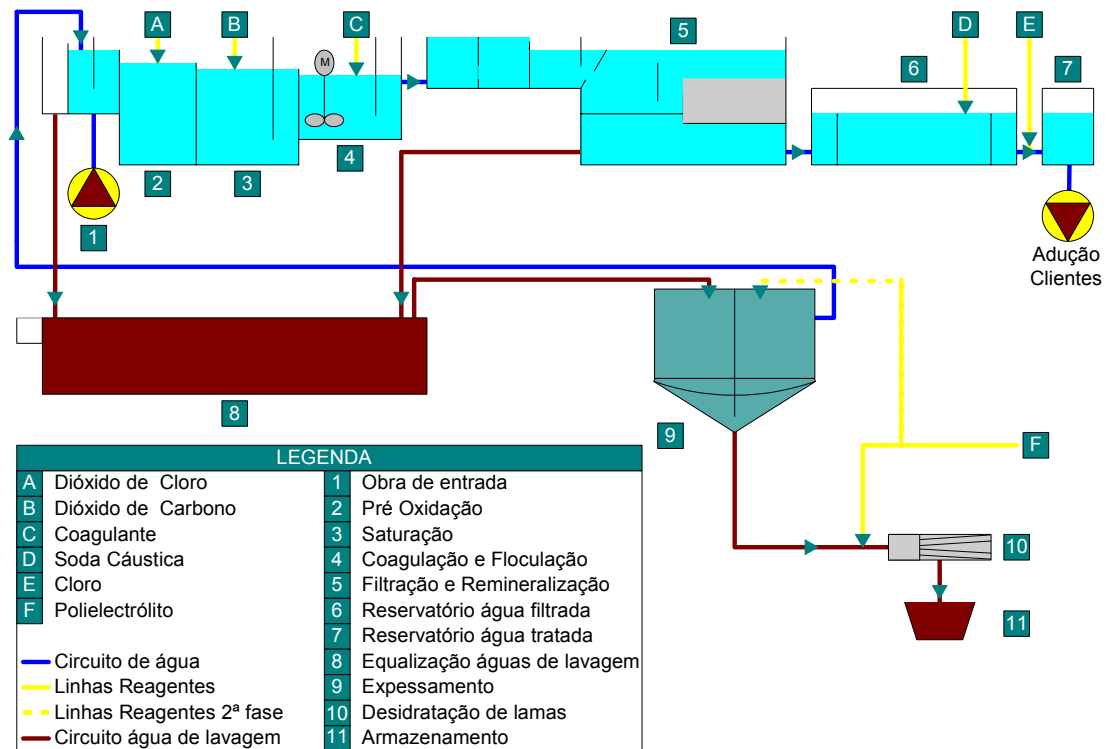


Figura 2-1 Diagrama do processo de tratamento de água (ETA de Castelo de Paiva).

### 2.1.1 Captação e Elevação de água bruta

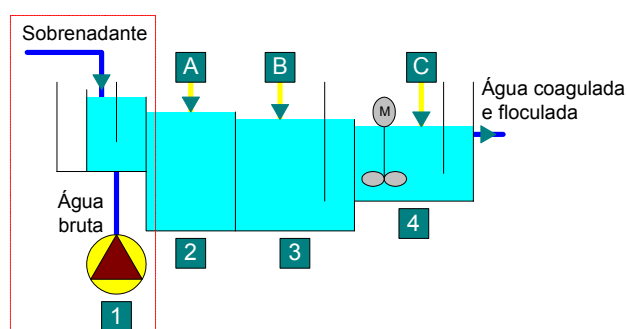
A água tratada nesta ETA é proveniente do Rio Paiva, onde foi construído um açude e uma estação elevatória, que permitem captar e elevar a água.

A montante do açude existe um sistema de drenos, que recolhe a água, após esta ter atravessado uma camada filtrante, constituída por cerca de um metro e meio de areia, brita e rachão, e que a conduz para um poço colector de água bruta. No poço, de treze metros de altura, estão colocadas três bombas submersíveis, duas das quais podem funcionar em simultâneo, de acordo com as necessidades, e a terceira funciona apenas como reserva mecânica das duas primeiras. Tratando-se de bombas com uma potência instalada de 950 KW, o caudal máximo elevado presentemente é de 1.250 m<sup>3</sup>/h (625 m<sup>3</sup>/h por bomba), ou seja 30.000 m<sup>3</sup>/dia (valor equivalente ao consumo de cerca de 150.000 pessoas/dia). A instalação encontra-se preparada para duplicar esta capacidade, colocando mais duas bombas e passando a funcionar com quatro bombas em simultâneo.

Depois de captada, a água bruta é elevada até à Obra de Entrada da ETA, situada à cota de 367 metros.

### 2.1.2 Obra de Entrada

Na Obra de Entrada (Figura 2-2), a água bruta é misturada com a água de sobrenadante resultante do tratamento de lamas (a ser explicado neste texto, no ponto 2.1.12).



Inicia-se aqui o processo de tratamento de água, realizado sem o auxílio de bombas, pois a força da gravidade é suficiente, para que seja percorrido o percurso, desde a Obra de Entrada, até ao Reservatório de Água Tratada.

Figura 2-2 Obra de Entrada.

### 2.1.3 Pré Oxidação

A água bruta proveniente da Obra de Entrada, entra numa chicane, onde é adicionado um oxidante, Dióxido de Cloro ( $\text{ClO}_2$ ), cuja função é quebrar as moléculas orgânicas complexas e desinfectar a água.

Na unidade geradora de Dióxido de Cloro é produzida a solução de Dióxido de Cloro

através da junção de clorito de sódio, Cloro gás e água de diluição.

A solução de Dióxido de Cloro é injectada na água bruta (letra A, Figura 2-3), com o auxílio de duas bombas, sendo uma reserva mecânica da outra.

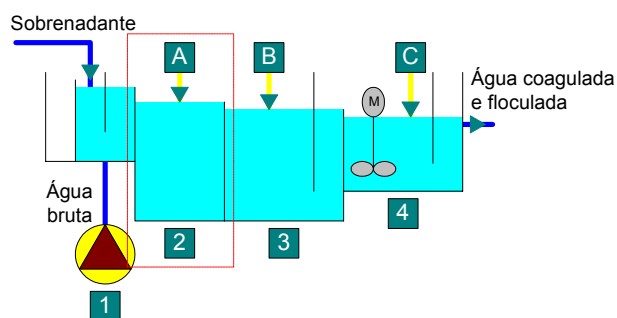


Figura 2-3 Pré Oxidação.

A água atravessa a câmara de contacto com Dióxido de Cloro (n.º 2, Figura 2-3), dimensionada de forma a que a água esteja em contacto com o Dióxido de Cloro por um

tempo suficiente que garanta a Pré Oxidação. O tempo de retenção hidráulico desta câmara é de 10 minutos.

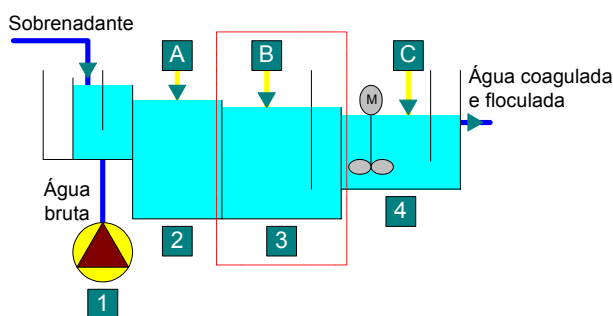
Funcionamento em automático - o controlo de doseamento da solução de Dióxido de Cloro é efectuado em função de duas variáveis: o caudal de água bruta e um “setpoint” de taxa de doseamento de Dióxido de Cloro (0 a 4 mg/l), introduzido a partir da supervisão.

Funcionamento em manual - o controlo de doseamento da solução de Dióxido de Cloro é efectuado em função de um único parâmetro: um “setpoint” de caudal de Dióxido de Cloro (0 a 2300 l/h), introduzido a partir da supervisão.

Funcionamento em manual - local - o controlo de doseamento da solução de Dióxido de Cloro é efectuado localmente pelo operador, aumentando ou diminuindo a frequência da bomba (utilizando para o efeito o comando local), não existindo qualquer tipo de controlo da mesma a partir da supervisão.

### 2.1.4 Saturação

A água pré oxidada entra na câmara de contacto com o Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), (n.º 3, Figura 2-4). Com a adição de Dióxido de Carbono consegue-se uma água mais agressiva, isto é, aumenta-se a acidez através de uma redução de pH e introduz-se carbonatos.



O armazenamento deste reagente é efectuado por um reservatório, com capacidade máxima de sete toneladas, que conserva o produto a uma temperatura de  $-22^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 2-4 Saturação.**

O Dióxido de Carbono é transfegado na forma líquida e evaporado antes da injeção, conseguida através de difusores colocados no fundo da câmara (letra B, Figura 2-4).

Funcionamento em automático - o controlo de doseamento de Dióxido de Carbono é efectuado em função de três variáveis: o caudal de água bruta, o valor de pH lido à saída

da câmara de mistura rápida e um “setpoint” de pH (2 a 12), introduzido a partir da supervisão. Um controlador, do tipo PID, gere a abertura da válvula modeladora, a partir do valor de pH lido e em função do “setpoint”.

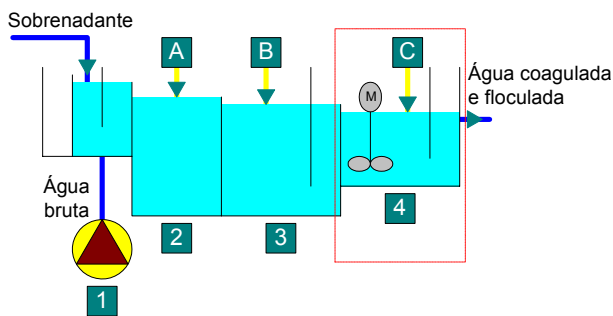
A existência de caudal de água bruta determina o arranque do doseamento e a ausência de caudal origina a paragem do mesmo.

Funcionamento em manual - o controlo de doseamento de Dióxido de Carbono é efectuado em função de um único parâmetro: um “setpoint” de percentagem de abertura da válvula modeladora (0 a 100 %), introduzido a partir da supervisão.

### 2.1.5 Coagulação e Floculação

A água saturada entra na câmara de mistura rápida (n.º 4, Figura 2-5), onde é adicionado Cloreto Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), um coagulante que reage com a água promovendo a união das partículas dispersas e assim formando coágulos. A injeção deste reagente (letra C, Figura 2-5) é efectuada por duas bombas, sendo uma reserva mecânica da outra. Nesta câmara existe um agitador de hélice que tem como objectivo garantir uma boa reacção química da água com o coagulante.

A água coagulada segue para os filtros. O tempo e a agitação, que decorrem entre a



saída da câmara de mistura rápida e a entrada nos filtros, são suficientes para a criação de flocos. Para a etapa de Floculação não é necessária a adição de reagentes, os flocos são criados por união dos coágulos.

**Figura 2-5 Coagulação e Floculação.**

Funcionamento em automático - o controlo de doseamento de Cloreto Férrico é efectuado em função de duas variáveis: o caudal de água bruta e um “setpoint” de taxa de doseamento Cloreto Férrico (0 a 15 mg/l), introduzido a partir da supervisão.

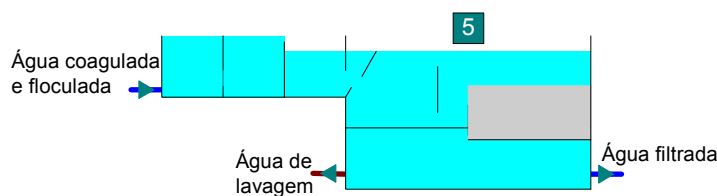
Funcionamento em semi-automático - o controlo de doseamento de Cloreto Férrico é efectuado em função de duas variáveis: o caudal de água bruta e um “setpoint” de caudal da bomba de Cloreto Férrico (0 a 30 l/h), introduzido a partir da supervisão.

Funcionamento em manual - o controlo de doseamento de Cloreto Férrico é efectuado em função de um único parâmetro: um “setpoint” de caudal da bomba de Cloreto Férrico (0 a 30 l/h), introduzido a partir da supervisão. Esse caudal é sempre constante.

Funcionamento em manual - local - o controlo de doseamento de Cloreto Férrico é efectuado localmente pelo operador, aumentando ou diminuindo a frequência da bomba (utilizando para o efeito o comando local), não existindo qualquer tipo de controlo da mesma a partir da supervisão.

### 2.1.6 Filtração e Remineralização

A etapa de Filtração é assegurada por cinco filtros (n.º 5, Figura 2-6). A quantidade de filtros em funcionamento é determinada pelo caudal e pela turvação da água bruta. A



instalação está preparada para funcionar com os cinco filtros em simultâneo.

**Figura 2-6 Filtração e Remineralização.**

A água floculada entra numa caleira e é distribuída em quantidades iguais por cada um dos filtros em serviço. De seguida, a água atravessa uma camada filtrante, constituída por calcário granulado, designado de Carbonato de Cálcio Granular (CCG) e sai dos filtros através de ralos colocados no seu fundo, sendo conduzida por tubagem até uma câmara de restituição, donde transborda por um descarregador para dentro da cisterna de água filtrada. A utilização de CCG garante a retenção dos flocos dispersos, a remoção do possível excesso de Dióxido de Carbono e a remineralização da água, tornando-a menos agressiva em termos de equilíbrio calco-carbónico.

Assim que um filtro entra em funcionamento inicia-se a deposição de partículas no seu meio filtrante e vai aumentando a resistência do filtro à passagem da água – colmatção. À medida que aumenta a colmatção, maior é também a perda de carga (diferença entre a pressão hidrostática, lida acima da placa suporte da camada filtrante e a pressão hidrostática, lida abaixo da camada filtrante) do filtro. Como o caudal de entrada é constante, a altura de água acima do meio filtrante tem tendência a subir, ao longo do tempo de filtração. Um sistema de regulação electro-pneumática da válvula de saída da

água filtrada, garante que os filtros mantenham uma altura de água constante. Para cada filtro existe um sistema de regulação que é composto por:

- Dois transmissores de pressão – um encontra-se acima da camada de meio filtrante e o segundo encontra-se abaixo da placa suporte da camada filtrante. Ambos enviam um sinal de 4 a 20 mA, proporcional à pressão hidrostática a que estão submetidos. Valores de pressão diferencial baixos, indicam que o filtro se encontra lavado e valores de pressão diferencial altos, indicam que o filtro se encontra colmatado. Sempre que se atinge o valor de perda de carga máxima (“setpoint” introduzido através do sistema de supervisão), o filtro sai de funcionamento e só voltará estar disponível para funcionar depois de lavado;
- Transmissor de posição – envia um sinal de 4 a 20 mA, proporcional ao grau de abertura da válvula (0 a 100%);
- Controlador PID – programado no autómato, este controlador recebe os valores de nível de água acima do leito filtrante e em função do “setpoint” desse nível, introduzido através do sistema de supervisão, actua sobre as duas electroválvulas de comando do macaco de duplo efeito, pertencentes à válvula de regulação de saída. Valores de nível baixos, indicam que o caudal de entrada é reduzido. Nesta situação o controlador dá ordem de fecho desta válvula de saída, até se atingir o nível de regulação. Por outro lado, valores de nível altos, indicam que o caudal de entrada aumentou. Nesta situação o controlador dá ordem de abertura da válvula, até se atingir o nível de regulação. Em conclusão, quanto maior for a altura de água no filtro, maior será a abertura da sua válvula de saída, sendo o contrário também verdadeiro.

Filtro em automático – o operador introduz, através do sistema de supervisão, os “setpoints” que determinam o funcionamento do filtro: nível de regulação – valor que o filtro irá manter enquanto se encontrar em filtração; nível de colmatção e tempo de filtração – valores que irão determinar a passagem do filtro ao estado colmatado e a sua entrada automática em lavagem; tempos para lavagem do filtro e as variáveis (ganho, tempo integral e tempo derivativo) do PID de regulação da válvula de saída de água filtrada.

Filtro em manual, com válvula de saída de água filtrada em automático – tal como quando o filtro se encontra em modo automático, a válvula será regulada pelo controlador. No entanto, mesmo que os “setpoints” de nível de colmatação ou tempo e filtração forem atingidos, o filtro não entra em processo de lavagem automaticamente.

Filtro em manual, com válvula de saída de água filtrada em manual – a válvula será regulada pelo operador, introduzindo a percentagem de abertura da válvula. Tal como no caso anterior, se os “setpoints” de nível de colmatação ou tempo e filtração forem atingidos, o filtro não entra em processo de lavagem.

### **2.1.7 Lavagem dos filtros**

A lavagem de um filtro resulta de uma de quatro situações: elevada perda de carga originada por colmatação do meio filtrante, turvação da água filtrada muito elevada, tempo de funcionamento do filtro atingido (“setpoint” introduzido pelo operador, através do sistema de supervisão) ou lavagem voluntária (ordem de lavagem dada pelo operador através do sistema de supervisão).

O início da operação de lavagem dá-se com o esvaziamento do filtro, seguindo-se três etapas: lavagem com ar, lavagem com ar e água e lavagem com água. Por fim, procede-se ao reenchimento do filtro e posterior colocação em funcionamento.

Esta operação é executada com o auxílio de dois compressores de ar e três bombas de água de lavagem, funcionando um dos compressores e uma das bombas como reservas.

Quando necessário, utiliza-se na lavagem água com Cloro, para desinfectar o meio filtrante.

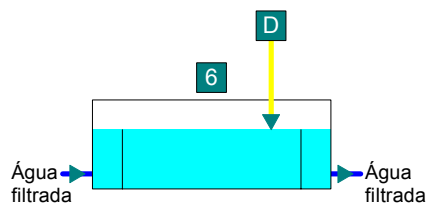
Lavagem em automático - o operador introduz os “setpoints” dos tempos: tempo de lavagem com ar; tempo de lavagem com ar e água e tempo de lavagem com água.

Lavagem em manual – todas as ordens de abertura e fecho de válvulas e arranque e paragem de motores são dadas pelo operador, a partir da supervisão

### 2.1.8 Correção de pH

A água filtrada é analisada por um analisador de pH em contínuo e sempre que necessário utiliza-se Soda Cáustica para fazer subir o pH e melhorar assim a qualidade da água. Este reagente é armazenado num reservatório com capacidade para 4 m<sup>3</sup>.

A Soda Cáustica é adicionada (letra D, Figura 2-7), quando necessário, à água filtrada com o auxílio de duas bombas doseadoras, sendo uma, reserva mecânica da outra.



**Figura 2-7 Correção de pH.**

Funcionamento em automático - o controlo de doseamento de Soda Cáustica é efectuado em função de três variáveis: o caudal de água filtrada, o valor de pH da água tratada e um “setpoint” de pH (2 a 12 pH), introduzido a partir da supervisão. Um controlador do tipo PID regula a velocidade da bomba doseadora, a partir do valor lido e em função do “setpoint” pretendido.

Funcionamento em semi-automático - o controlo de doseamento de Soda Cáustica é efectuado em função de duas variáveis: o caudal de água filtrada e um “setpoint” de percentagem de frequência da bomba de Soda Cáustica (0 a 100 %), introduzido a partir da supervisão.

Funcionamento em manual - o controlo de doseamento de Soda Cáustica é efectuado em função de um único parâmetro: um “setpoint” de percentagem de frequência da bomba de Soda Cáustica (0 a 100 %), introduzido a partir da supervisão.

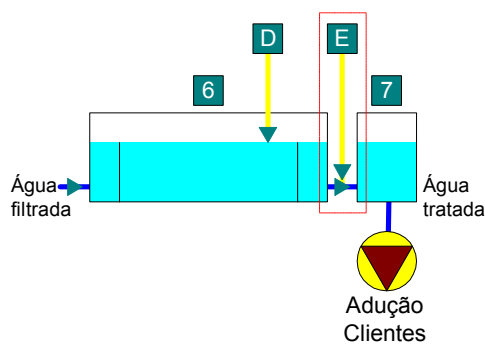
Funcionamento em manual - local - o controlo de doseamento de Soda Cáustica é efectuado localmente pelo operador, aumentando ou diminuindo a frequência da bomba (utilizando para o efeito o comando local), não existindo qualquer tipo de controlo da bomba a partir da supervisão.

Este reagente praticamente não é utilizado, pois o pH da água filtrada encontra-se normalmente na gama de valores óptimos (6,5 a 9) pH.

### 2.1.9 Cloragem

A água filtrada entra na cisterna de água filtrada (n.º 6, Figura 2-8).

No final da cisterna de água filtrada (letra E, Figura 2-8), efectua-se a última etapa do processo de tratamento – injeção de Cloro gasoso solubilizado em água – cuja finalidade é fazer a desinfecção final.



A Cloragem desta ETA é composta por dois contentores de Cloro líquido (de 1.000 kg cada um), sendo a troca entre eles efectuada de modo automático quando é detectada pressão baixa no contentor em serviço. Os contentores estão dispostos na horizontal.

**Figura 2-8 Cloragem.**

No interior do contentor, o Cloro líquido encontra-se em permanente processo de evaporação, libertando Cloro gasoso, que se posiciona por cima do Cloro líquido. A água motriz, através de um processo de vácuo, mistura-se com o Cloro gasoso dando origem a uma água super clorada, a ser injectada na água filtrada, através de um tubo difusor, instalado na saída da cisterna de água filtrada.

O doseamento de Cloro é efectuado por dois clorómetros, montados em paralelo e funcionando um, como reserva do outro. A regulação dos clorómetros é realizada de forma automática, por um controlador – “Process Control Unit” (PCU).

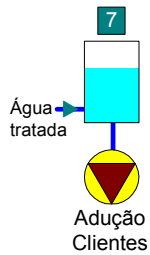
O PCU é um módulo electrónico, projectado para controlar bombas doseadoras ou clorómetros de gás.

Funcionamento em automático - o doseamento de Cloro, é controlado pelo PCU, em função de três variáveis: um “setpoint” introduzido a partir da supervisão, o valor de Cloro residual lido no final da cisterna de água filtrada e o caudal aduzido.

### 2.1.10 Armazenamento de água tratada

Depois da adição de Cloro, a água é encaminhada para o reservatório de água tratada (n.º 7, Figura 2-9), com capacidade de armazenamento de 2.500 m<sup>3</sup>. Está prevista para

2005, a duplicação desta capacidade, com a instalação de um segundo reservatório, de igual dimensão.



O nível deste reservatório determina a produção, sendo o arranque efectuado a 1,5 m e a paragem a 4,5 m.

**Figura 2-9 Armazenamento.**

Esta água é utilizada para abastecer o Reservatório Municipal de Carreiros (Castelo de Paiva), a conduta adutora do Vale do Sousa e o Reservatório de Cunha (Cinfães).

### 2.1.11 Elevação de água tratada

A estação elevatória da ETA é composta por três bombas com capacidade de elevação de 100 m<sup>3</sup>/h. Podem estar em serviço uma ou duas bombas e a terceira funciona como reserva mecânica das outras duas. O objectivo destas bombas é o de elevar a água produzida até ao Reservatório de Cunha, sendo as restantes entregas de água realizadas graviticamente.

### 2.1.12 Espessamento

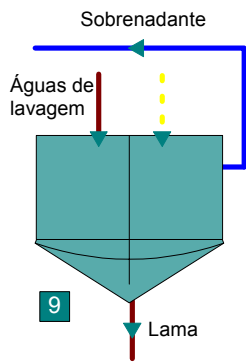
De modo a não existirem desperdícios de água, as águas utilizadas na lavagem dos filtros são novamente conduzidas ao início do processo de tratamento. Para tornar isto possível, existe na instalação uma unidade de tratamento de lamas, cujo objectivo é o de separar da água as partículas sólidas existentes nas águas de lavagem, permitindo assim o seu aproveitamento.



As águas de lavagem, são conduzidas para o tanque de equalização de águas de lavagem (n.º 8, Figura 2-10).

Seguidamente, as água são elevadas para o espessador.

**Figura 2-10 Equalização de águas de lavagem.**

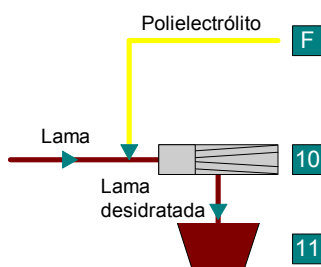


As águas de lavagem, entram no espessador pela parte superior e a lama vai sendo conduzida, por um raspador de velocidade lenta, para o fundo do tanque. No espessador, é aproveitada a água de sobrenadante, sendo conduzida graviticamente, ao início do processo de tratamento.

Figura 2-11 Espessamento.

### 2.1.13 Desidratação de Lamas

As lamas espessadas, são conduzidas para uma centrífuga (n.º 10, Figura 2-12), com a ajuda de duas bombas de parafuso excêntrico, tipo Mono (sendo uma reserva mecânica



da outra), de modo a serem desidratadas por centrifugação. À entrada da centrífuga é doseado Polieletrólito (letra F, Figura 2-12), com o auxílio de uma de duas bombas doseadoras de membrana, cuja finalidade é ajudar na separação da água com a lama, otimizando o processo.

Figura 2-12 Desidratação de Lamas.

Depois da centrifugação, a água que é retirada da lama é elevada, por duas bombas, para o tanque de equalização de águas de lavagem e as lamas desidratadas, são descarregadas graviticamente para um contentor de armazenamento (n.º 11, Figura 2-12).

### 2.1.14 Armazenamento e Expedição de Lamas

O nível do contentor de armazenamento é controlado visualmente e a descarga termina quando é atingido o nível máximo do contentor. Solicita-se então o levantamento deste, a uma empresa transportadora deste tipo de resíduos e a lama é encaminhada para um aterro sanitário licenciado.

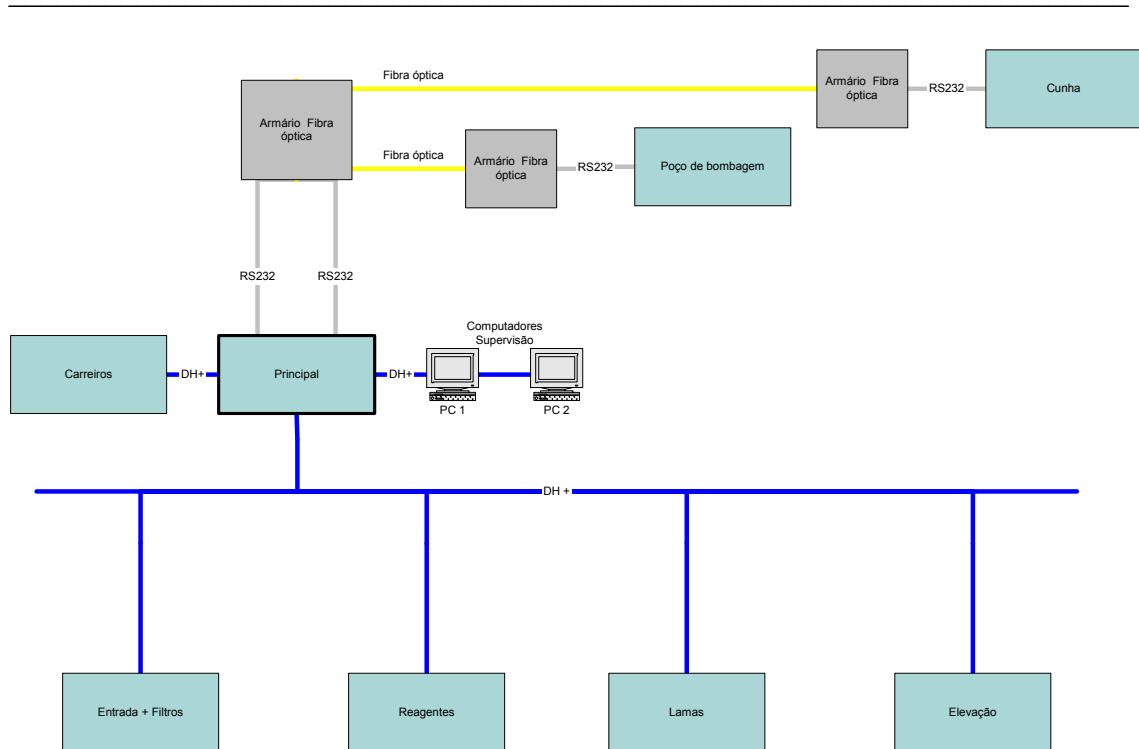
## **2.2 Descrição do sistema de Automação e Supervisão**

Também aqui se utiliza o exemplo da ETA de Castelo de Paiva, uma vez que, das duas instalações estudadas, esta tem dimensões e complexidade muito superiores. O sistema de automação e supervisão da ETA de Lousada é constituído por apenas um autómato e um computador. Trata-se de um sistema muito simples e que não é representativo da maioria das instalações.

O sistema de supervisão, que se descreve neste ponto, é específico da ETA de Castelo de Paiva. No entanto, o estudo e alterações efectuadas neste sistema, poderão servir de exemplo a outros sistemas. Isto, porque se tratava de um sistema que não funcionava bem e ao mesmo tempo serviu para definir pontos chave, essenciais ao bom funcionamento de qualquer sistema de automação e supervisão. A ideia de se definir estes pontos chave é tornar futuros estudos, mais rápidos e objectivos. Sabendo exactamente o que se pretende, em termos de eficácia e eficiência, torna-se simples avaliar o que falta e se pode melhorar, num qualquer sistema de automação e supervisão. Este assunto é tratado em maior detalhe no capítulo 3.

Mais uma vez se relembra, que a descrição do sistema de automação e supervisão, que se apresenta de seguida, reporta-se ao sistema, tal como se encontrava antes da realização do presente trabalho.

Os autómatos, computadores e ligações entre eles (rede), estão representados na Figura 2-13.



**Figura 2-13 Diagrama da Rede de Automação.**

Observa-se nesta figura que existem dois tipos de ligações. As representadas a azul constituem a rede DH+. A conjugação de ligações RS232 (a cinzento), ligações por fibra óptica (a amarelo) e cartas de conversão RS232 – DH-485 colocadas nos autómatos, constituem a rede DH-485.

Entende-se por rede DH+ e rede DH-485 redes de campo propriedade da marca “Allen Bradley”, concebidas para aplicações industriais, onde existem vários elementos a colocar em rede (autómatos, computadores, consolas “touch screen” e outros). As principais diferenças entre elas prendem-se com velocidade de comunicação, n.º de nós permitidos e distâncias admitidas.

A rede DH-485 [2] é utilizada para pequenas aplicações pois só permite um total de 32 nós. É constituída por uma ligação DH-485 e ligações auxiliares RS-232. Comunica a uma velocidade de 19,2 kbit/s, mas aguenta distâncias de alguns quilómetros se o meio físico utilizado for a fibra óptica.

A rede DH+ [3] permite até 99 ligações de 64 nós por ligação. Trabalha a uma velocidade de 57,6k bit/s, mas as distâncias permitidas são reduzidas.

A rede de automação desta ETA (Figura 2-13) é composta por oito autómatos e dois computadores.

Os autômatos são de marca “Allen Bradley” e modelo “SLC 500”. A tabela que se segue dá uma ideia da localização e funcionalidade de cada um dos autômatos:

**Tabela 2-1 Localização e funcionalidade dos autômatos.**

<b>AUTÔMATO</b>	<b>LOCALIZAÇÃO</b>	<b>FUNÇÃO</b>
“Entrada + Filtros”	Sala das bombas de lavagem dos filtros	Comando e controlo do processo de tratamento, desde a entrada de água bruta na ETA até à saída de água filtrada
“Reagentes”	Sala da Soda Cáustica	Comando e controlo do processo de tratamento, no que diz respeito ao doseamento de reagentes
“Lamas”	Sala da centrífuga	Comando e controlo do processo de tratamento de lamas
“Elevação”	Elevatória da ETA	Comando e controlo da etapa de desinfecção final do processo de tratamento e ainda da elevação de água tratada
“Principal”	Sala de comando	Concentrador de informação de todos os autômatos da rede e troca de informação entre estes e a supervisão
“Carreiros”	Reservatório de Carreiros	Comando e controlo das válvulas e níveis do reservatório
“Poço de bombagem”	Captação da Bateira	Comando e controlo da captação da água no Rio Paiva e sua elevação até à ETA
“Cunha”	Reservatório de Cunha	Comando e controlo das válvulas e níveis dos reservatórios e da cloragem existentes em Cunha

Os primeiros seis autômatos descritos na tabela 1, encontram-se na ETA de Castelo de Paiva e a distância entre eles é relativamente pequena (inferior a 1 km) o que permitiu a

sua ligação em rede DH+. Os dois autómatos restantes encontram-se a uma distância considerável (3,5 km para o “Poço de bombagem” e 6,5 km para o “Cunha”) optou-se por isso, por passar cabo de fibra óptica e utilizar a rede DH-485. De notar que é política da empresa, a utilização de fibra óptica para todo o tipo de comunicações, entre as diversas instalações das Águas do Douro e Paiva.

Nos dois computadores mencionados, funcionava a supervisão da ETA. O “PC1” funcionava como servidor e o “PC2” funcionava como cliente. Estavam ligados na rede DH+ e funcionavam como reserva um do outro. No caso do “PC1” falhar, o “PC2” deixava de funcionar como cliente e passava a funcionar como servidor.

Toda a informação, de todos os autómatos, era recebida pelo autómato principal que por sua vez a reencaminhava para o computador servidor, onde funcionava a supervisão. O computador servidor só conseguia comunicar com o autómato principal, que se encarregava de transmitir a informação ao nó pretendido. O autómato principal era por isso denominado de concentrador. As razões deste tipo de comunicação entre o sistema de supervisão e a rede de autómatos são explicadas no capítulo 3.



## **CAPÍTULO 3 – Análise crítica e estratégia de acção**

---

### **3 Análise crítica e estratégia de acção**

Quando uma instalação aparentemente funciona bem torna-se difícil decidir onde melhorar. Para tomar essa decisão foi realizado um estudo exaustivo do sistema de automação, controlo e supervisão da ETA. O objectivo deste, foi detectar os pontos a melhorar ou otimizar e avaliar aqueles em que a melhoria conseguida, compensaria o esforço despendido.

A primeira fase do estudo, consistiu em conhecer as instalações e compreender bem o seu modo de funcionamento. Foi necessário estudar todo o processo da ETA, quer através de documentação disponível no Sistema de Gestão Integrado – SGI - da empresa (manual de operação, plano de controlo de operação, manuais de equipamentos e instruções de trabalho), quer através de observação e acompanhamento do trabalho de operação.

Após esta fase de conhecimento das instalações, do processo e da operação, o estudo aprofundou-se em três partes: supervisão, autómatos e rede de campo e algoritmos de controlo.

Em termos de supervisão, a metodologia usada consistiu em primeiro lugar, na realização de entrevistas aos operadores e responsáveis pela instalação. Destas entrevistas resultou uma listagem de lacunas. De seguida operou-se com a supervisão de modo a sentir as dificuldades apontadas. Por último, estudou-se o programa utilizado para realização da supervisão existente e a sua ligação à rede de automação, para decidir entre melhorar a supervisão existente ou construir uma de raiz que fosse de encontro às necessidades verificadas.

No que diz respeito aos autómatos e rede de campo, foram verificadas as ligações físicas, o “hardware”, os programas dos autómatos e por último, o modo de comunicação entre eles. Estudou-se o modelo de autómato utilizado e as opções disponíveis para este, em termos de redes e programas [2], [3], [4], [5], [6], [7] e [8]. Também se falou com o técnico da empresa que montou o sistema existente, de modo a compreender as opções tomadas.

Por fim, em termos de algoritmos de controlo, a metodologia usada baseou-se também em entrevistas e no estudo dos algoritmos implementados nos autómatos. Após selecção de pontos onde existiam algumas carências, identificou-se para cada um deles, as variáveis directas a controlar. Por último, fez-se uma pesquisa no mercado, quanto à

instrumentação mais apropriada, para medir essas variáveis. Um dos problemas deparados, prendeu-se com o facto de não existir instrumentação “on-line” capaz de medir as variáveis directas de forma fiável. Este problema é tratado com maior detalhe no ponto 3.4.

### 3.1 Supervisão

As entrevistas efectuadas e a experiência em operação revelaram que o sistema de supervisão, em uso na ETA de Castelo de Paiva, apresentava deficiências bastantes significativas, especialmente se tivermos em consideração que falar em automação é falar em controlo em tempo real. Lista-se de seguida, os problemas apontados:

- Tempos de espera muito elevados para a execução de comandos.

O tempo que decorria desde que o operador dava ordem de execução de um comando, a partir da supervisão, até que este começava a ser executado era sempre superior a 15 segundos.

- Falha na execução de comandos.

Se ao fim de 20 segundos a supervisão não conseguia enviar o comando, aparecia uma mensagem de erro e o operador tinha que voltar a dar ordem de execução do comando. Este tipo de falha acontecia com grande frequência, sendo o comando normalmente executado à segunda tentativa. Em casos menos frequentes, era necessário repetir a ordem 3 ou 4 vezes.

- Tempos de espera muito elevados para a actualização da informação visualizada. Após uma mudança de estado e até que se pudesse visualizar essa informação na supervisão decorria um espaço de tempo que podia chegar a 1 minuto.

- “Bloqueio” do programa.

Também, com bastante frequência, o sinóptico que estava a ser visualizado encontrava-se “bloqueado”, sendo necessário aguardar um mínimo de 30 segundos, para que a informação fosse actualizada e também para que fosse possível mudar de sinóptico ou dar ordem de execução de um comando.

- Necessidade de manutenção em termos de limpeza de histórico.

A acumulação de registos tornava o sistema muito lento, razão pela qual semanalmente era necessário proceder a uma rotina de manutenção. Esta tarefa

exigia alguma formação e responsabilidade, motivo pelo qual era executada por um número restrito de pessoas.

➤ Histórico de consulta algo elaborada.

Existem várias variáveis essenciais para controlo do processo, das quais é importante fazer registo e consultar para ter noção da evolução do processo. Nesta supervisão não existia histórico da totalidade das variáveis considerados essenciais e a consulta do histórico existente não era muito intuitiva sendo necessário alguma formação para se conseguir extrair a informação pretendida.

➤ Inexistência de gráficos para controlo do processo.

A forma mais rápida e intuitiva de avaliar e controlar a evolução do processo é com a apresentação da informação em gráficos. A única possibilidade de conseguir fazer gráficos com esta supervisão, passava por exportar a informação para outra ferramenta (por exemplo “Excel”).

➤ Sinalização de alarmes pouco evidenciada.

A ocorrência de um alarme é um facto de elevada importância que não pode passar despercebido. Nesta supervisão não existiam alarmes do tipo sonoro ou visual intermitente.

➤ Limitação em termos de sinópticos.

A informação estava distribuída em muitos sinópticos. No entanto, o n.º de sinópticos possíveis de abrir em simultâneo era reduzido (quatro).

Após este levantamento era necessário perceber as causas para os problemas apontados e descobrir a melhor forma de os solucionar. Sabendo à partida, por experiência de outras instalações, que o programa indicado para a marca e modelo de autómatos existentes, não coincidia com o que se tinha utilizado, tentou-se perceber porque se tinha utilizado um diferente e até que ponto a sua performance poderia ser melhorada.

Como já se referiu, os autómatos existentes nesta ETA são de marca “Allen Bradley” e modelo “SLC 500”. Em parceria com a “Allen Bradley”, a “Rockwell Automation” desenvolve todos os programas necessários à utilização destes autómatos.

Para este modelo específico, os programas disponíveis são: “RSLinx” para estabelecer a comunicação entre os autómatos e o computador; “RSLogix 500” para programação dos autómatos e “RSView” para a supervisão.

Embora o “RSView” seja o programa apropriado para o sistema de supervisão desta ETA, na realidade a supervisão existente foi desenvolvida com o programa “WinMCC” (programa propriedade da empresa EFACEC).

Surgiu então a questão se aproveitando e melhorando a supervisão desenvolvida em “WinMCC” seria possível obter os mesmos resultados que se sabia à partida ser possível de conseguir com “RSView”.

Descobriu-se que com “WinMCC” não é possível fazer a comunicação directa entre o computador de supervisão e cada um dos autómatos pois o programa não possui os “drivers” necessários para o efeito. A solução encontrada pelos técnicos que implementaram este sistema, foi fazer em cada um dos autómatos, uma replicação da base de dados própria. Esta replicação era enviada para um autómato principal que funcionava como concentrador de informação. O computador de supervisão comunicava apenas com o autómato principal, utilizando modo “BUS”. Este modo de comunicação não é de todo o ideal, no entanto, para a empresa que desenvolveu este sistema, a utilização de “WinMCC” era uma prática usual, e esta seria a solução possível com este programa.

O estudo da supervisão em uso levou a concluir que o esforço e custos associados ao desenvolvimento de uma supervisão nova, utilizando “RSView”, seria compensado pelas enumeradas melhorias que se esperava obter.

De facto, verificou-se que tentar melhorar a supervisão existente não era vantajoso, devido essencialmente aos seguintes factores:

- Custos associados à aquisição do programa de desenvolvimento de “WinMCC” (ao passo que a licença de “RSView” havia sido adquirida), que só teria utilidade nesta instalação, já que na maioria das outras (com uma única excepção que também será estudada) se utiliza “RSView”. Ou, em alternativa adjudicar esse trabalho, o que ficaria sempre mais caro e tinha a desvantagem de se depender de um fornecedor, sempre que houvesse uma avaria ou se necessitasse de uma alteração.
- Interesse da empresa em uniformizar todas as aplicações e dar formação aos colaboradores, para não depender, em exclusivo, de fornecedores para resolução de avarias e execução de alterações. Isto é, manter o “know-how” dentro da empresa.

- As limitações em termos de comunicação entre a supervisão e os autómatos, tornam claro, que embora se pudesse melhorar um pouco a supervisão existente, nunca teria a mesma eficiência que uma desenvolvida em RSView. Apenas parte dos problemas apontados, poderiam ser solucionados ou melhorados. Os atrasos e percas de comunicação inerentes ao facto de se utilizar modo “BUS” e um concentrador de informação não poderiam ser eliminados.

Resumindo, os custos seriam maiores optando por alterar a supervisão existente e os resultados obtidos não seriam completamente satisfatórios. Avançou-se por isso, com o desenvolvimento de uma nova supervisão.

Em resultado de toda esta análise, foram definidos pontos chave, a que a nova supervisão deveria satisfazer, por se considerarem importantes, para o bom funcionamento de uma qualquer supervisão.

Pontos chave para uma supervisão:

- Aspecto visual concebido em função dos seus utilizadores (é importante que o “design” seja agradável e proporcione fácil percepção do processo);
- Boa relação entre número de sinópticos e quantidade de informação por sinóptico (poucos sinópticos é sinal de demasiada informação em cada um, o que pode levar a descuidar informação importante, por outro lado, muitos sinópticos pode levar a uma operação mais complexa);
- Informação importante bem evidenciada (as variáveis mais importantes e alarmes não podem ser descuidados, para isso, a sua visualização deve ser evidenciada);
- Boa organização dos alarmes (realce conforme a importância);
- Rapidez na execução de comandos (sensação de resposta instantânea);
- Informação visualizada em constante actualização (inferior a dezenas de segundo);
- Existência de histórico, de variáveis consideradas essenciais ao processo e de alarmes;
- Possibilidade de visualizar e imprimir gráficos de evolução de certas variáveis (a conjugação de variáveis por gráfico deve ser devidamente estudada);

- Redundância. No caso de avaria do computador servidor de supervisão, a colocação em funcionamento de uma máquina redundante deve ser rápida e fácil, tal que, qualquer utilizador saiba como proceder em caso de avaria;
- Segurança. O acesso ao sistema de supervisão deve ser restrito e devidamente protegido. Principalmente, se o computador tem um endereço IP (“Internet Protocol”) atribuído, pois uma intrusão mal intencionada pode ser drástica;
- A supervisão deve ser desenvolvida, ou com o programa da respectiva marca de autómato, ou no caso de se optar por um genérico, verificar sempre a existência de compatibilidade.

Em resumo, uma supervisão deve ser funcional e agradável, para os seus utilizadores e aspectos como fiabilidade e segurança não devem ser descuidados.

### **3.2 Autómatos e rede de campo**

Estudando a programação dos autómatos e testando as comunicações, entendeu-se que, o facto de não ser possível fazer a comunicação directa entre o computador de supervisão e cada um dos autómatos, obrigou a implementar uma forma de comunicação entre os autómatos e entre estes e o sistema de supervisão, que reduziu drasticamente, a eficiência de todo o sistema de automação. Os principais problemas encontrados foram:

- O autómato principal, que servia de concentrador de toda a informação, encontrava-se em permanente comunicação com os restantes autómatos, motivo pelo qual a CPU tinha uma ocupação constante, na ordem dos 90 %;
- Demasiado tráfego de informação entre o autómato principal e os restantes, o que levava a uma saturação da rede DH+ e por consequência algumas falhas de comunicação entre autómatos;
- Falhas de comunicação com os dois autómatos que utilizavam rede DH-485, principalmente com o autómato localizado no edifício de captação devido à quantidade elevada de informação trocada com este e às limitações inerentes à rede DH-485 (velocidade de comunicação de 19,2 kbit/s). Este era um dos problemas mais graves. Isto porque, para arrancar as bombas da captação é

necessário enviar dois comandos a partir da supervisão: a “ordem de inicialização “ da instalação e a “ordem de arranque” da bomba. Assim que a água bruta chega à ETA todo o processo arranca automaticamente. Quando ocorrem falhas de comunicação com o autómato da captação por um período superior a 20 segundos, como medida de segurança, o autómato anula a “ordem de inicialização” e a bomba da captação pára, bem como todo o processo.

Feita esta análise, definiram-se pontos importantes que esta, e qualquer outra, rede de automação, deveria verificar.

Pontos chave para uma rede de automação:

- Rapidez. A rede utilizada deve ser adequada à quantidade de informação transmitida;
- Fiabilidade. As falhas de comunicação deverão ser muito raras, em condições normais de funcionamento;
- Estar prevenido para casos de avaria. No caso de avaria de um qualquer equipamento devem existir meios de rapidamente solucionar o problema. Quer com a existência de um armazém de peças de reserva, quer com a existência de sistemas de redundância.

### **3.3 Algoritmos de controlo**

O desconhecimento dos pormenores do processo a controlar ou do equipamento mais apropriado a utilizar (por exemplo, a escolha incorrecta de um analisador que servirá para fazer a realimentação de um sistema) origina a que os algoritmos de controlo implementados não sejam os mais apropriados.

As entrevistas realizadas apontaram, em relação aos algoritmos de controlo, para os utilizados para o doseamento de reagentes e a lavagem dos filtros, como merecedores de especial atenção. Foram então estudados estes, dada a sua enorme importância, na obtenção de um produto final de qualidade e dada a oportunidade de diminuição de custos por doseamento excessivo.

Dos algoritmos de controlo de doseamento de reagentes, três possuíam controlo em malha aberta. Um sistema de controlo em malha aberta é um sistema em que a saída não

é medida para comparação com a entrada de referência. Só deve ser usado quando a relação entre a entrada e a saída é conhecida e não existem perturbações externas ou variações nos parâmetros do sistema. A precisão do sistema fica dependente de calibrações. Por sua vez, um sistema de controlo em malha fechada é um sistema em que a diferença entre o sinal de entrada (referência) e o sinal de saída realimentado – sinal de erro – é utilizado pelo controlador para reduzir o erro, com o objectivo de igualar a saída à entrada de referência. Este tipo de sistema consegue (até certo ponto) compensar perturbações externas ou variações nos parâmetros do sistema [9].

A qualidade da água bruta tem variações sazonais significativas e é sujeita a perturbações externas. De modo a compensar essas variações é necessário alterar o doseamento de reagentes. Por este motivo, o doseamento de reagentes deve ser controlado em malha fechada. O doseamento de Dióxido de Cloro e de Cloreto Férrico, na ETA de Castelo de Paiva e o doseamento de Cloro na ETA de Lousada, são controlados em malha aberta, e por isso foram estudados em maior detalhe:

➤ Controlo automático de doseamento de Dióxido de Cloro.

Como descrito no ponto 2.1.3, em modo automático o doseamento de Dióxido de Cloro era em função do caudal de água bruta e da taxa de doseamento introduzida na supervisão. No entanto, não era possível verificar se a taxa de doseamento que se introduzia na supervisão correspondia realmente ao que estava a ser doseado. Para isso era necessário existir um caudalímetro que medisse o caudal de solução que se estava a dosear. O aumento ou redução da taxa a aplicar, era baseado apenas, nas análises diárias efectuadas em laboratório, de Dióxido de Cloro residual e análises biológicas. Não existia portanto, forma de se saber “online” o caudal de solução de Dióxido de Cloro que se estava a injectar, nem o Dióxido de Cloro residual.

➤ Controlo automático de doseamento de Cloreto Férrico.

O algoritmo de controlo utilizado era semelhante ao de doseamento de Dióxido de Cloro e carecia dos mesmos problemas. O aumento ou redução da taxa a aplicar, era baseado nos ensaios realizados em laboratório, os “Jar-test”. A execução do “Jar-test” consiste na realização de vários ensaios, nos quais se testam diversas dosagens de coagulante e de floculante, por forma a seleccionar as dosagens para as quais se obteve a melhor qualidade da água (taxa de tratamento óptima de coagulante).

➤ Controlo de doseamento de Cloro.

Na ETA de Lousada, o doseamento de Cloro na água tratada, não tinha um modo de funcionamento em automático. Existia apenas, um modo de funcionamento em manual, em que o doseamento aumentava e diminuía de forma proporcional, ao caudal de água a tratar e a um factor multiplicativo introduzido na supervisão. Em função do valor de Cloro residual da água tratada (dado por um analisador “on-line”) o operador aumentava ou diminuía o factor multiplicativo.

Para além do doseamento de reagentes, um outro algoritmo foi tratado com maior detalhe, dado ao seu funcionamento empírico. Trata-se da lavagem dos filtros.

➤ Lavagem dos Filtros.

Conforme descrito no ponto 2.1.7, na lavagem em automático, o operador introduz os “setpoints” dos tempos: tempo de lavagem com ar; tempo de lavagem com ar e água e tempo de lavagem com água. Trata-se por isso de um sistema empírico, dependente do conhecimento e sensibilidade dos operadores. Surgiu por isso a ideia, de encontrar um algoritmo capaz de calcular esses tempos de forma automática, de modo a otimizar as lavagens.

Pontos chave para o desenvolvimento de um algoritmo de controlo:

- Existindo perturbações externas ou variações nos parâmetros do sistema, o controlo deve ser efectuado em malha fechada;
- A selecção das variáveis a realimentar sistemas de controlo é de extrema importância, nos casos em que não é possível medir directamente a variável que se pretende controlar;
- A instrumentação a ser usada para medição das variáveis de realimentação deve ser precisa, fiável e de fácil manutenção;

### **3.4 Instrumentação**

A solução dos problemas descritos no ponto anterior passa por pesquisar, adquirir e implementar instrumentação capaz de medir “on-line” e de forma fiável, as variáveis que se pretendem controlar. Para cada um dos quatro casos apontados, estudou-se a instrumentação necessária, ao desenvolvimento de novos algoritmos:

- Controlo automático de doseamento de Dióxido de Cloro.

A variável directa a controlar é o Dióxido de Cloro. O doseamento óptimo, corresponde a dosear uma quantidade de solução de Dióxido de Cloro, que garanta a eliminação de toda a matéria viva e um mínimo de Dióxido de Cloro residual no final da câmara de contacto. Parte-se do pressuposto que no final desta câmara, já decorreu tempo suficiente para garantir a eliminação da matéria viva. Se o doseamento for excessivo, existirá Dióxido de Cloro residual, neste ponto. Se pelo contrário, o doseamento não for suficiente, não existirá valor residual, mas a matéria viva não será totalmente eliminada. Idealmente, existe um doseamento óptimo, que corresponde a uma quantidade de solução de Dióxido de Cloro, que elimina totalmente a matéria viva e não deixa valor residual na água, ou seja, o reagente é totalmente gasto. Tendo um valor residual nulo, é complicado saber se o doseamento foi suficiente. Por isso, a forma mais segura de garantir, que o doseamento não foi insuficiente, nem excessivo, é tendo um valor de Dióxido de Cloro residual pequeno, no final da câmara de contacto com o Dióxido de Cloro. Se o Dióxido de Cloro residual começar a aumentar nesse ponto, é porque se está a dosear em excesso. Se pelo contrário, o valor diminuir até ser nulo, a pré oxidação pode não ser eficaz.

Estimou-se que o valor residual suficiente para garantir a pré oxidação e ao mesmo tempo não existirem gastos excessivos, seria entre 0,10 mg/l e 0,20 mg/l. No entanto esse valor seria definido com maior precisão, quando se implementasse o novo algoritmo de controlo.

Existem analisadores de Dióxido de Cloro “on-line”, capazes de fazer as medições de Dióxido de Cloro residual, no final da câmara de contacto, com alguma fiabilidade. No entanto, seria muito difícil fazer o controlo baseado apenas nessas medições, por se tratarem de valores muito próximos de zero e portanto sujeitos a ruído. A fiabilidade do analisador dependeria de uma manutenção muito cuidadosa.

Pensou-se por isso, em instalar também um caudalímetro para medir o caudal de solução de Dióxido de Cloro, na tubagem a seguir às bombas doseadoras.

Sabendo o caudal de solução de Dióxido de Cloro, que se está a dosear, e sabendo a concentração de Dióxido de Cloro “puro” na solução, sabe-se a taxa que se está a dosear. Pensou-se então, no seguinte algoritmo: o operador introduzia na supervisão a taxa de tratamento que pretendia aplicar –  $T$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ ), e a concentração de Dióxido

de Cloro, na solução, que estava a ser usada na unidade de preparação de solução de Dióxido de Cloro – C (g/l). Como já existe caudalímetro de água bruta, o autómato já recebe o valor do caudal da água a tratar – Q (m<sup>3</sup>/h). O consumo de Dióxido de Cloro “puro” - P (g/h) é dado por:  $P(g/h) = T(g/m^3) \times Q(m^3/h)$ . O caudal pretendido de solução de Dióxido de Cloro – Q<sub>p</sub> (l/h) será:  $Q_p(l/h) = \frac{P(g/h)}{C(g/l)}$ . Estes cálculos

seriam efectuados no autómato, através dos dois valores introduzidos na supervisão e do valor de caudal de água bruta. Introduzia-se também, no autómato, os valores lidos pelo caudalímetro. Desta forma, tínhamos os valores “on-line” do caudal de solução de Dióxido de Cloro, dado pelo caudalímetro, e o “setpoint” pretendido para esse caudal (Q<sub>p</sub>), calculado pelo autómato.

A ideia seria desenvolver um controlador do tipo PID, para controlar a frequência das bombas doseadoras, onde o valor de erro, seria a diferença entre o sinal de referência (Q<sub>p</sub>) e o valor lido no caudalímetro.

Uma variação da frequência da bomba seria imediatamente detectada pelo caudalímetro, ao passo que o analisador de Dióxido de Cloro só a detectaria passados pelo menos 10 minutos (tempo de retenção hidráulico da câmara). Isto significa que seria muito mais fácil fazer o controlo do caudal, do que do Dióxido de Cloro residual, por causa do tempo de atraso.

O valor de Dióxido de Cloro residual, lido no final da câmara de contacto, serviria de aviso, para o operador fazer pequenos ajustes, na taxa de doseamento a aplicar.

Desta forma saber-se-ia exactamente a taxa que se estava a dosear e ao mesmo tempo se era a indicada.

Resumindo, para desenvolver este algoritmo seria necessário adquirir e instalar um analisador de Dióxido de Cloro “online” e um caudalímetro. O equipamento adquirido e a respectiva implementação são descritos no ponto 4.4.1.

➤ Controlo automático de doseamento de Cloreto Férrico

Em relação ao Cloreto Férrico a variável directa a controlar é o potencial zeta.

De acordo com Zeta-Meter [10], na água existe uma grande variedade de sólidos suspensos, com o tamanho compreendido entre um átomo e uma partícula, chamados colóides. A importância destes, prende-se com o facto de serem difíceis de remover, na etapa de filtração, devido ao seu tamanho diminuto.

Um colóide possui uma carga eléctrica que pode ser positiva ou negativa. As cargas dos colóides produzem forças de repulsão entre eles. Se a carga for elevada os colóides mantêm-se dispersos e em suspensão, por outro lado, se reduzir ou eliminar estas cargas, os colóides aglomeram-se e sedimentam.

Uma forma de compreender como actuam as forças de repulsão é usando o modelo de Dupla Camada. É possível entender este modelo, com a sequência de etapas que ocorrem, em volta de um colóide negativo, quando os iões que neutralizam a sua carga, são repentinamente afastados.

Inicialmente, a atracção do colóide negativo faz com que os iões positivos formem uma camada rígida em volta da superfície do colóide. Esta camada de contra iões é denominada de Camada de Stern. Outros iões positivos adicionais, são também atraídos pelo colóide negativo, no entanto, são repelidos pela Camada de Stern e pelos contra iões que entretanto rodearam o colóide. Este equilíbrio dinâmico resulta na formação de uma camada mais dispersa de contra iões, a Camada Difusa. A concentração de contra iões diminui à medida que se afasta da superfície do colóide, até se encontrar o equilíbrio de concentração de contra iões, na solução. Na Camada Difusa, também se encontram iões negativos, cuja concentração aumenta à medida que se afasta do colóide, pois as forças de repulsão vão sendo compensadas pelos iões positivos. A Camada Difusa pode ser vista como uma atmosfera carregada, rodeando o colóide. A qualquer distância da superfície, a densidade de carga é igual à diferença de concentração entre iões positivos e iões negativos. A densidade de carga é muito maior na superfície do colóide e iguala a zero quando as concentrações de iões positivos e negativos se assemelham. A Camada Dupla é o conjunto de contra iões da Camada de Stern e da Camada Difusa.

O colóide negativo e a sua atmosfera carregada positivamente, produzem um potencial eléctrico relativo à solução. Este tem o seu valor máximo à superfície e vai diminuindo com a distância, até ser zero, fora da Camada Difusa. A diminuição do potencial em função da distância ao colóide, é um indicador da força repulsiva entre os colóides, em função da distância a que estas forças entram em jogo. Um ponto de particular interesse é o potencial onde se unem as Camadas de Stern e Difusa. Este é o potencial zeta, e a sua importância prende-se com o facto de se poder medir, enquanto que a carga da superfície e seu potencial não se podem medir. O potencial

zeta pode ser uma maneira de controlar o comportamento do colóide pois indica alterações no potencial da superfície e nas forças de repulsão entre os colóides.

O potencial zeta pode ser usado como uma maneira adequada para otimizar o doseamento de coagulante na água. Como já foi referido, os sólidos suspensos mais difíceis de remover são os colóides, por serem muito pequenos, conseguindo escapar à sedimentação e filtração. O modo de os conseguir remover, consiste em diminuir o potencial zeta, com a adição de coagulantes (neste caso o Cloreto Férrico). Uma vez reduzida ou eliminada a carga, não existirão forças repulsivas e os colóides ficam livres para chocarem e aglomerarem-se, formando coágulos (coagulação). Estes continuam a aglomerarem-se, formando flóculos possíveis de sedimentar e filtrar (floculação).

Não existe um só valor de potencial zeta, que pode garantir uma boa coagulação. Normalmente, o valor situa-se entre 0 e 10 mv. No entanto, o valor óptimo deve ser estabelecido por ensaios. Com o aumento de doseamento de coagulante, a turvação da água filtrada vai diminuindo, até certo ponto. Depois desse ponto, começa novamente a aumentar. O valor de potencial zeta, lido nesse ponto, em que a turvação é a mais baixa possível, corresponde ao valor óptimo.

Achado o valor óptimo, o controlo faz-se da seguinte forma: aumenta-se a dose de coagulante para tornar o potencial zeta mais positivo e diminui-se para o tornar mais negativo, sempre com o objectivo de dosear o correspondente ao valor óptimo de potencial zeta.

Para realizar o controlo automático de doseamento de Cloreto Férrico, era portanto, necessário um analisador de potencial zeta “on-line”. Não foi possível adquirir este material, pelo que, se pensou em desenvolver no futuro, um algoritmo controlando as variáveis ferro dissolvido e turvação. As razões são explicadas com maior detalhe no ponto 5.3.3.

➤ Controlo de doseamento de Cloro.

Para o doseamento de Cloro, a variável directa a controlar é o Cloro residual na água tratada. Para isso é necessário um analisador de Cloro residual “on-line”. Na ETA de Lousada já existia o analisador, bem como um sistema de aquisição de dados e histórico, para estudo do processo. Para o desenvolvimento deste algoritmo,

não foi necessário adquirir nem implementar nova instrumentação. Realizaram-se recolhas de água, efectuaram-se análises de Cloro residual, com um analisador portátil e compararam-se os resultados obtidos com as medições efectuadas pelo analisador “on-line”. Verificou-se que as leituras do analisador “on-line” eram fiáveis e por isso avançou-se com o desenvolvimento de um controlo automático de doseamento de Cloro (descrito neste texto no ponto 4.3).

➤ Lavagem dos filtros.

No que diz respeito à lavagem dos filtros, pensou-se em desenvolver um algoritmo que de acordo com a qualidade da água, calculasse automaticamente os tempos de lavagem dos filtros, de forma a optimizar as lavagens. O grande problema aqui, estava em identificar as variáveis a controlar. Sabe-se por experiência, que variáveis como a turvação e a temperatura têm influência nos tempos de lavagem. Quando a água está mais turva, o filtro colmata mais rapidamente e o meio filtrante fica mais sujo. Como consequência, o filtro terá que ser lavado com maior frequência e com tempos maiores, para ter a mesma eficácia na lavagem, que quando a água é menos turva. Por sua vez, a temperatura, influencia a dureza da água. Isso significa que quando a água está mais fria (no inverno), a viscosidade da água aumenta, sendo por isso, necessário aumentar os tempos de lavagem com água, pois o caudal de água de lavagem será ligeiramente menor.

Quando se iniciou este estudo, não existia um controlo de turvação, por filtro. Existia apenas um turbidímetro, na saída comum (junção da água de todos os filtros) da água filtrada. Ter um turbidímetro por filtro, é muito importante, não só para se efectuar o estudo dos tempos de lavagem, mas também, para conseguir detectar problemas nos filtros. Isto é, quando um filtro tem problemas, a turvação da água comum aumenta, mas não se sabe à partida, qual dos filtros está a prejudicar a qualidade da água. Tendo um turbidímetro por filtro, problemas desse tipo, seriam imediatamente identificados.

Por estes motivos, pensou-se em adquirir cinco turbidímetros, um para cada filtro, por forma a controlar a turvação individualmente e também começar a criar histórico desta variável, para se estudar a sua influência, na lavagem dos filtros.

Resolvia-se assim, o problema do controlo da turvação dos filtros e abria-se caminho, para o estudo de um algoritmo de lavagem dos filtros.

Em princípio, outras variáveis serão necessárias para o algoritmo, mas só depois de ter histórico das turvações e da temperatura e de avaliar as suas influências nas lavagens, se conseguirá detectar outras variáveis que afectem também a eficácia das lavagens. A escolha, aquisição e implementação dos turbidímetros é descrita no ponto 4.4.2.

### **3.5 Estratégia de Acção**

Neste ponto, faz-se uma breve descrição, da estratégia de acção adoptada. O objectivo é esclarecer, o modo como foi organizado este trabalho, bem como as metodologias usadas para a sua realização.

Feita a análise crítica, foi necessário decidir por onde começar (supervisão, rede campo ou algoritmos de controlo). Existiam melhoramentos que só seriam possíveis de realizar após algum trabalho prévio. Por este motivo, avaliaram-se todos os melhoramentos a efectuar, e elaborou-se assim, a sequência para a sua realização.

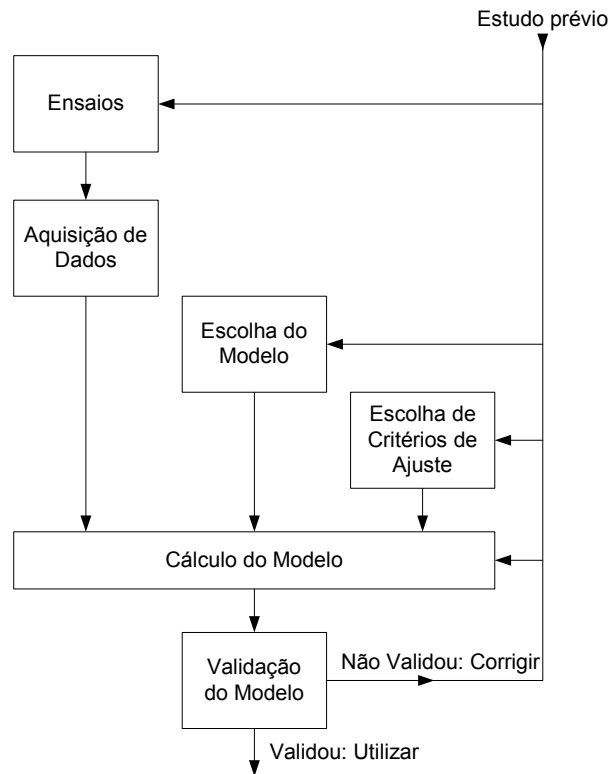
Em relação à ETA de Lousada era necessário um controlo automático de doseamento de Cloro. Já existia a instrumentação necessária, bem como um sistema de aquisição de dados, pelo que, estavam reunidas as condições para iniciar o desenvolvimento do algoritmo.

O projecto e implementação de um algoritmo de controlo, implica três grandes fases: a identificação do modelo do processo que se pretende controlar, o projecto do controlador e a implementação e testes do mesmo. Para a identificação do modelo, seguiu-se o procedimento de Lennart Ljung representado na Figura 3-1.

Segundo Lennart Ljung [11], o procedimento de identificação do modelo, segue um fluxo lógico: primeiro recolhem-se dados, depois escolhe-se o modelo e os critérios para ajustar o modelo. Calcula-se o modelo e verifica-se a validação deste. Se o modelo não for válido é necessário repetir o procedimento e rever os respectivos passos. Existem várias razões para que o modelo não seja válido:

- o cálculo numérico efectuado, não é adequado para encontrar o melhor modelo, de acordo com o critério escolhido;

- o critério foi mal escolhido;
- o modelo escolhido não é apropriado, pois não contém uma boa descrição do processo;
- o conjunto de dados recolhido não contém informação suficiente para ajudar a uma boa escolha do modelo.



**Figura 3-1 Procedimento para identificação do modelo do processo.**

Em relação à ETA de Castelo de Paiva, ainda não existiam condições nem para alterar a rede e automação, nem para fazer a aquisição de dados necessária para a identificação dos modelos, dos processos, que se pretendiam controlar. Para isso, foi necessário começar por desenvolver a nova supervisão e paralelamente estudar e adquirir a instrumentação necessária. Depois de implementar a nova supervisão e a nova instrumentação, reuniram-se condições para melhorar a rede de campo (passou a existir comunicação directa entre a supervisão e os autómatos, e por isso, pôde-se eliminar o concentrador) e fazer a aquisição de dados (com a nova instrumentação e o sistema de aquisição de dados).

Na Figura 3-2 pode-se visualizar um diagrama explicativo das acções tomadas e metodologias usadas para a realização do presente trabalho.

O primeiro trabalho realizado foi a análise crítica. Em seguida, pelos motivos descritos acima, desenvolveu-se e implementou-se a nova supervisão. Ao mesmo tempo, tratou-se da aquisição e implementação de instrumentação, para que quando a nova supervisão fosse implementada, pudesse começar a aquisição de dados para a identificação dos modelos. Também se iniciou o controlo automático de doseamento de Cloro na ETA de Lousada. O facto de se ter começado por este algoritmo deve-se não só a já existir a instrumentação necessária e sistema de aquisição de dados, mas porque de todos os algoritmos a melhorar, este foi considerado o pior caso e também pelo facto de ser mais fácil de realizar ensaios na ETA de Lousada do que na ETA de Castelo de Paiva, devido às suas dimensões. A aquisição e implementação de instrumentação sofreram diversos atrasos, principalmente na entrega dos equipamentos, por parte do fornecedores. Devido a estes atrasos, já não houve tempo para desenvolver os três algoritmos de controlo da ETA de Castelo de Paiva. No entanto ficaram realizados os estudos e criadas todas as condições, para avançar com esse trabalho no futuro.

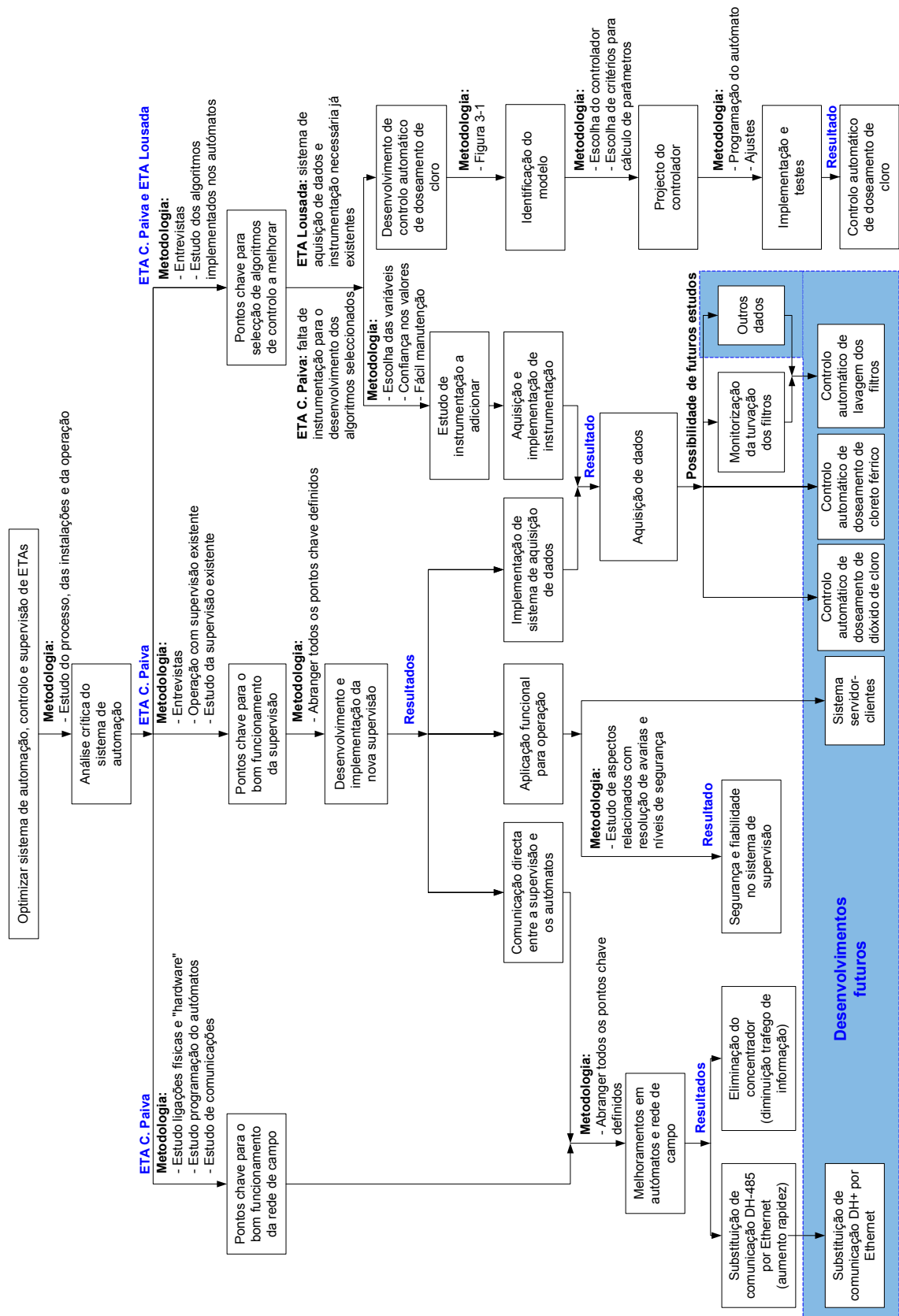


Figura 3-2 Estratégia de acção.



## **CAPÍTULO 4 – Melhoramentos implementados no sistema de automação**

---

## **4 Melhoramentos implementados no sistema de automação**

### **4.1 Supervisão**

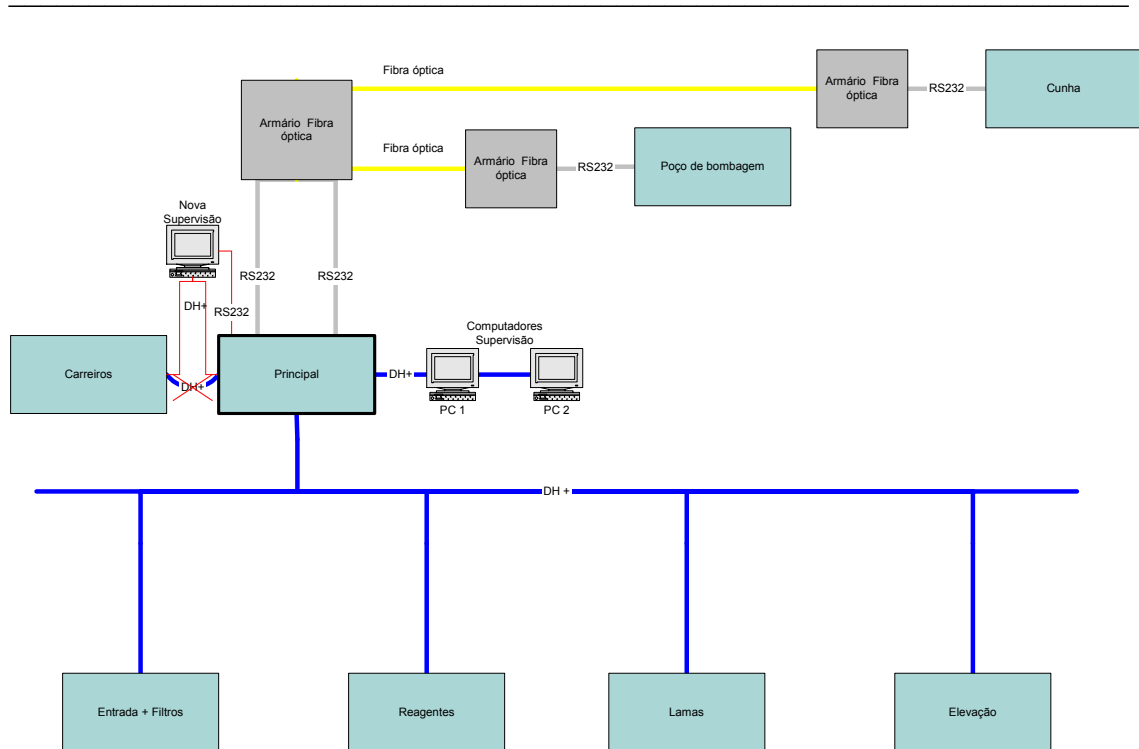
Todo o trabalho descrito neste ponto foi realizado na Sala de Comando da ETA de Castelo de Paiva. A ideia foi que os utilizadores participassem deste projecto, dando sugestões e criando habituação a uma aplicação diferente da que normalmente utilizavam. Conseguiu-se assim uma mudança suave, de tal forma que quando a supervisão antiga foi desactivada já todos sabiam e preferiam operar com a nova.

#### **4.1.1 Ligações efectuadas**

A supervisão em uso só seria desactivada quando a nova estivesse completa e para o desenvolvimento da nova seria necessário fazer diversos testes “online”, por estes motivos optou-se por colocar as duas a funcionar em paralelo durante toda a fase de desenvolvimento da nova supervisão.

Para colocar as duas em funcionamento paralelo foi necessário criar mais um nó na rede existente.

Em termos de ligações físicas, as alterações efectuadas estão representadas a vermelho (Figura 4-1).



**Figura 4-1 Colocação da nova supervisão na rede de automação.**

Em termos de material foi necessário: um computador; uma carta de comunicação, um cabo RS-232 e um cabo para rede DH+.

Este computador necessitava de aceder em simultâneo aos autómatos colocados na rede DH+ e aos autómatos colocados na rede DH-485, pelo que foi necessário fazer duas ligações físicas distintas entre o computador e o autómato principal. Foi estudada, com o suporte técnico da “Rockwell Automation”, a possibilidade de aceder às duas redes com apenas uma ligação física, no entanto as soluções apontadas não funcionaram, pelo que se optou por duas ligações distintas.

Para aceder à rede DH+, adquiriu-se uma carta própria para o efeito (“1784-PKTX” da marca “Allen Bradley”). A carta foi instalada no computador e configurada para rede DH+. Passou-se o cabo DH+ entre a carta e o autómato principal. A ligação ao autómato “Carreiros” passou a ser efectuada na carta (Figura 4-1). Isto é, em cada nó da rede temos dois cabos em paralelo, a chegada da rede a esse nó e a saída para o nó seguinte. Nos nós terminais existe apenas um cabo de chegada e coloca-se uma pequena resistência. Neste caso, o local mais próximo para fazer ligação à rede DH+ era no autómato principal. Como não se pode colocar mais de duas ligações em cada ponto, desligou-se a de “Carreiros” e colocou-se a do computador. Na carta do computador

ligou-se a outra ponta deste cabo e, em paralelo, a ponta do cabo que vinha de “carreiros”. A possibilidade do computador estar desligado, não tem qualquer interferência na rede. Nesse caso, é como se a ligação na carta fosse uma emenda do cabo entre o autómato principal e “Carreiros”.

Para aceder à rede DH-485, utilizou-se um cabo RS-232 entre a porta RS-232 (série) do computador e a porta RS-232 do autómato.

No programa “RSLinx” configuraram-se as duas redes e passou-se a aceder a todos os autómatos. Na figura que se segue, pode-se ver os autómatos que estão ligados em cada uma das duas redes.

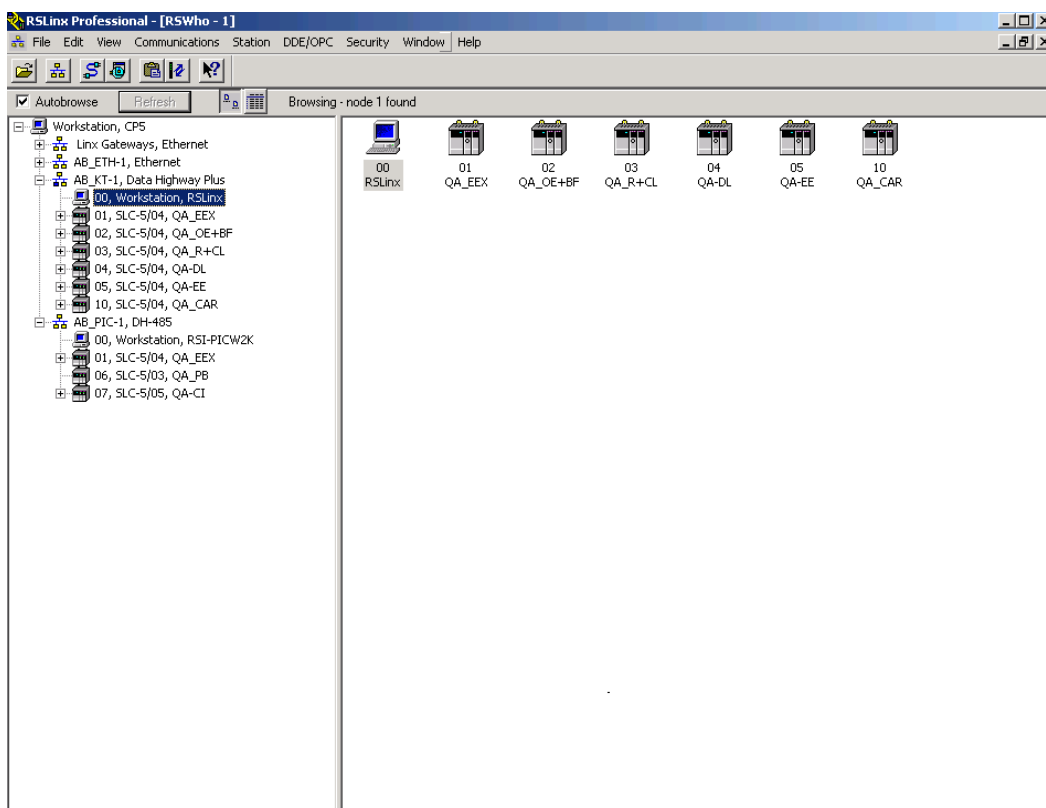


Figura 4-2 RSLinx: configuração das redes DH+ e DH-485.

### 4.1.2 Desenvolvimento

Ao longo deste ponto apresentam-se, a título de exemplificação, alguns dos sinópticos desenvolvidos. A totalidade da aplicação é apresentada no anexo A.

O desenvolvimento da aplicação teve em consideração todos os pontos chave definidos no ponto 3.1.

### Aspecto visual

Como já foi referido, houve a preocupação de desenvolver o programa na sala de comando, fazendo com que os utilizadores fizessem parte do projecto.

Em termos de desenho fez-se algo semelhante ao existente, nas restantes instalações da empresa, que têm aplicações em “RSView”, por questões de uniformização e também por que os operadores de Castelo de Paiva já tinham alguma familiarização com estas.

À medida que os sinópticos ficavam prontos e depois de completamente testados e aprovados pelo responsável da instalação, eram disponibilizados para que os operadores os utilizassem. Em resultado, eram descobertas pequenas lacunas e feitas sugestões.

Existe sempre disponível, do lado esquerdo, uma barra com os botões de acesso aos restantes sinópticos. Desta forma facilita-se a navegação entre sinópticos. O sinóptico principal foi construído com uma fotografia da maqueta da instalação. Passando o rato por cima da figura, surgem ligações aos sinópticos correspondentes. Observe-se no sinóptico de arranque da aplicação (Figura 4-3) a ligação ao sinóptico da elevatória (quadrado preto) e a barra com os botões disponível do lado esquerdo.



Figura 4-3 Exemplificação: botões e ligações (sinóptico principal).

#### Relação número de sinópticos e quantidade de informação em cada um

Chegou-se à conclusão, em termos de distribuição de informação por sinópticos, que se deveriam desenvolver os seguintes sinópticos:

- Menu principal: sinóptico de arranque da aplicação com ligações a todos os outros;
- Captação: operação e monitorização da etapa de captação de água bruta e sua elevação até à ETA;
- Captação medidas: informação dos grupos de bombagem e do posto de transformação do edifício de captação (temperaturas, vibrações, tensões, correntes e potências);
- Dióxido de Cloro & Cloro: operação e monitorização do doseamento destes dois reagentes e da torre de neutralização de fugas de Cloro;

- Dióxido de Carbono e Cloreto Férrico: operação e monitorização do doseamento destes dois reagentes;
- Filtros: operação e monitorização dos filtros em conjunto e ligação a cada um individualmente (estas ligações individuais também se podem fazer na barra de botões, por baixo do botão “Filtros”, onde se vê cinco algarismos, sendo que, cada um corresponde a um filtro);
- Elevação: operação e monitorização da estação elevatória da ETA, “Carreiros” e “Cunha” (elevação de água tratada);
- Elevação ETA medidas: informação dos grupos de elevação (temperaturas, vibrações, tensões, correntes e potências);
- Lamas: operação e monitorização de todo o processo de tratamento de lamas;
- Amostragem: concentração de toda a informação da instrumentação “on-line” importante para o processo, dividida por: água bruta, água filtrada, água floculada e água tratada;
- Quadros e comunicações: informação dos quadros dos autómatos e estado de comunicação destes com o autómato principal (para detectar se um deles deixou de estar em rede com os restantes);
- Alarmes: listagem de alarmes activos e possibilidade de consulta dos já reconhecidos nesse dia;
- Mudar de utilizador: introdução de palavra passe, consoante o nível de operação do utilizador.
- Válvulas: ligações em cima de cada válvula motorizada a um sinóptico que permite o seu comando;
- Gráficos: vários botões disponíveis ao longo dos sinópticos, consoante variáveis visualizadas em cada gráfico.

Um dos problemas da antiga supervisão, prendia-se com o facto de existirem muitos sinópticos e conseqüentemente a informação encontrava-se muito dispersa. Por exemplo, no caso dos filtros, para fazer manobras de troca de filtros e operar com estes de forma manual (a partir da supervisão) era necessário estar sempre a “saltar” de sinóptico. Neste caso, por sugestão dos utilizadores, fez-se um sinóptico em que é possível visualizar e operar todos os filtros (Figura 4-4).

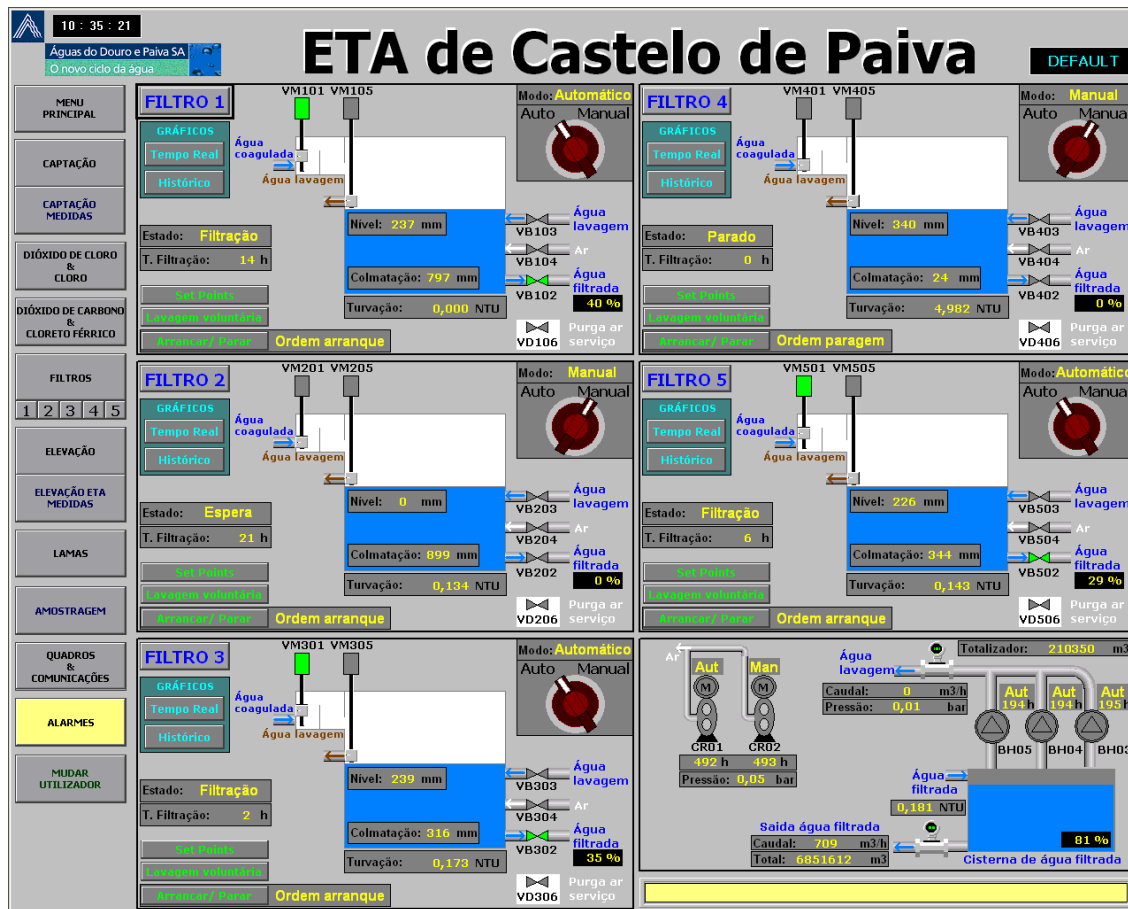


Figura 4-4 Exemplificação: informação por sinóptico (sinóptico dos filtros).

No entanto, porque muitas vezes é necessário concentrar-se apenas num, também existe a possibilidade de visualizar e operar com cada um deles individualmente (Figura 4-5). Observe-se também nesta figura, o modo de operar as válvulas, que consiste em “clique” em cima da válvula, aparecendo um pequeno sinóptico para comando desta.

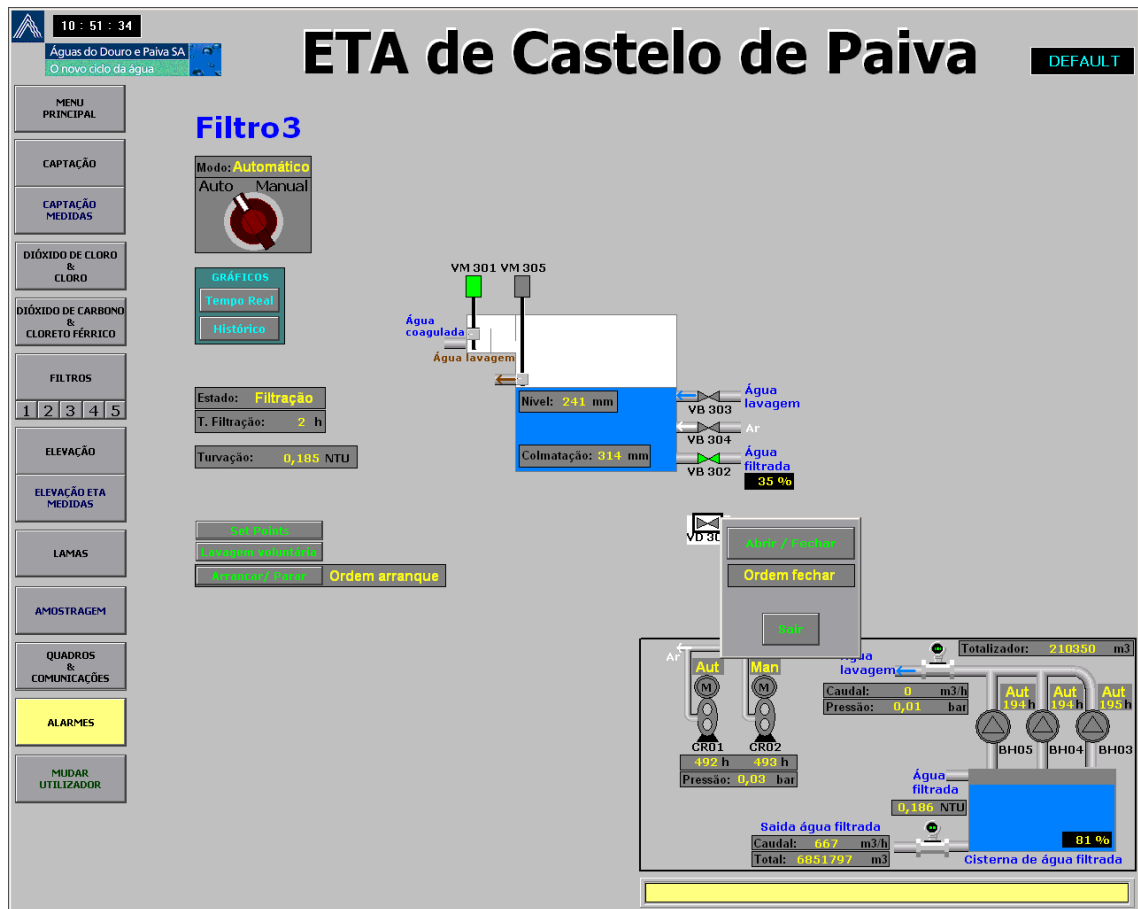


Figura 4-5 Exemplificação: informação por filtro (sinóptico do filtro 3).

### Informação importante bem evidenciada

Por forma a destacar a informação mais importante, para além de se usar a cor e animação também se tentou organizar bem a informação. Por exemplo, ao longo dos sinópticos existe informação da instrumentação “on-line”, no entanto essa informação foi repetida e organizada num só sinóptico (Amostragem) por forma a dar uma ideia completa da qualidade da água e tornar simples para os operadores a execução de registos no relatório de turno. No caso do operador estar ocupado na hora de fazer o registo, existe também a possibilidade de imprimir estes valores e assim pode fazer o registo no relatório de turno, mais tarde (Figura 4-6).



Figura 4-6 Exemplificação: evidenciar informação (sinóptico amostragem).

Em termos de alarmes, e para que não passem despercebidos, está sempre disponível uma barra na parte inferior, que em caso de alarme começa a piscar (intermitente, amarelo e vermelho) e aparece na barra a descrição do alarme (ver exemplo na Figura 4-7). O botão de alarmes, da barra esquerda e o próprio equipamento que entra em alarme, têm a mesma animação. Depois de reconhecido o alarme e se ainda continuar activo, a barra e o botão permanecem a amarelo (Figura 4-6).

Existe ainda um alarme sonoro, para os alarmes de considerados de maior importância.

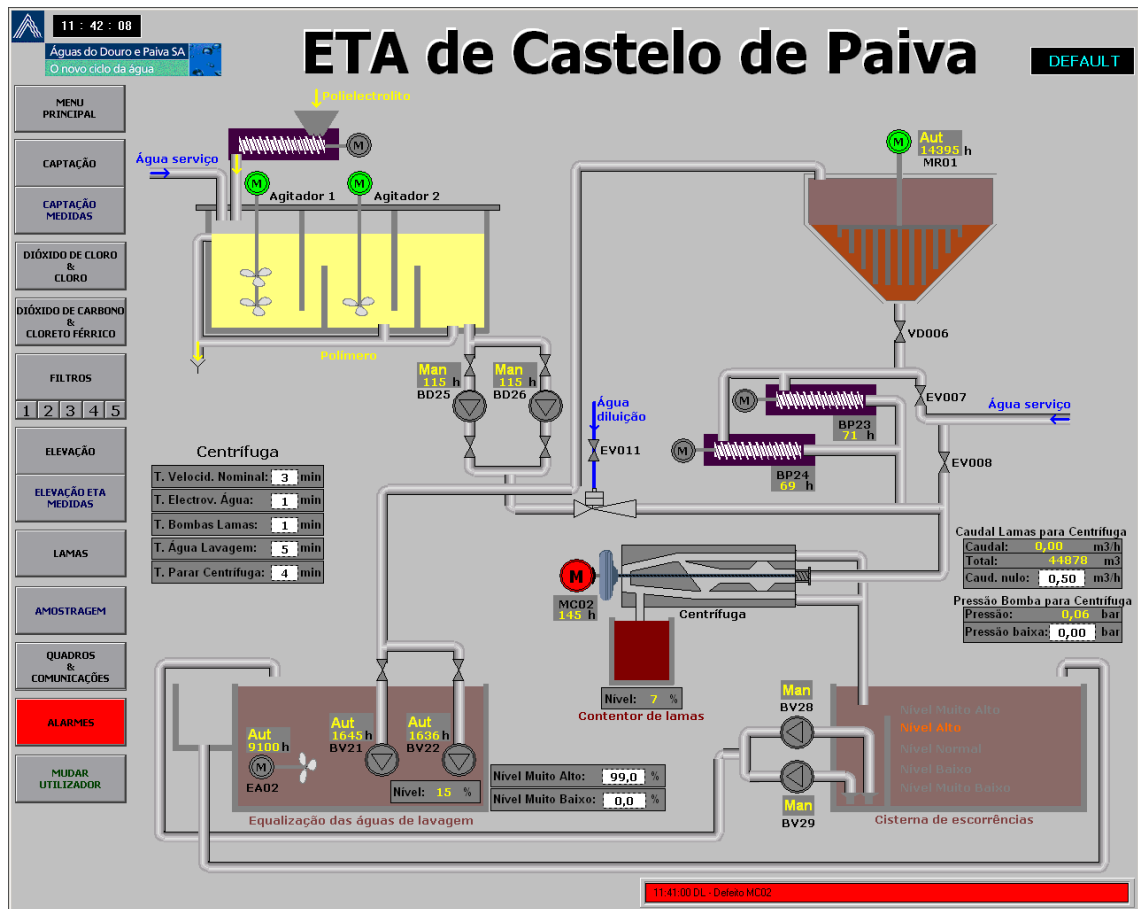


Figura 4-7 Exemplificação: situação de alarme (sinóptico tratamento de lamas).

### Boa organização de severidade dos alarmes

Na AdDP, existe um Plano de Controlo de Operação (POPER), por cada instalação, onde são definidas as variáveis essenciais a controlar e os seus limites de operação, bem como, as acções a tomar caso esse limites sejam ultrapassados. Usando de lógica, inseriram-se todos esses limites na base de dados da supervisão, de modo a que todas as situações de ultrapassagem de limites, originassem alarmes e ficassem registadas. Por exemplo, o valor do Cloro residual da água tratada, deve estar entre um limite máximo e um limite mínimo, definidos no POPER. Quando um dos limites é ultrapassado, a expressão programada para a variável desse alarme torna-se verdadeira e gera-se o alarme. Estes são, a grande parte, dos alarmes de severidade 1. Criaram-se ainda mais dois níveis de alarme que não originam alarme sonoro. Esta atribuição de severidades foi definida em conjunto com o chefe da instalação.

Observe-se de seguida o sinóptico de alarmes (Figura 4-8).



Figura 4-8 Exemplificação: listagem de alarmes (sinóptico alarmes).

## Gráficos

Em termos de gráficos, estudou-se a conjugação de variáveis por gráfico e o número de gráficos necessários. O resultado foi:

- Por cada grupo de captação um gráfico de temperaturas e um gráfico de vibrações (interesse para manutenção preventiva);
- Por cada filtro, dois gráficos, sendo um de visualização em tempo real e outro com possibilidade de consultar histórico (interesse para controlo de evolução do processo). As variáveis seleccionados foram: turvação, tempo de filtração, nível do filtro, nível de colmatação, pressão e caudal da água de lavagem.

Para todos os gráficos, existe a possibilidade de impressão. A título de exemplo, mostra-se o gráfico de vibrações do grupo 2 (Figura 4-9).

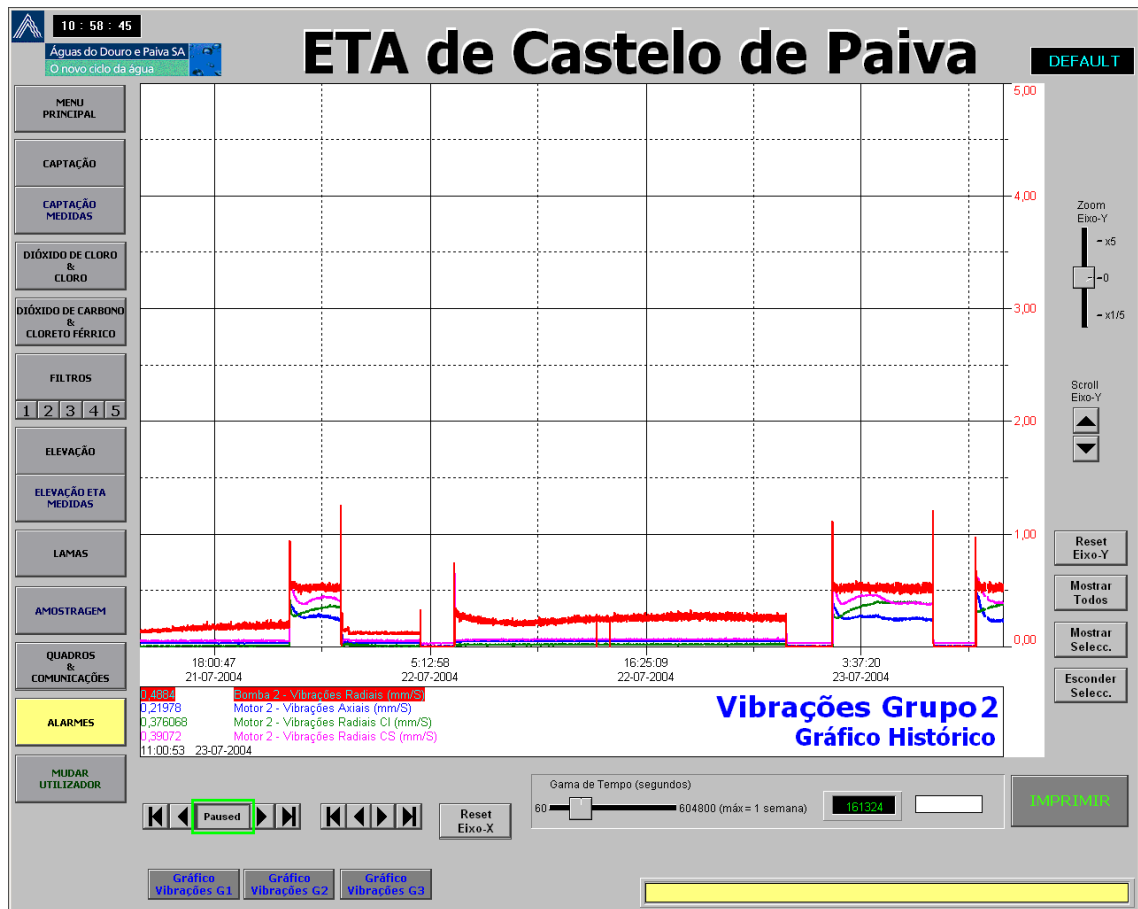


Figura 4-9 Exemplificação: gráficos (gráfico de vibrações do grupo 2).

### 4.1.3 Implementação

Depois de desenvolvida a supervisão foram estudados pontos como: casos de avaria, realização de “backups” do histórico e segurança de todo o sistema.

Adquiriu-se um computador, com o disco rígido colocado num sistema de gaveta. Passaram-se as ligações físicas e a carta “1784-PKTX” do computador utilizado para desenvolver a aplicação, para o novo computador. Instalou-se o “RSLinx” e configurou-se a ligação do computador aos autómatos. Depois instalou-se o “RSView32”, mas em vez de se utilizar a versão de desenvolvimento, utilizou-se a versão de utilizador. Por fim instalou-se a aplicação desenvolvida. Depois de verificar que a aplicação funcionava, criou-se um disco de imagem e guardou-se. Assim garantiu-se que, no caso de avaria do disco rígido, rapidamente se solucionava o problema, tirando a gaveta instalada no computador e colocando a gaveta contendo o disco imagem.

Este sistema está a ser aplicado em todas as instalações da direcção de produção da empresa, pelo que, também para estas, se adquiriu computadores iguais e ainda um de reserva. Em caso de avaria do “hardware”, rapidamente se substitui o computador e coloca-se a gaveta com o disco rígido do computador avariado. Os casos de avaria ficaram assim resolvidos, no entanto, era necessário salvaguardar também os dados. Todos os dias a aplicação cria dois ficheiros de histórico: um de alarmes e outro das variáveis configuradas para registo (por exemplo: Cloro residual, caudais, níveis, etc.). Esses ficheiros não estão no disco de imagem e como tal é necessário fazer “backup” destes, para no caso de perda do disco rígido, se conseguir repor o histórico. Criou-se por isso, uma rotina automática, num computador colocado na rede da empresa, que copia semanalmente, os ficheiros de histórico de todas as aplicações. Estes ficheiros são depois guardados em CD e colocados numa caixa à prova de fogo.

Em termos de segurança era preocupante o facto de todos computadores de supervisão estarem colocados na rede da empresa (rede de Intranet - local, quase toda feita por fibra óptica). O departamento de informática da empresa tem a rede local bem protegida. Existe um servidor que gera a rede interna e um servidor de acesso à Internet. Um ataque externo é uma possibilidade remota, pois era necessário passar o servidor de Internet, aceder à rede interna e saber o caminho para o computador de supervisão. Os ataques externos estão protegidos pelo próprio sistema operativo do servidor, “Proxi” e por “Fire Hall”. De qualquer das formas, está-se neste momento, a pensar criar um grupo de endereços de IP, diferente dos utilizados pelos restantes computadores, para que os computadores de supervisão não possam ser visualizados pelos restantes computadores da empresa. O acesso aos computadores de supervisão é efectuado através do programa “PCAnyWhere”. Este acesso é restrito e protegido por sistema de “passwords”.

O próximo passo consiste em criar um sistema de servidor-cliente, para que se possa operar com a aplicação, em mais do que um computador, em simultâneo. Este sistema já foi estudado e encontra-se numa fase de aquisição de programas e licenças que possibilitem a sua realização. Este assunto é tratado com maior detalhe no ponto 5.3.1.

#### **4.1.4 Resultados**

Os resultados corresponderam ao esperado. Os pontos chave definidos foram todos contemplados e o produto final obtido agradou aos utilizadores.

Em termos de aspecto visual, sinópticos desenvolvidos e distribuição de informação, as críticas foram favoráveis, por se entender ser de simples operação e bastante funcional. Quanto às restantes características, destacaram-se os melhoramentos significativos conseguidos: rapidez na execução de comandos; informação visualizada em constante actualização (dependendo da importância do parâmetro, a sua actualização é efectuada num intervalo que vai de um a sete segundos); possibilidade de consulta e impressão de gráficos de variáveis consideradas essenciais ao processo; existência de histórico; alarmes bem evidenciados (com a mais valia de se ter introduzido no sistema de supervisão, os limites definidos no POPER da instalação) e introdução de um método fácil de resolução de avarias.

Resumindo, a adaptação à nova supervisão foi bem conseguida e a aplicação considerada agradável e funcional.

#### **4.2 Autómatos e rede de campo**

Assim que se colocou definitivamente a nova supervisão em funcionamento e se desligou a antiga deixou de ser necessária a volumosa troca de informação, entre cada um dos autómatos e o autómato principal. Os comandos passaram a ser enviados directamente da supervisão para o respectivo autómato e toda a informação passou a ser lida nesse autómato. Voltando ao exemplo referido no ponto 3.2, para arrancar as bombas da captação é necessário enviar dois comandos, a partir da supervisão, para o autómato “Poço de Bombagem”: a “ordem de inicialização “ da instalação e a “ordem de arranque” da bomba. Estes dois comandos que tinham que passar pelo autómato “Principal”, agora já podiam ser enviados directamente, uma vez que a supervisão consegue comunicar com todos os autómatos. Assim, deixou de fazer sentido utilizar o autómato principal como concentrador de informação.

O facto de se comunicar directamente com os dois autómatos colocados na rede DH-485 (“Poço de bombagem” e “Cunha”) melhorou a comunicação em termos de rapidez na execução de comandos e na actualização da informação, mas piorou em termos de

falha de comunicações. Isto aconteceu porque os autómatos continuavam a enviar e receber informação do concentrador e por outro lado, a supervisão começou a executar o mesmo trabalho utilizando o mesmo meio de comunicação.

Aqui, a solução encontrada passou por duas fases. A primeira consistiu em eliminar o concentrador reduzindo o tráfego, tanto na rede DH-485, como na rede DH+ e ocupação excessiva do processador do autómato “Principal”. A segunda consistiu em separar as comunicações entre autómatos das comunicações entre a supervisão e os autómatos.

### **4.2.1 Alterações efectuadas**

Numa primeira fase foi necessário alterar a programação de todos os autómatos reduzindo ao essencial a troca de mensagens com o concentrador. As únicas mensagens mantidas entre o concentrador e os restantes autómatos foram as de indicação do estado do autómato (permitem detectar se um autómato deixou de comunicar), as de actualização da data e hora dos autómatos e algumas informações de extrema importância por condicionarem o encravamento da instalação.

Entre autómatos mantiveram-se também as mensagens essenciais ao funcionamento da instalação. Por exemplo, o autómato “Poço de Bombagem” dá ordem de paragem às bombas, quando o nível do reservatório de água tratada da ETA atinge o “setpoint” de nível de paragem (introduzido na supervisão). É por isso necessário enviar a indicação de nível do reservatório, do autómato “Estação Elevatória” para o autómato “Poço de Bombagem”.

Este trabalho de alteração da programação dos autómatos foi adjudicado a uma empresa externa, uma vez que a nova supervisão estava em funcionamento e sem a realização desse trabalho as falhas de comunicação com o “Poço de Bombagem” eram uma constante. A realização deste trabalho, implicava um estudo profundo da programação autómatos, de modo a seleccionar as mensagens essenciais, a ser mantidas, e as que se podia eliminar. A eliminação de certas mensagens exige muito cuidado e reestruturação de partes da programação. Assim, enquanto se rectificavam pequenas falhas e se faziam os últimos testes, contratou-se a empresa que tinha desenvolvido o sistema de automação existente, para fazer as alterações mencionadas. O facto de se contratar essa empresa específica, prendeu-se com o facto de já conhecerem os programas dos

autômatos e não precisarem de efectuar um estudo prévio, antes de efectuar as alterações. Depois de efectuadas estas alterações, a nova supervisão ficou a funcionar bem, eliminado ao mesmo tempo, os problemas associados à permanente ocupação do processador do autómato “Principal” e excesso de tráfego de informação em toda a rede.

Numa segunda fase, e para eliminar por completo os problemas associados às limitações, em termos de velocidade, da rede DH-485 procedeu-se à substituição dos processadores dos autômatos “Poço de Bombagem” e “Cunha”, por processadores com porta “Ethernet”. Manteve-se a comunicação entre autômatos por rede DH-485 mas a comunicação entre a supervisão e estes autômatos passou a ser efectuada por “Ethernet”. Utilizando “Ethernet” consegue-se uma velocidade de 100 Mbit/s em vez de 19,2 kbit/s da DH-485.

### **4.2.2 Resultados**

Conseguiu-se uma redução significativa da ocupação do processador do autómato principal (na ordem dos 50%) e do tráfego de informação, na rede. A rede DH+ ficou mais liberta e por isso com menos tempos de espera e menos falhas.

A comunicação entre a supervisão e cada um dos autômatos ficou muito mais fiável e rápida (eliminação do concentrador), principalmente com os autômatos “Poço de Bombagem” e “Cunha” em que se passou de uma velocidade de 19,2 kbit/s para 100 Mbit/s. As falhas de comunicação foram totalmente eliminadas.

No futuro, pensa-se colocar os autômatos restantes em rede “Ethernet”, para que também a comunicação entre autômatos, seja realizada a 100 Mbit/s. Eliminava-se assim, tanto a rede DH-485, como a rede DH+. Este assunto será devidamente estudado, porque neste momento, a velocidade de comunicação é bastante satisfatória, e o investimento necessário para essa alteração, é muito significativo.

### 4.3 Controlo automático de doseamento de Cloro

Embora se tenham detectado vários algoritmos de controlo possíveis de melhorar, optou-se pelo controlo de doseamento de Cloro da ETA de Lousada. Esta escolha teve por base diversos factores:

➤ **Pior caso.**

De todos os algoritmos de controlo apontados como possíveis de melhorar, o controlo de doseamento de Cloro da ETA de Lousada foi considerado o pior caso. Os doseamentos de reagentes na ETA de Castelo de Paiva, possuem todos um modo de funcionamento automático, em que o doseamento de reagente é função de uma taxa de tratamento introduzida na supervisão (está programado um algoritmo que faz a correspondência entre a taxa desejada e a frequência de funcionamento da bomba doseadora, através de uma recta). No caso do doseamento de Cloro na ETA de Lousada não existia uma relação entre a taxa de tratamento que se pretendia aplicar e o doseamento do reagente. Aqui existia apenas um modo de funcionamento “manual”, em que o operador introduzia na supervisão um valor percentual, designado “dose” (que na realidade não correspondia a uma taxa de doseamento, mas apenas a um factor multiplicativo). O doseamento de reagente aumentava e diminuía de forma proporcional à “dose” introduzida e ao caudal de água a tratar.

Na prática era muito complicado estabilizar a saída do sistema (teor de Cloro na água tratada), porque dependia totalmente da experiência e sensibilidade do operador. Era necessário compreender a evolução do teor de Cloro na água tratada, de modo a detectar necessidade de aumentar ou diminuir a “dose”. Um valor pontual podia corresponder apenas a uma perturbação do sistema e não existir necessidade de alterar a “dose”, mas apenas de aguardar que o sistema estabilizasse novamente. Por outro lado, quando realmente havia necessidade de alterar a “dose”, era necessário saber quanto alterar e o intervalo de tempo a manter entre alterações. Acontecia frequentemente, as alterações serem demasiado bruscas (causando aumentos ou diminuições excessivas) e/ou em intervalos de tempo muito curtos (insuficientes para o sistema atingir estabilidade em relação à primeira alteração efectuada). Por estes motivos, o sistema era instável. Era frequente encontrar variações de Cloro na água tratada de grande amplitude, por períodos longos.

Na Figura 4-10 exemplifica-se as afirmações anteriores, com um gráfico retirado do histórico da supervisão, onde se pode verificar a quantidade e amplitude, das alterações no parâmetro dose (a vermelho), efectuadas num período de apenas uma hora. Observe-se também a instabilidade do sistema (Cloro residual - a branco).

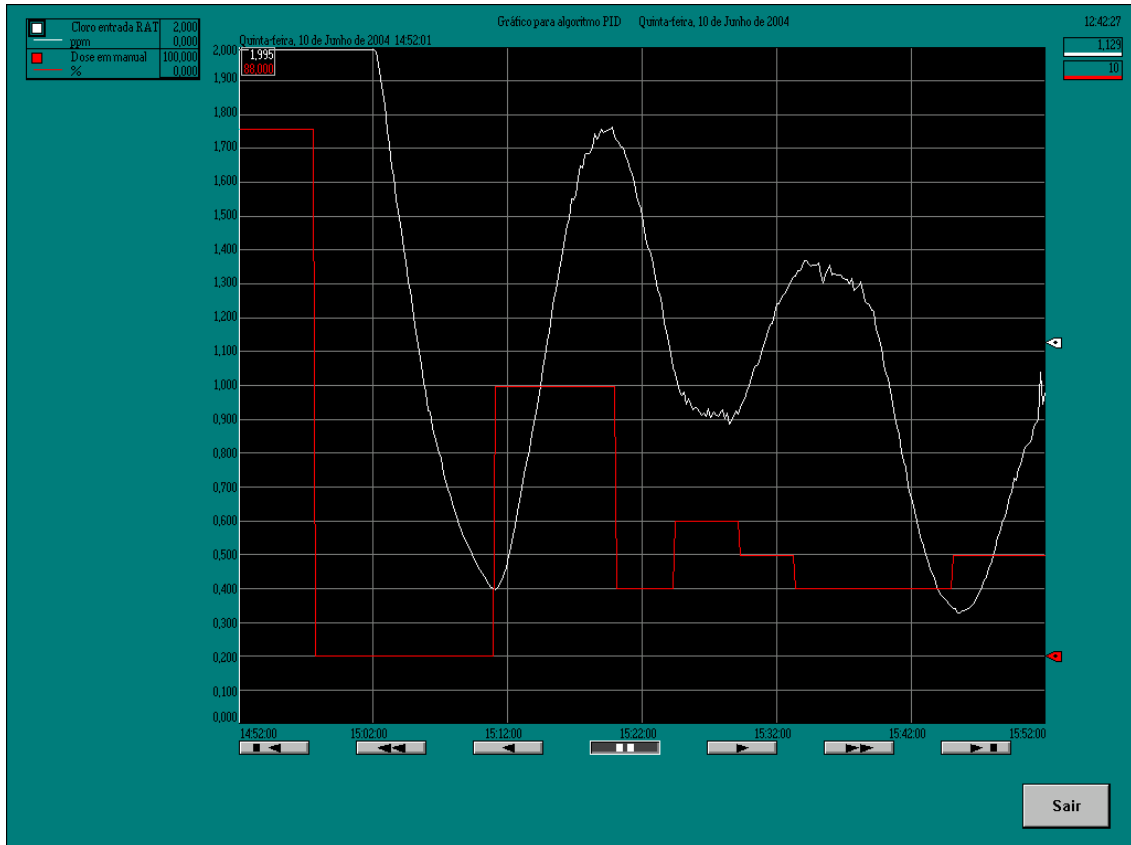


Figura 4-10 Controlo manual do doseamento de Cloro (alterações muito brusca).

Por outro lado, com receio que o sistema ficasse instável, por vezes as alterações era efectuadas em intervalos de tempo muito grandes e com amplitudes muito pequenas, o que fazia com que demorasse muito tempo a atingir o valor desejado. Observe-se o exemplo da Figura 4-11 onde o objectivo era manter o Cloro residual em 1,00 mg/l. De notar que o gráfico abrange um período de 7 horas.

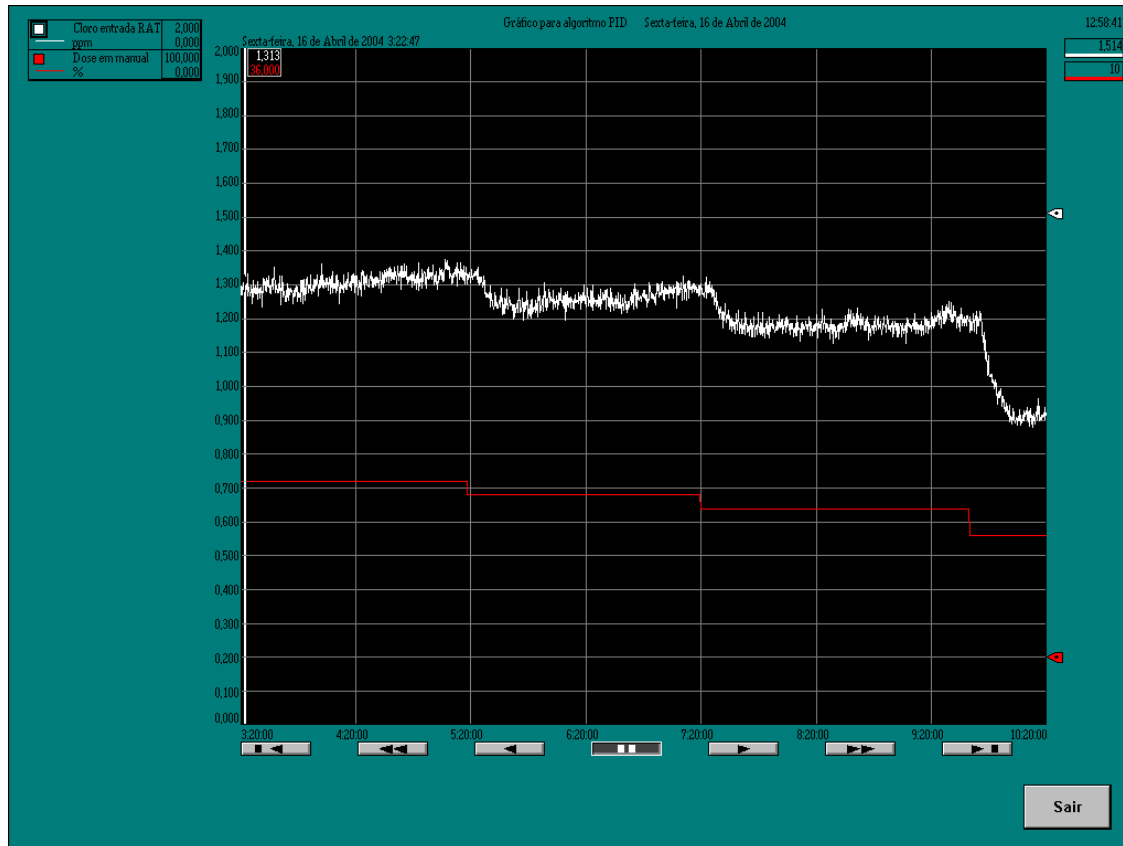


Figura 4-11 Controlo manual do doseamento de Cloro (alterações muito suaves).

➤ Flexibilidade de alteração das taxas de doseamento para realização de testes e recolha de dados.

A ETA de Lousada tem uma produção máxima de  $16 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $384 \text{ m}^3/\text{dia}$ ), ao passo que a ETA de Castelo de Paiva, como já foi referido, tem uma produção máxima de  $1.250 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $30.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ ). Com estes dados percebe-se que as dimensões e complexidades dos processos destas duas instalações são muito diferentes.

Alterações no processo da ETA de Lousada, desde que controladas, não têm consequências significativas no produto final, dado o elevado factor de diluição existente no reservatório de água tratada. O mesmo não acontece na ETA de Castelo de Paiva.

Vejamos, a título de exemplo, a interferência que um aumento da taxa de Cloro de  $1,00 \text{ mg/l}$  para  $1,20 \text{ mg/l}$ , por um período de uma hora, tem na qualidade da água tratada, em cada uma das instalações, considerando os respectivos reservatórios de água tratada cheios, aquando do final dessa hora.

Na ETA de Lousada produz-se  $16 \text{ m}^3$  de água numa hora. Esses  $16 \text{ m}^3$  de água entram no reservatório de água tratada, com capacidade de  $2.000 \text{ m}^3$ . Ou seja, 0,80% da água total teria um teor de Cloro superior à restante, em  $0,20 \text{ mg/l}$ . Misturada a água, a taxa de Cloro seria  $1,0016 \text{ mg/l}$ , ou seja, um aumento de  $0,0016 \text{ mg/l}$ . Em termos de processo, o valor do teor de Cloro só tem significado até à casa das centésimas, logo este aumento não seria significativo.

Esta mesma alteração efectuada na ETA de Castelo de Paiva corresponderia a alterar a taxa de  $1.250 \text{ m}^3$  de água, num reservatório com capacidade de  $2.500 \text{ m}^3$ . Isto é, 50% da água total teria um teor de Cloro superior à restante, em  $0,20 \text{ mg/l}$ . Misturada a água, a taxa de Cloro seria  $1,10 \text{ mg/l}$ , ou seja, um aumento de  $0,10 \text{ mg/l}$ . Aqui o aumento seria de uma décima e por isso significativo.

#### 4.3.1 Identificação do modelo do processo

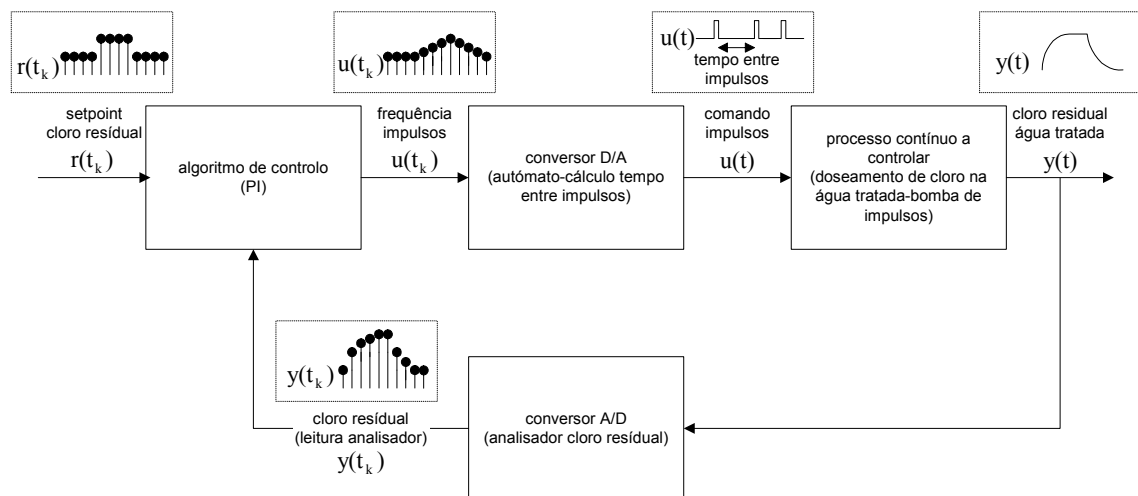


Figura 4-12 Diagrama de blocos do sistema.

Na Figura 4-12 está representado o diagrama de blocos do sistema. A saída do processo -  $y(t)$  - é o Cloro residual na água tratada, um sinal contínuo. Existe na ETA de Lousada, um analisador de Cloro residual, responsável por efectuar as leituras de Cloro e enviar os valores para o autómato. Esta operação converte o sinal contínuo -  $y(t)$  - num sinal discreto -  $y(t_k)$  - ou seja, numa sequência de números. O algoritmo de controlo

implementado no autômato, compara essa sequência de números, com o valor desejado de Cloro residual, na água tratada (“setpoint” introduzido através da supervisão). O “setpoint” é a referência do sistema -  $r(t_k)$ . O cálculo efectuado pelo algoritmo, gera uma sequência de números -  $u(t_k)$ - que corresponde à frequência dos impulsos da bomba. A partir dessa frequência, é calculado no autômato, o intervalo de tempo entre impulsos e gerado um sinal de comando para a bomba de impulsos -  $u(t)$ - a entrada do processo. De notar que o intervalo de tempo entre impulsos (aproximadamente 5 segundos em funcionamento normal) é significativamente inferior à constante de tempo do processo (300 a 400 segundos). Pode-se dizer que o conversor D/A funciona como uma modulação de impulsos, mas em vez de se variar a largura do impulso (PWM), varia-se o tempo entre impulsos. A utilização deste sinal para comando da bomba de impulsos já estava implementada e manteve-se por ter um bom comportamento.

O processo de doseamento de Cloro é um sistema contínuo. No entanto, a entrada e saída deste sistema são sequências de números e por isso, foi modelizado como um sistema discreto equivalente (o modelo só precisa descrever o processo nos instantes de amostragem).

Os sistemas que processam sequências de números podem ser representados por uma equação às diferenças. Se esta relacionar a saída do sistema com as entradas e as saídas, em instantes anteriores, diz-se que o sistema é descrito por um modelo entrada – saída [12]:

$$y(t_k) = f(y(t_{k-1}), y(t_{k-2}), \dots, u(t_k), u(t_{k-1}), \dots, t_k) \quad (4.1)$$

$y(t_k) \in \mathfrak{R}^p$  - saídas do sistema

$u(t_k) \in \mathfrak{R}^s$  - entradas do sistema

A equação (4.1) é considerada um modelo externo, uma vez que as variáveis internas do sistema não são consideradas. Formulando esta equação nos espaços de estados, obtém-se um modelo interno. Os modelos de estado não foram aqui considerados, porque este sistema, além de ter apenas uma entrada e uma saída, verificou-se que era de primeira ordem, não se justificando a complexidade destes.

Infelizmente, na maior parte dos casos, a função  $f(\cdot)$  da equação (4.1) não é linear, tornando o algoritmo de controlo muito complexo e de implementação prática inviável num autómato. Para contornar este problema, linearizou-se o sistema em torno do seu ponto de funcionamento. O objectivo do controlo é manter o sistema num ponto e por isso, a descrição do seu comportamento na vizinhança desse ponto é, em principio, suficiente. Isto pode ser conseguido através de modelos lineares.

Sendo  $T$  o período da amostragem, simplifica-se a notação, referindo o sinal  $y(t)$ , no instante de tempo  $t = k * T = t_k$ ,  $y(t_k)$ , simplesmente como  $y(k)$ .

No caso de sistemas lineares discretos com uma entrada e uma saída, a equação (4.1) toma a seguinte forma:

$$y(k) = -\sum_{i=1}^{na} a_i(k)y(k-i) + \sum_{i=0}^{nb} b_i(k)u(k-i) \quad (4.2)$$

Rescrevendo a equação (4.2) para sistemas invariantes no tempo:

$$y(k) = -\sum_{i=1}^{na} a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^{nb} b_i u(k-i) \quad (4.3)$$

Como já foi referido, para a identificação do modelo utilizou-se o procedimento [11] da Figura 3-1.

O primeiro passo, consistiu em aplicar um impulso na entrada e registar a evolução da saída do sistema. Com este ensaio, conseguiu-se informações importantes para a escolha do modelo, tais como: estimativa do ganho (0,1), tempo que demora a atingir regime permanente (50 a 60 minutos), amplitude do ruído (aproximadamente 0,05 mg/l), atraso (5 a 6 minutos) e ordem inicial a aplicar (1ª ordem).

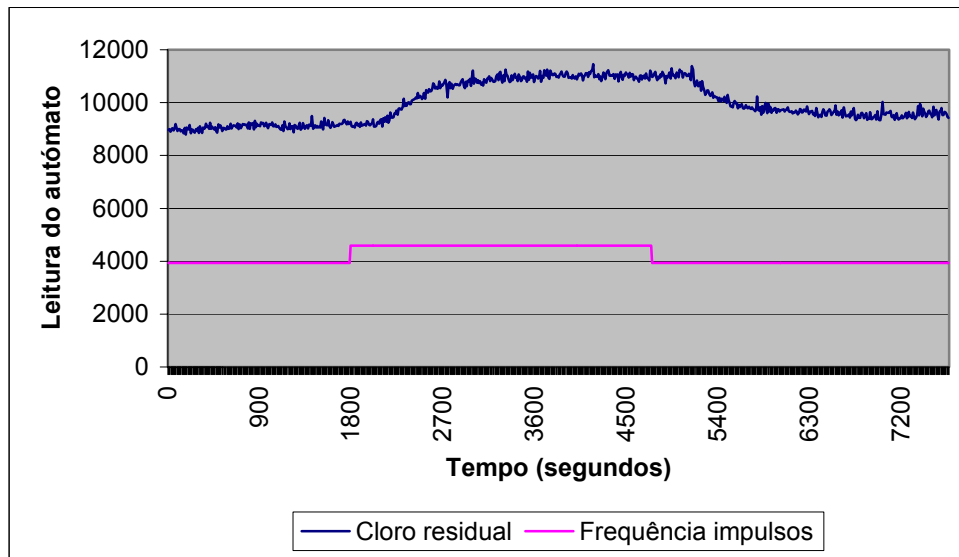
A realização do ensaio iniciou-se com a recolha de valores, encontrando-se o sistema estabilizado (em regime permanente), para estimar a amplitude do ruído. Aplicou-se então um impulso com duração suficiente para a resposta atingir o regime permanente e com amplitude substancialmente superior ao ruído, tendo o cuidado de não se exagerar. Uma amplitude muito elevada evidencia as não linearidades do sistema. Por fim,

esperou-se pelo final do regime transitório e terminou-se o ensaio novamente em regime permanente.

Em termos práticos, o ensaio realizado pode-se descrever da seguinte forma: estando o sistema a funcionar em condições normais e em regime permanente, diminuiu-se o intervalo de tempo entre impulsos, por um período de tempo suficiente, para que a saída voltasse ao regime permanente (por observação da saída, estimou-se esse tempo em cinquenta minutos). Ao diminuir o intervalo de tempo entre impulsos, a bomba começou a injectar Cloro na água tratada, a uma frequência maior e consequentemente a saída do processo (Cloro residual) aumentou. No final desse período de tempo, voltou-se a aplicar o intervalo de tempo inicial e esperou-se que acabasse o regime transitório, isto é, que a saída estabilizasse num novo valor. Ao aumentar o intervalo de tempo entre impulsos, a bomba começou a injectar Cloro a uma frequência inferior e portanto o Cloro residual diminuiu. De notar que no final do ensaio, o sistema não voltou ao valor inicial, denotando a existência de uma perturbação de baixa frequência.

Deste ensaio, cujos resultados estão representados na Figura 4-13, retiraram-se as seguintes conclusões, do sistema em estudo:

- Tem algum ruído de moderada amplitude (amplitude média cerca de 1,5%). Este valor, calculado a partir dos dados recolhidos, não é muito visível na Figura 4-13 devido à escala, mas já é mais perceptível na Figura 4-15;
- Tem um atraso significativo (cerca de 340 segundos). Repare-se na Figura 4-13, o atraso entre a subida da frequência dos impulsos e a subida do Cloro residual;
- Existem perturbações a uma frequência muito inferior à da constante de tempo do processo. Na Figura 4-13 é visível, que depois de voltar ao valor inicial, o sistema estabilizou num valor diferente do que tinha;
- A resposta ao impulso é aproximadamente exponencial.



**Figura 4-13** Resposta do processo a um impulso.

Das conclusões tiradas, a mais preocupante foi o facto de existir um atraso significativo. Isto porque, um sistema com atraso de transporte, inserido em malha fechada, tem tendência para oscilar e pode facilmente tornar-se instável [14]. Um atraso, torna o sistema muito mais difícil de controlar. Por este motivo, estudou-se a razão do atraso, numa tentativa de reduzi-lo ou eliminá-lo.

A injeção de Cloro é efectuada antes da água entrar no filtro remineralizador. Este filtro serve para remineralizar a água e ao mesmo tempo, para misturar a água com o Cloro, de modo a homogeneizar a saída de água tratada. Tratando-se de uma bomba de impulsos, é necessário fazer a injeção antes do filtro, para que, quando a água chegar ao reservatório de água tratada, já esteja perfeitamente misturada com o Cloro. As leituras efectuadas pelo analisador, na tubagem, imediatamente antes da saída, para o reservatório de água tratada, são por isso fiáveis. Caso contrário, existiriam leituras de Cloro residual, ora elevadas, ora baixas, consoante a amostra de água, tivesse ou não, “apanhado” o momento da injeção (impulso).

Este filtro tem uma capacidade de 1 m<sup>3</sup> de água. Por exemplo, se aumentar a taxa de doseamento de 1,00 mg/l para 1,20 mg/l, é necessário que toda a água do filtro e da tubagem, que liga o filtro ao reservatório de água tratada, fique a 1,20 mg/l, para que, a água que entra no reservatório de água tratada, esteja a essa taxa.

Sendo o caudal de 16 m<sup>3</sup>/h, corresponde a 1,6 m<sup>3</sup> em 6 minutos. Este volume de água corresponde aproximadamente, à soma, entre o volume de água do filtro, e o volume de água da conduta, entre a saída do filtro e o ponto onde se recolhe água de amostragem para o analisador (20 metros de conduta, com diâmetro 200 mm). Isto significa que o atraso de transporte é devido ao “lay-out” da instalação e por isso não pode ser reduzido (Figura 4-14).

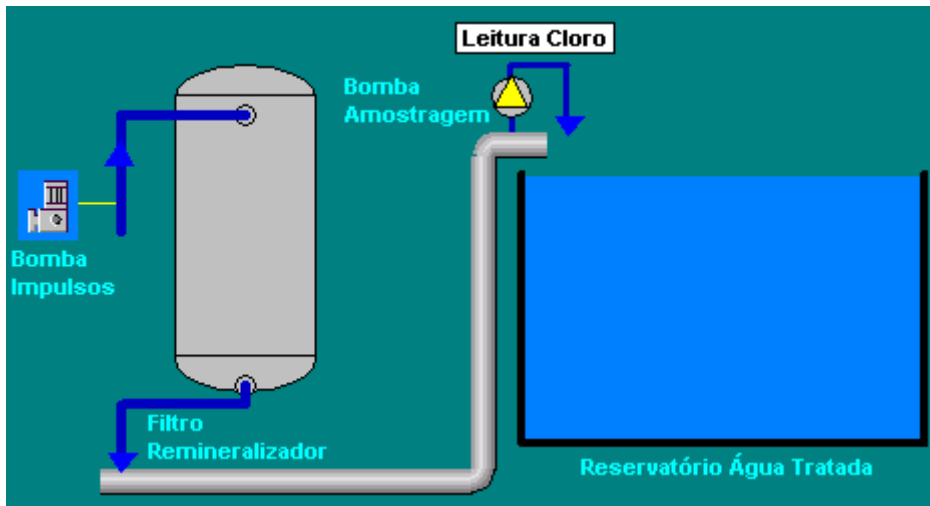


Figura 4-14 Pontos de injeção e leitura do Cloro.

O gráfico obtido (Figura 4-13) permitiu detectar uma evolução notoriamente exponencial, que levou a pressupor tratar-se de um sistema de primeira ordem.

Alterando a equação (4.3) para um sistema de primeira ordem obtém-se:

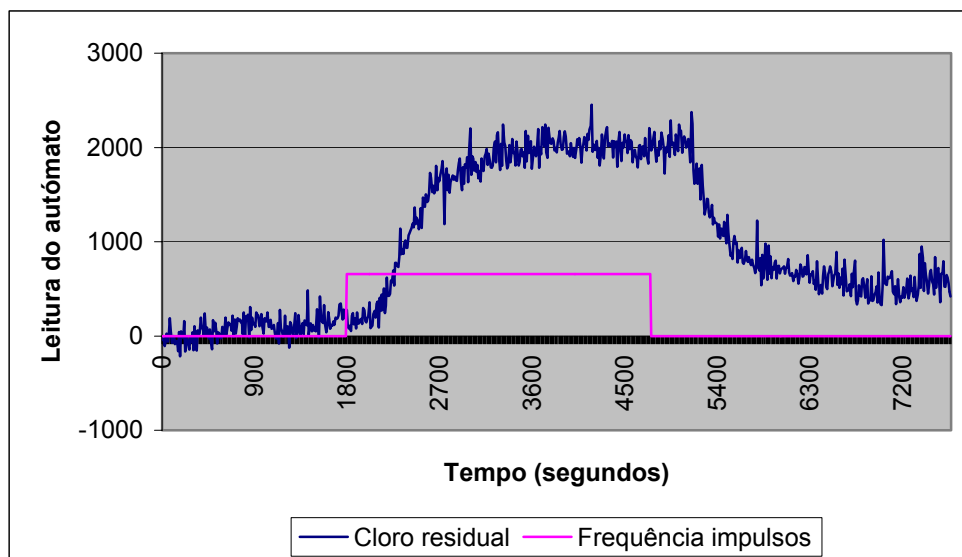
$$y(k) = -a_1 y(k-1) + b_0 u(k) + b_1 u(k-1) \quad (4.4)$$

Considerou-se inicialmente o sistema sem zeros ( $b_0=0$ ) e neste caso, detectou-se um atraso na resposta do sistema, que se representa na equação que se segue pela letra d:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) + b_1 u(k-1-d) \quad (4.5)$$

A equação (4.5) foi utilizada para obtenção do modelo do processo. O modelo foi calculado com o auxílio de uma folha de cálculo do Excel, da seguinte forma:

1. Aplicou-se um impulso na entrada, com duração suficiente para que a resposta atingisse regime permanente, e registou-se a evolução da saída (Figura 4-13). O sinal de excitação escolhido foi o impulso, por ser complexo gerar outros tipos de sinais, tais como sinais aleatórios, num autômato. A amplitude do sinal de excitação foi escolhida de forma a que a amplitude da resposta do sistema fosse substancialmente superior ao ruído, tendo em conta que amplitudes muito elevadas evidenciam as não linearidades do sistema [13].
2. Como a saída apresentava ruído, calculou-se a média de vários pontos (60 no caso), para utilizar como pontos inicial e final da resposta.
3. À sequência de entrada (frequência dos impulsos) subtraiu-se o ponto inicial (Figura 4-15).



**Figura 4-15** Subtração do ponto inicial de funcionamento.

4. Para eliminar o efeito das perturbações existentes a uma frequência muito inferior à da constante de tempo do processo, calculou-se a recta entre os pontos médios inicial e final. À sequência de saída subtraiu-se a recta. Assim, no cálculo do modelo, utilizou-se apenas as variações em relação a esta recta (Figura 4-16).

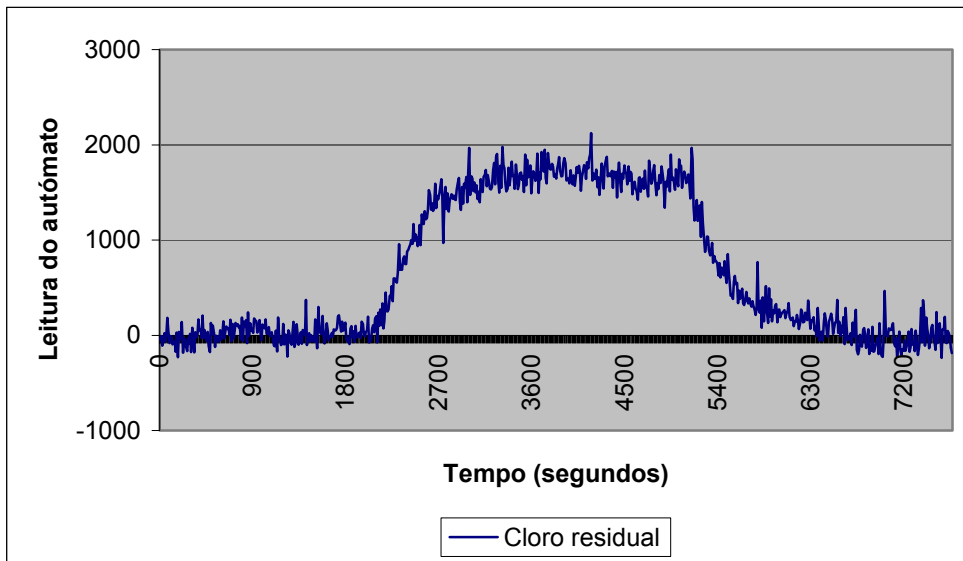


Figura 4-16 Variação em relação à recta.

5. Uma vez que se detectou um atraso na resposta do sistema, por observação da sequência de saída e testando iterativamente, estimou-se esse atraso em 340 segundos (correspondentes a 34 valores, pois o registo é efectuado de 10 em 10 segundos). Este foi o valor testado que melhor aproximava as duas curvas.
6. Aplicou-se então a equação (4.5) para cálculo do modelo. Fez-se um gráfico de comparação entre a saída e o modelo, o que permitiu atribuir a  $a_1$  e  $b_1$  valores que aproximavam grosseiramente o modelo à resposta do processo.
7. Em seguida calculou-se o erro quadrático. Utilizando o “solver” do Excel, minimizou-se a soma dos erros quadráticos por alteração de  $a_1$  e  $b_1$ . A solução encontrada foi  $a_1 = -0,973$  e  $b_1 = 0,0691$ . Os resultados obtidos estão representados na Figura 4-17.

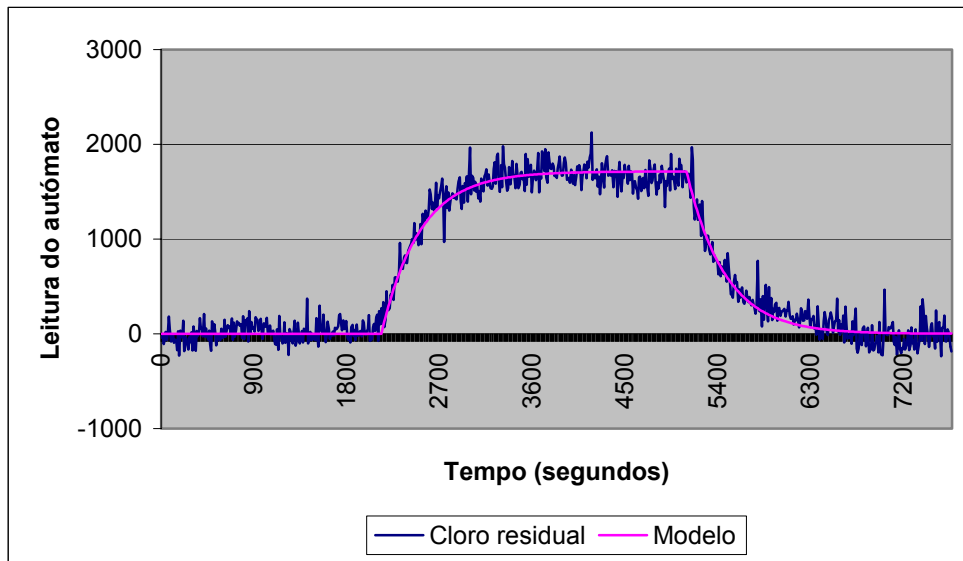


Figura 4-17 Resposta do processo (Cloro residual) e do modelo calculado.

Para validar o modelo obtido, recolheu-se um segundo conjunto de dados, dentro da zona de funcionamento pretendida, mas com amplitude e ponto de funcionamento ligeiramente diferentes. Comparou-se a resposta do modelo identificado com a resposta do sistema nessa segunda amostra. Na Figura 4-18 pode-se observar que a resposta do modelo não se aproximou da resposta do sistema.

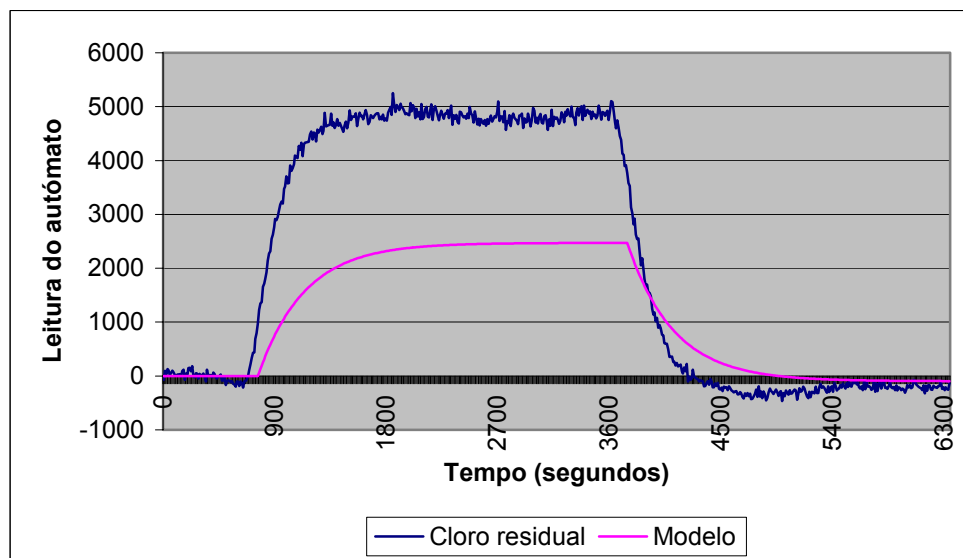


Figura 4-18 Verificação do modelo com o 2º conjunto de dados.

Com este segundo conjunto de dados calculou-se um segundo modelo, usando a mesma metodologia. Os cálculos efectuados deram os seguintes resultados:  $d=27$  (atraso de 270 segundos);  $a_1=-0,955$  e  $b_1=0,227$ .

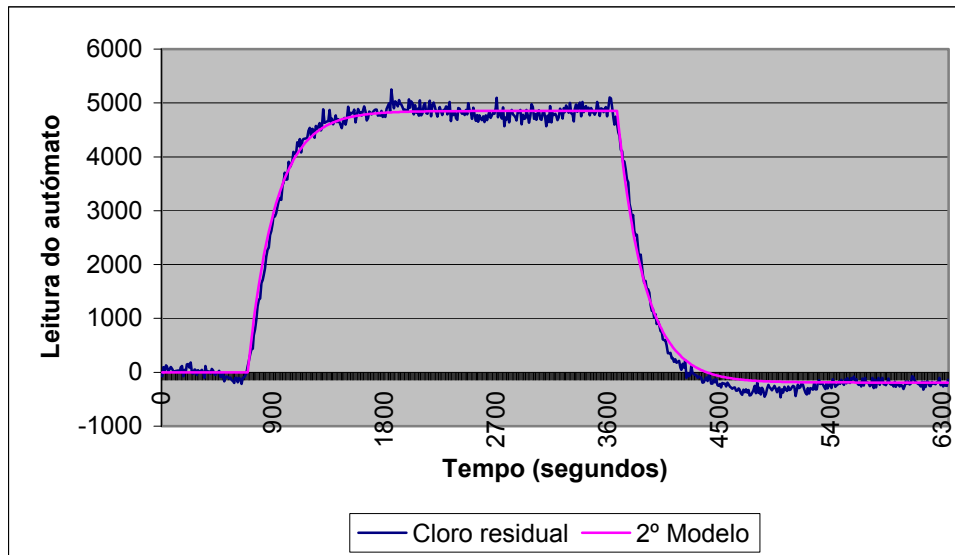


Figura 4-19 2º Modelo.

O atraso e o ganho variaram significativamente, mas o problema não estaria na ordem do modelo pois a forma mantinha-se. Como a recolha de dados efectuada foi devidamente cuidada e existia grande confiança nos registos obtidos, partiu-se do pressuposto que algo no sistema estaria a fazer variar o modelo do processo.

Para confirmar este pressuposto, recolheu-se um terceiro conjunto de dados e tentou-se validar os dois modelos calculados para estes dados.

Nas Figura 4-20 e Figura 4-21, pode-se observar que nenhum dos dois modelos calculados foi validado por este terceiro conjunto de dados.

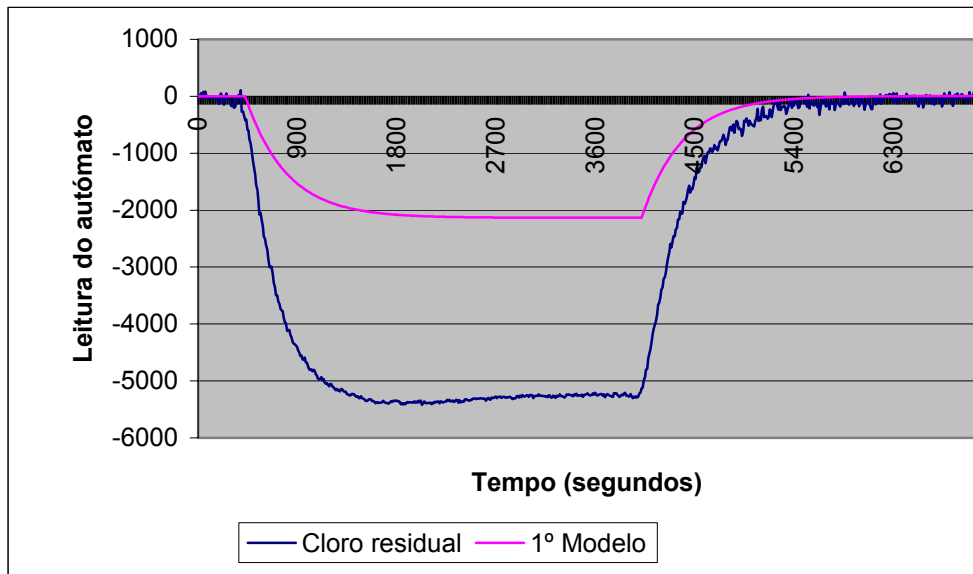


Figura 4-20 Verificação do 1º modelo com o 3º conjunto de dados.

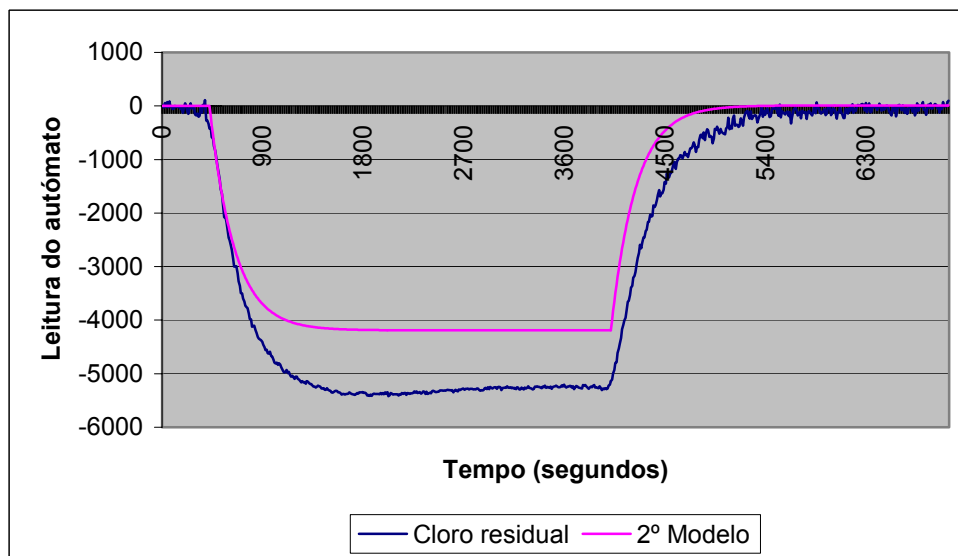


Figura 4-21 Verificação do 2º modelo com o 3º conjunto de dados.

Perante este resultado, chegou-se à conclusão que o modelo do processo varia no tempo. Optou-se então, por projectar um controlador capaz de se ajustar a essas mudanças. A metodologia usada consistiu em calcular os três modelos, correspondentes aos três conjuntos de dados recolhidos e compará-los, de modo a que o controlador se ajustasse ao pior caso.

Calculou-se então um terceiro modelo, utilizando o terceiro conjunto de dados (Figura 4-22). Os cálculos efectuados deram os seguintes resultados:  $d=31$ ;  $a_1=-0,969$  e  $b_1=0,199$ .

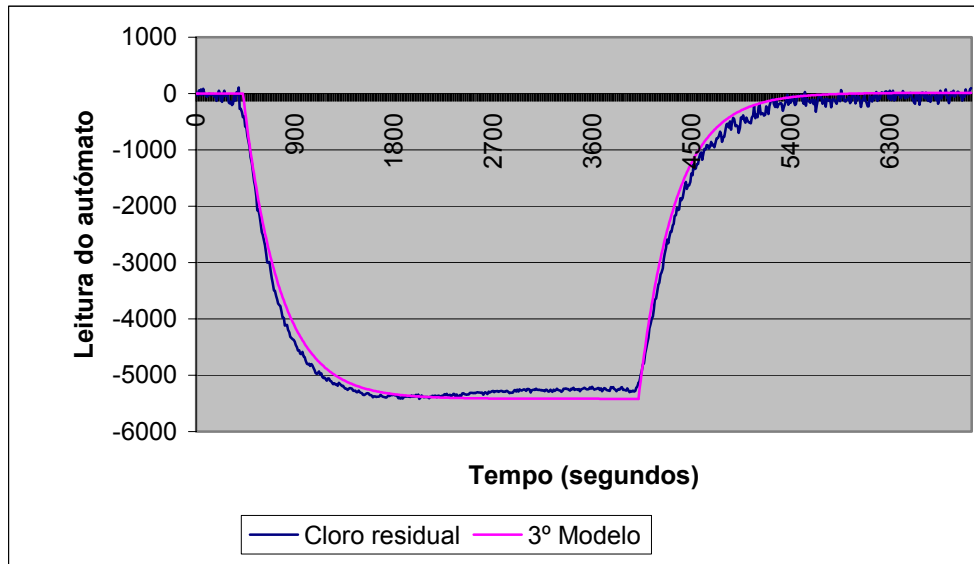


Figura 4-22 3º Modelo.

Em resumo, substituindo  $d$ ,  $a_1$  e  $b_1$ , na equação (4.5), para cada um dos modelos:

$$1^\circ \text{ Modelo: } y(k) = 0,973 y(k-1) + 0,0691 u(k-34) \quad (4.6)$$

$$2^\circ \text{ Modelo: } y(k) = 0,955 y(k-1) + 0,227 u(k-27) \quad (4.7)$$

$$3^\circ \text{ Modelo: } y(k) = 0,969 y(k-1) + 0,199 u(k-31) \quad (4.8)$$

### 4.3.2 Projecto do controlador

A escolha do controlador baseou-se nas características do processo a controlar e nas limitações físicas inerentes ao facto de ser um processo controlado por um autómato.

Um controlador muito utilizado em modos de controlo com realimentação, e de fácil implementação num autómato é o proporcional – integral - derivativo, mais conhecido

por PID. Existem muitos outros controladores possíveis de aplicar a este processo, no entanto de difícil implementação num autómato.

O PID é composto por três acções de controlo: acção proporcional (actuando no ganho proporcional –  $K$ ); acção integral (actuando no tempo integral -  $T_i$ ) e a acção derivativa (actuando no tempo derivativo -  $T_d$ ). O sinal de controlo gerado pelo PID é dado pela equação (4.9):

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.9)$$

Embora o controlador PID tenha estas três acções disponíveis, de acordo com a aplicação, pode-se optar por utilizar apenas uma ou duas. Existem quatro configurações normalmente utilizadas:

1. P – controlo proporcional ( $T_d = 0$  e  $T_i = \infty$ ). Esta configuração não é indicada à aplicação em causa porque não elimina o erro estacionário - “offset” – em sistemas do tipo 0 – auto-regulados [14].
2. PI – controlo proporcional e integral ( $T_d = 0$ ). Esta foi a configuração seleccionada por se considerar a mais indicada para a aplicação em causa. A acção integral faz com que sistemas do tipo 0, sigam entradas de referência constantes, com erro estacionário nulo. No entanto, por si só, esta acção torna o sistema mais instável porque introduz um polo na origem. Quando combinada com a acção proporcional, consegue-se reduzir o efeito desestabilizador do modo integral (devido à introdução de um zero) mantendo a capacidade de eliminar o erro estacionário [14].
3. PD – controlo proporcional derivativo ( $T_i = \infty$ ). A acção derivativa, combinada com a proporcional, tem a função de “antecipar” a acção de controlo tornando o sistema mais rápido. Em sistemas, em que o sinal de controlo esteja atrasado em relação ao erro que pretende corrigir, pode-se dar o caso de o sistema ter transitórios de grande amplitude e períodos de oscilação, que o conduzam à instabilidade. Nestes casos, o controlador PD é aconselhado, por gerar um sinal de controlo que é uma predição da saída do sistema. A acção derivativa não é no

entanto aconselhada ao processo em causa, por se tratar de um processo de primeira ordem, com atraso significativo [14].

4. PID – controlo proporcional integral derivativo. Este controlador combina as vantagens das três acções, não sendo no entanto aplicável ao processo em causa, pelas razões referidas no ponto 3.

O controlador escolhido gera um sinal de controlo dado pela equação que se segue:

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (4.10)$$

Em que o sinal do erro é dado por  $e(t) = r(t) - y(t)$ .

Como já foi referido, os três modelos calculados são modelos discretos. Para projectar o controlador PI necessitou-se dos seus equivalentes contínuos.

Utilizando a transformada de Z ([15] e [16]), a função de transferência  $-H(z)$  - correspondente à equação às diferenças (4.5) é dada pela seguinte equação:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} z^{-d} \quad (4.11)$$

Sendo (4.11) o equivalente discreto do modelo contínuo do processo que se supõe ser da forma:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-T_{\text{atraso}} s} \quad (4.12)$$

Na equação (4.12)  $T_{\text{atraso}} = T_{\text{amostr}} d$ , sendo  $T_{\text{amostr}}$  o período de amostragem e  $d$  o atraso.

$K$  é o ganho ( $k = \frac{b_1}{1 + a_1}$ ) e  $\tau$  é a constante de tempo ( $\tau = \frac{1}{p_s}$ ). Sendo  $p_s$  o pólo em  $s$ , a

sua relação com o pólo em  $z$ ,  $p_z$ , é dada por  $p_z = e^{T_{\text{amostr}} p_s}$  ( $p_z = -a_1$ ).

O período de amostragem utilizados nos três ensaios foi de 10 segundos.

Substituiu-se os valores de  $T_{\text{amost}}$ ,  $a_1$  e  $b_1$  nas equações anteriores e obtiveram-se as três funções de transferência, em contínuo:

$$H_1(s) = \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} e^{-T_{a1}s} = \frac{2,612}{373s + 1} e^{-340s} \quad (4.13)$$

( $p_{s_1} = -0,00268$  e atraso=340segundos)

$$H_2(s) = \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{k_2}{\tau_2 s + 1} e^{-T_{a2}s} = \frac{5,128}{221s + 1} e^{-270s} \quad (4.14)$$

( $p_{s_2} = -0,00453$  e atraso=270 segundos)

$$H_3(s) = \frac{Y_3(s)}{U_3(s)} = \frac{k_3}{\tau_3 s + 1} e^{-T_{a3}s} = \frac{6,631}{327s + 1} e^{-310s} \quad (4.15)$$

( $p_{s_3} = -0,00306$  e atraso=310 segundos)

Em principio, o processo mais difícil de controlar será aquele que tiver a relação atraso / constante de tempo maior e com o ganho mais elevado.

Comparando as três funções de transferência em contínuo, esse caso corresponde a um modelo com: o atraso do 1º modelo (atraso=340 segundos), a constante de tempo do 2º modelo ( $\tau = 221$ ) e o ganho do 3º modelo ( $k=6,631$ ).

O tempo de integração do controlador PI foi igualado à constante de tempo  $\tau$  ( $T_i = 221$  segundos), de modo a cancelar o pólo do processo com o zero do PI. Isto tendo em conta, que em malha fechada, não se pretende maior rapidez, do que em malha aberta. Com os actuadores e o atraso existentes isso será muito difícil de conseguir utilizando um PI.

Para terminar o projecto do controlador faltava apenas calcular o seu ganho. O cálculo do ganho foi feito de forma iterativa, utilizando para o efeito o programa “Matlab”. No “simulink” do “Matlab”, desenhou-se o sistema e procedeu-se às simulações.

Sendo  $G_p(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-T_{\text{atraso}}s}$  e  $G_c(s) = K_c \frac{\tau s + 1}{\tau s}$  respectivamente a função de transferência do processo e a função de transferência do controlador, e utilizando os

valores encontrados para o “processo” mais difícil de controlar fica:

$$G_p(s) = \frac{6,631}{221s+1} e^{-340s} \text{ e } G_c(s) = K_c \frac{221s+1}{221s}$$

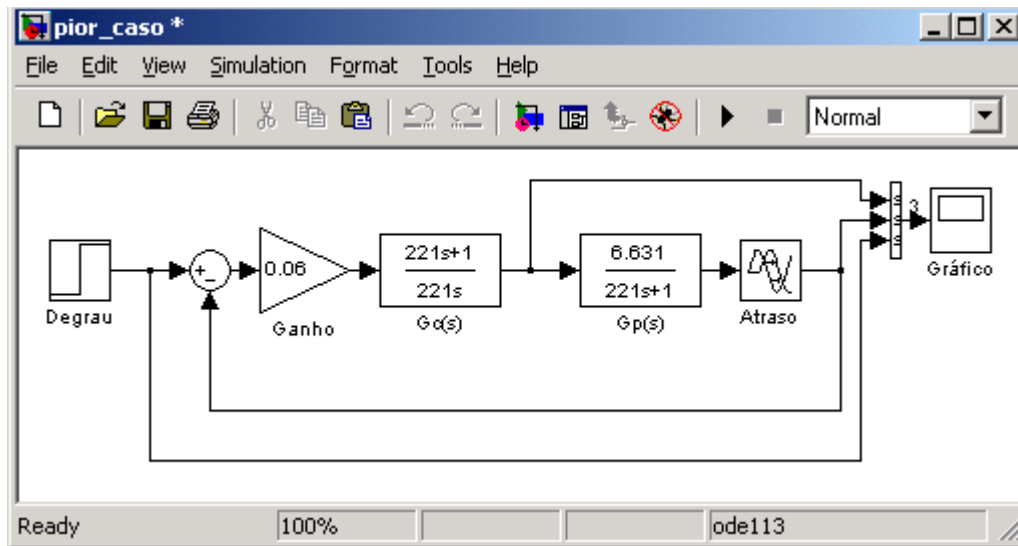


Figura 4-23 Simulação com Matlab – cálculo do ganho do controlador.

De forma iterativa, alterou-se o valor do ganho e verificou-se o gráfico, da resposta a um degrau. O critério usado para determinar o ganho consistiu em encontrar o maior valor possível que não causasse sobrelongação. O valor de ganho encontrado, que melhor se ajustava este modelo, segundo este critério, foi de 0,037. Observe-se o resultado na Figura 4-24.

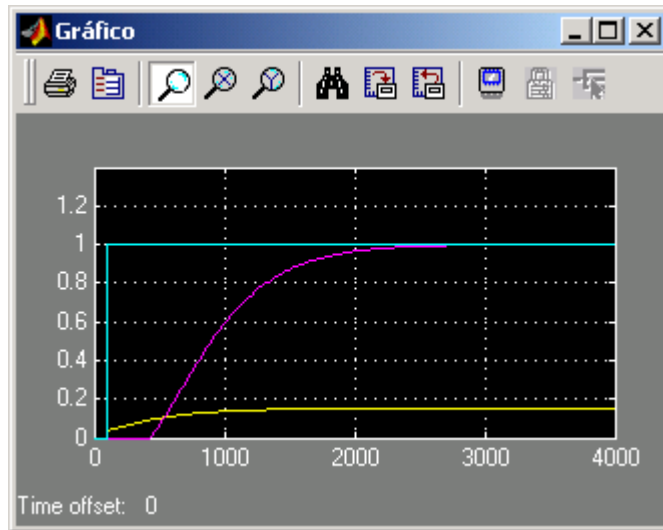


Figura 4-24 Simulação da pior combinação dos três modelos com ganho de 0,037.

No entanto, era necessário encontrar um valor de ganho que ajustasse também, da melhor forma possível, aos três modelos anteriormente calculados. Para isso, simulou-se cada um dos modelos do processo com o controlador calculado. Variou-se o ganho, em cada um deles, e determinou-se o valor máximo de ganho (para maximizar a rapidez) que não causava uma sobrelongação superior a 15 % em nenhum dos quatro casos.

Definiu-se então um novo critério, que consistiu em conjugar o menor tempo de duração do regime transitório com uma sobrelongação inferior a 15% (para esta aplicação considerou-se que 15% seria o máximo aceitável).

No entanto, era necessário encontrar um valor de ganho que ajustasse também, da melhor forma possível, aos três modelos anteriormente calculados. Para isso, simulou-se cada um dos modelos do processo com o controlador calculado. Variou-se o ganho em cada um deles e determinou-se o valor máximo de ganho que não causava uma sobrelongação superior a 15 %, em nenhum dos quatro casos. A solução encontrada foi  $K_c=0,06$ .

Nas figuras que se seguem pode-se observar os gráficos resultantes da aplicação deste controlador ao modelo combinado e a cada um dos três modelos calculados. A azul está representado o degrau, a amarelo a resposta do controlador e a cor de rosa a resposta do sistema.

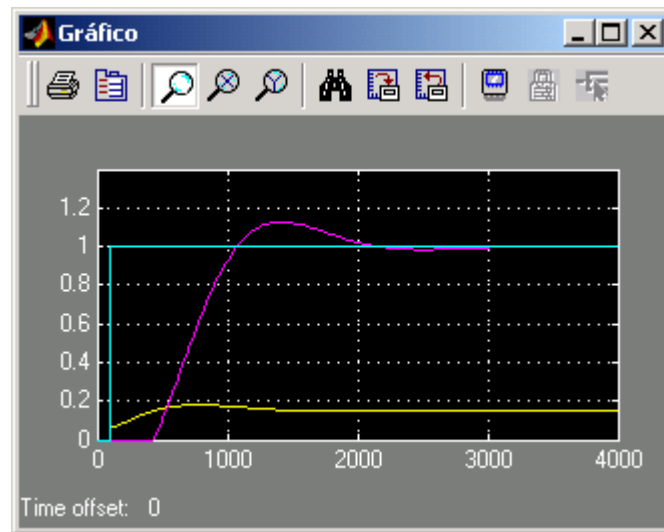


Figura 4-25 Simulação da pior combinação dos três modelos com ganho 0,06.

Na Figura 4-25 pode-se observar que o sistema demorou cerca de 50 minutos a entrar em regime permanente, no entanto, em 18 minutos já tinha cruzado o valor desejado e a sobreelongação foi de, aproximadamente, 12,5 %. Tendo em conta que este processo tem um atraso significativo e que se admite uma sobreelongação até 15 % (valorizando o tempo de estabelecimento) este resultado parece satisfatório.

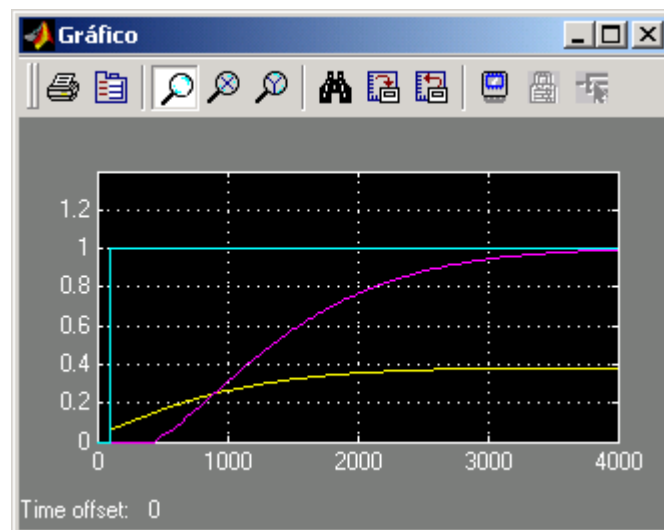


Figura 4-26 Simulação com o 1º modelo.

Na Figura 4-26 pode-se observar que o sistema demorou cerca de 63 minutos a entrar em regime permanente, sem sobreelongação. Aumentado o ganho do controlador,

consegue-se um tempo de estabelecimento inferior, no entanto, um ganho superior a 0,06, causaria sobrelongações muito elevadas no caso do 3º modelo.

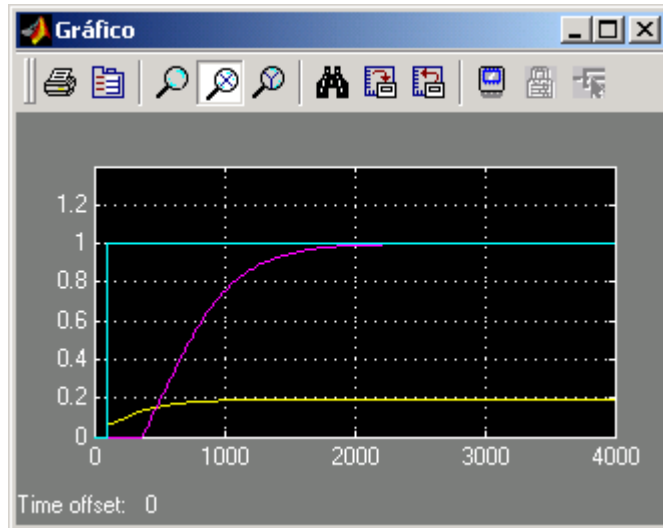


Figura 4-27 Simulação com o 2º modelo.

Na Figura 4-27 o tempo para atingir o regime permanente é de, aproximadamente, 33 minutos sem sobrelongação. Este foi o melhor resultado obtido.

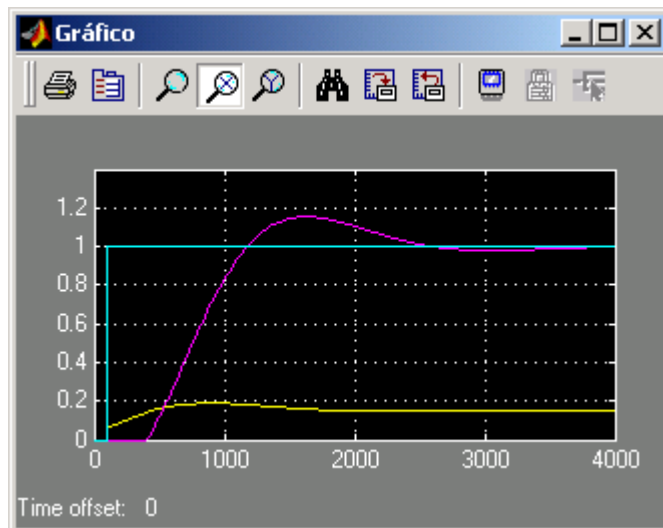


Figura 4-28 Simulação com o 3º modelo.

Na Figura 4-28 pode-se observar que o sistema demorou cerca de 60 minutos a entrar em regime permanente, no entanto, em 20 minutos já tinha cruzado o valor desejado e

em 43 minutos já estava muito perto do valor desejado. A sobrelongação foi de, aproximadamente, 15 %. Tanto a sobrelongação como o tempo de estabilização são aceitáveis.

Em resumo, segundo o critério adoptado, ou seja, chegar ao ponto desejado o mais rapidamente possível, não tendo uma sobrelongação superior a 15%, os parâmetros do controlador que melhor ajustaram todos os casos, foram:  $T_i = 221$  segundos e  $K_c = 0,06$ .

Por forma a avaliar se os parâmetros do controlador estavam optimizados, resolveu-se calcular os parâmetros para o “processo” mais difícil de controlar, utilizando critérios diferentes. Após pesquisa bibliográfica [17], [18], [19] e [20] escolheram-se dois critérios para tentar optimizar o controlador: ITAE e Cohen-Conn. Existem três critérios comuns, que utilizam a área do erro como parâmetro qualitativo. Os três critérios são definidos da seguinte forma [17]:

➤ “Integral absolute error” -  $IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$  ;

➤ “Integral square error” -  $ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt$  ;

➤ “Integral time absolute error” -  $ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$  .

Ainda de acordo com o referido em [17], o critério ISE penaliza grandes erros, ao passo que o ITAE penaliza erros que persistem por longos períodos de tempo. De um modo geral, o critério ITAE é o mais usado.

Por ser o mais usado e por parecer o mais interessante à aplicação em causa, pois em geral, com este critério, consegue-se respostas mais rápidas, escolheu-se o ITAE, para tentar optimizar os parâmetros do controlador.

Em diversa literatura [9] e [14], encontraram-se outros critérios para além destes, como: Ziegler y Nichols e Cohen-Coon.

Destes, escolheu-se o Cohen-Coon pois embora muito semelhante ao Ziegler y Nichols, este último tem maior tendência a provocar oscilações indesejadas.

De acordo com pesquisa bibliográfica [18], [19] e [20], a tabela que se segue foi obtida com um número importante de simulações, e serve para calcular os parâmetros do controlador PI, sabendo: o ganho, a constante de tempo e o atraso, do processo.

**Tabela 4-1 Parâmetros do controlador PI: Cohen-Coon e ITAE.**

<b>Critério</b>	<b>Kc</b>	<b>Ti</b>
Cohen-Coon	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{T_{\text{atraso}}} \left[ 0,9 + \frac{T_{\text{atraso}}}{12\tau} \right]$	$\frac{T_{\text{atraso}} \left[ 30 + 3 \frac{T_{\text{atraso}}}{\tau} \right]}{9 + 20 \frac{T_{\text{atraso}}}{\tau}}$
ITAE	$\frac{0,586}{k} \left( \frac{T_{\text{atraso}}}{\tau} \right)^{-0,916}$	$\frac{\tau}{1,03 - 0,165 \left( \frac{T_{\text{atraso}}}{\tau} \right)}$

Fizeram-se os cálculos para o “processo”  $G_p(s) = \frac{6,631}{221s+1} e^{-340s}$  (pior combinação dos três modelos calculados) e os resultados foram:  $T_i=296$  e  $K_c=0,1$  segundo Cohen-Coon e  $T_i=285$  e  $K_c=0,059$  segundo ITAE.

Em seguida, simularam-se no “Matlab”, os dois controladores calculados, para o

“processo”  $G_p(s) = \frac{6,631}{221s+1} e^{-340s}$  e também para os três modelos

$(G_p(s) = \frac{2,612}{373s+1} e^{-340s}; G_p(s) = \frac{5,128}{221s+1} e^{-270s}$  e  $G_p(s) = \frac{6,631}{327s+1} e^{-310s}$ ), de modo a

comparar os resultados, com os obtidos utilizando o controlador calculado inicialmente ( $T_i = 221$  segundos e  $K_c=0,06$ ).

Nas tabelas de resultados que se seguem, chama-se 1º critério ao utilizado inicialmente (maior rapidez possível com sobrelongação inferior a 15%) e modelo “pior caso” ao obtido por combinação dos três modelos calculados.

O ideal seria conseguir atingir o regime permanente em cerca de 50 minutos, sem sobrelongação. Tendo em conta este princípio, atribuiu-se a cada um dos resultados uma cotação (bom, aceitável e mau), de modo a avaliar os resultados obtidos, com cada um dos critérios.

Tabela 4-2 Simulações para o modelo "pior caso".

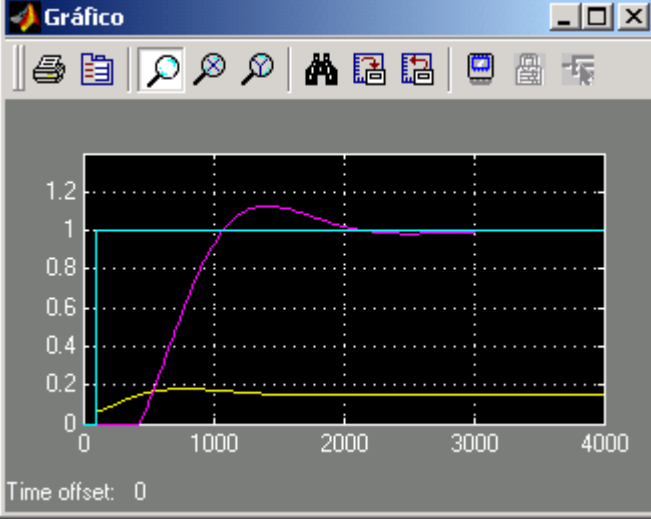
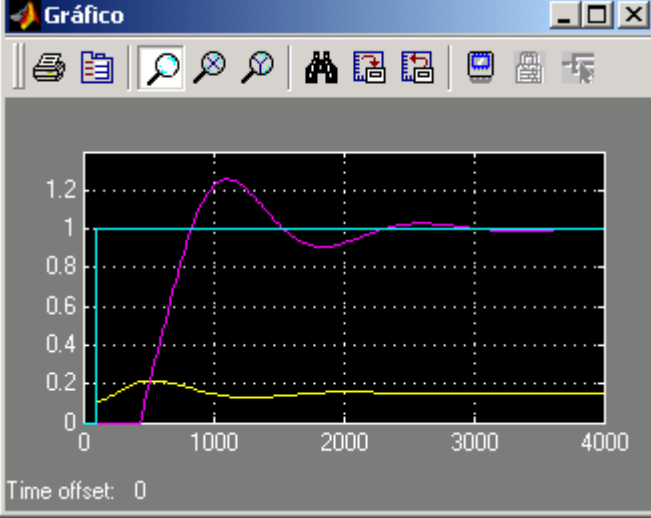
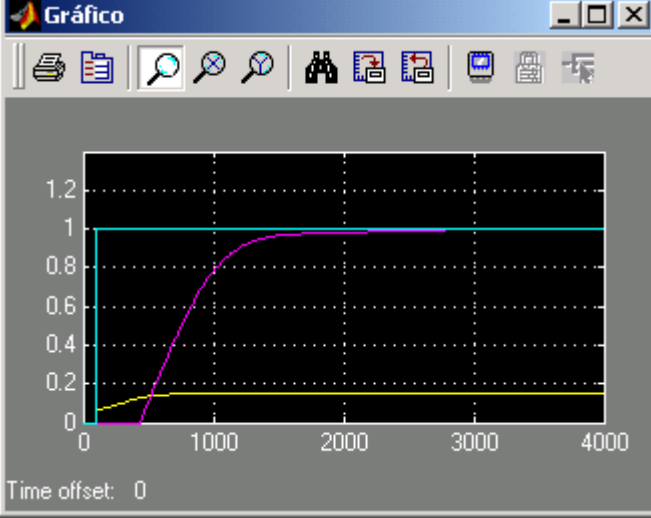
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>modelo “pior caso”</b>, o controlador PI, com os parâmetros calculados usando este modelo e o <b>1º critério</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>12,5 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>50 minutos</b></p> <p>Aos <b>35 minutos</b> está muito próximo do valor final.</p> <p><a href="#">Aceitável.</a></p>
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>modelo “pior caso”</b>, o controlador PI, com os parâmetros calculados usando este modelo e o critério <b>Cohen-Coon</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>25,5 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>75 minutos</b></p> <p>Aos <b>50 minutos</b> está muito próximo do valor final.</p> <p><a href="#">Mau. Sobrelongação muito elevada.</a></p>
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>modelo “pior caso”</b>, o controlador PI, com os parâmetros calculados usando este modelo e o critério <b>ITAE</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>0 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>50 minutos</b></p> <p><a href="#">Bom.</a></p> <p><a href="#">Para o modelo “pior caso”, com o critério ITAE, conseguiu-se o melhor resultado.</a></p>

Tabela 4-3 Simulações para o 1º modelo.

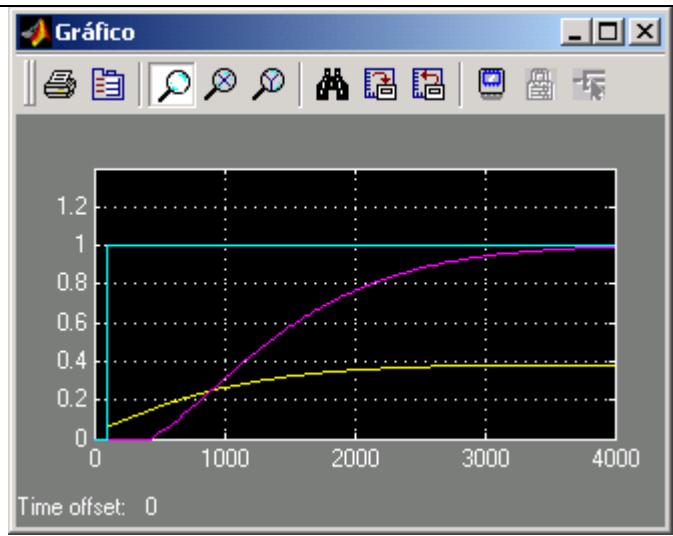
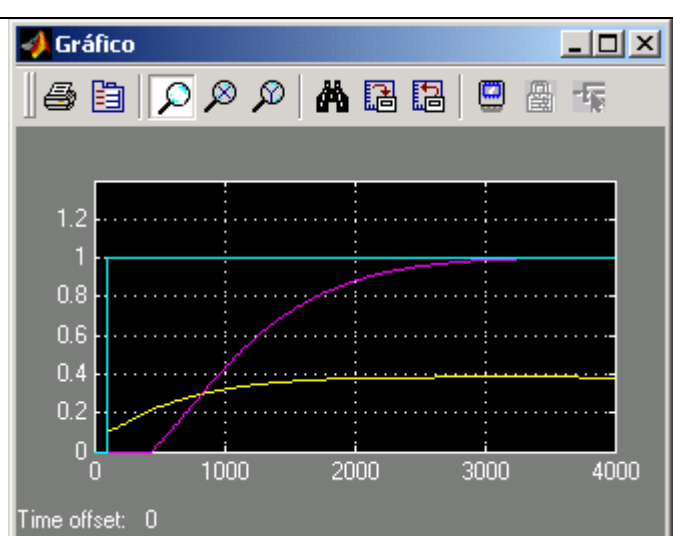
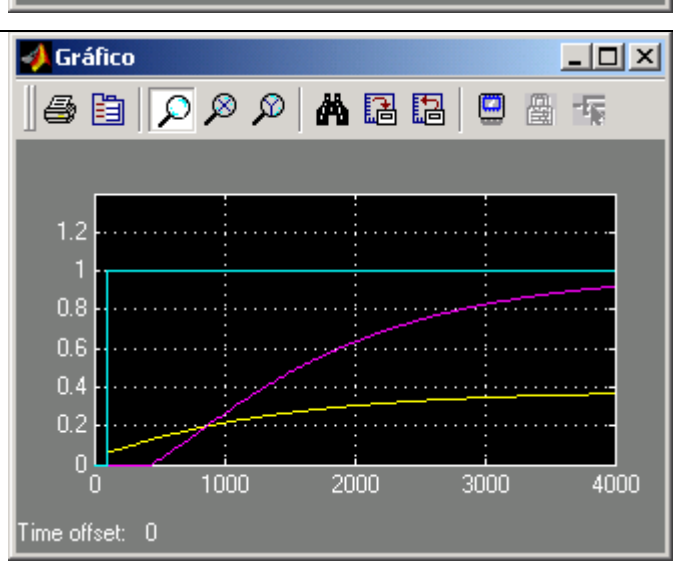
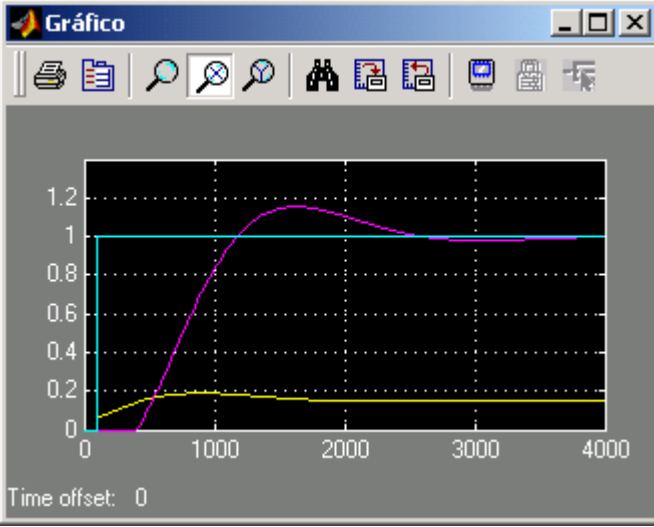
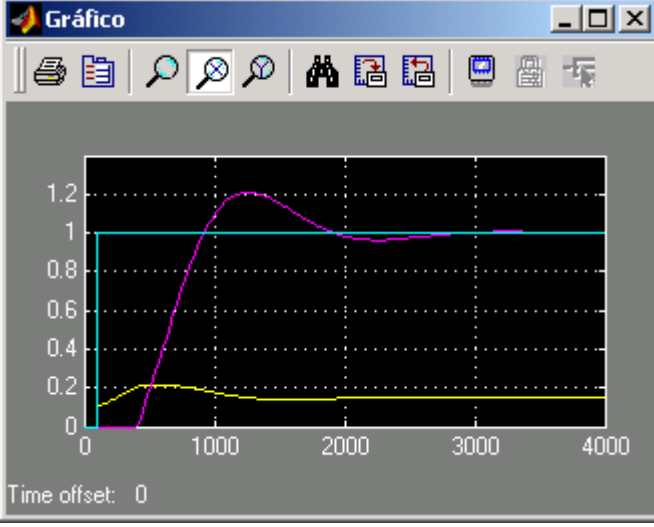
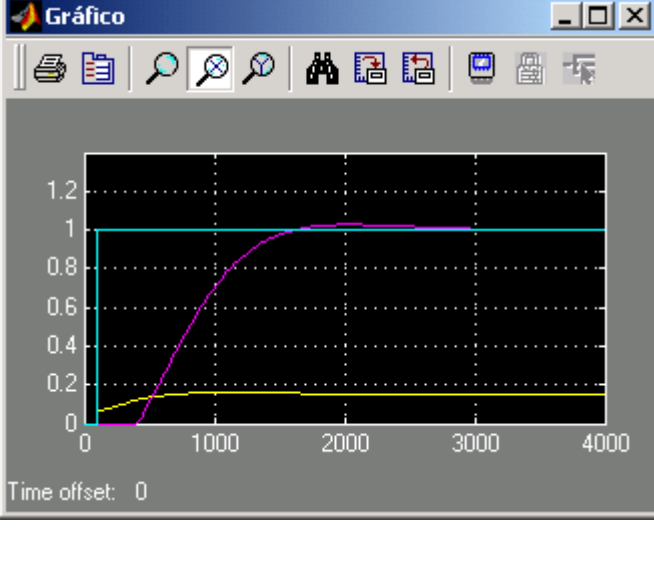
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>1º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando o <b>modelo “pior caso”</b> e o <b>1º critério</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>0 %</b> Regime permanente = <b>63 minutos</b></p> <p><a href="#">Aceitável.</a></p>
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>1º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando o <b>modelo “pior caso”</b> e o critério <b>Cohen-Coon</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>0 %</b> Regime permanente = <b>53 minutos</b></p> <p><a href="#">Aceitável.</a> <a href="#">Para o 1º modelo, com o critério Cohen-Coon, conseguiu-se o melhor resultado.</a></p>
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>1º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando <b>modelo “pior caso”</b> e o critério <b>ITAE</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>0 %</b> Regime permanente = <b>2 h</b></p> <p><a href="#">Mau.</a> <a href="#">Para o 1º modelo, com o critério ITAE, o sistema fica muito lento.</a></p>

Tabela 4-4 Simulações para o 2º modelo.

	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>2º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando o <b>modelo “pior caso”</b> e o <b>1º critério</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>0 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>33 minutos</b></p> <p>Bom.</p> <p>Para <b>2º modelo</b>, com o <b>1º critério</b>, conseguiu-se o melhor resultado.</p>
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>2º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando o <b>modelo “pior caso”</b> e o critério <b>Cohen-Coon</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>0 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>42 minutos</b></p> <p>Bom.</p>
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>2º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando <b>modelo “pior caso”</b> e o critério <b>ITAE</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>0 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>57 minutos</b></p> <p>Aceitável.</p>

Tabela 4-5 Simulações com o 3º modelo.

	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>3º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando o <b>modelo “pior caso”</b> e o <b>1º critério</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>15 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>60 minutos</b></p> <p>Aos <b>43 minutos</b> está muito próximo do valor final.</p> <p><i>Aceitável.</i></p>
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>3º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando o <b>modelo “pior caso”</b> e o critério <b>Cohen-Coon</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>21 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>48 minutos</b></p> <p>Aos <b>33 minutos</b> está muito próximo do valor final.</p> <p><i>Mau. Sobrelongação muito elevada.</i></p>
	<p>O gráfico à esquerda, resulta de aplicar ao <b>3º modelo</b> o controlador PI, com os parâmetros calculados usando <b>modelo “pior caso”</b> e o critério <b>ITAE</b>.</p> <p>Sobrelongação = <b>3 %</b></p> <p>Regime permanente = <b>56 minutos</b></p> <p>Aos <b>26 minutos</b> está muito próximo do valor final.</p> <p><i>Aceitável. Para o 3º modelo este é o melhor resultado.</i></p>

Em resumo, com o controlador calculado usando o critério ITAE, conseguiu-se o melhor resultado, quer para o modelo “pior caso”, quer para o 3º modelo. No entanto, para os 1º e 2º modelos o resultado obtido foi o pior, especialmente para o 1º modelo, em que o sistema ficou muito lento. Com controlador calculado usando o critério Cohen-Coon, conseguiu-se o melhor resultado no caso do 1º modelo, no entanto, em dois casos (modelo “pior caso” e 3º modelo) a sobrelongação foi muito elevada.

Com o controlador calculado usando o 1º critério, conseguiu-se um desempenho sempre aceitável e até muito bom no caso do 2º modelo. Considerou-se, por isso, que se deveria manter o controlador calculado usando o 1º critério ( $T_i = 221$  segundos e  $K_c=0,06$ ).

### 4.3.3 Implementação e teste do controlador

O autômato em causa (SLC 5/03 da “Allen Bradley”) é programável com o programa “RSLogix 500”. Uma das instruções deste programa é o PID (Figura 4-29).

O “Control Block” é um conjunto de 23 “words” que começa (neste caso) na N20:0 e

PID	
PID	
Control Block	N20:0
Process Variable	N7:19
Control Variable	N7:8
Control Block Length	23
Setup Screen	

acaba na N20:22, que serve para configurar o PID. Por exemplo, na “word” 2 - N20:2 escreve-se o “setpoint”, na “word” 3 – N20:3 escreve-se o valor do ganho ( $K_c$ ), na “word” 4 – N20:4 escreve-se  $T_i$ , na “word” 5 – N20:5 escreve-se  $T_d$ , etc.

**Figura 4-29 Função PID.**

O “Process Variable” é o valor da variável que se pretende controlar, neste caso o Cloro residual lido pelo analisador.

O “Control Variable” é o valor de saída do PID.

Esta função pode ser programada clicando em “Setup Screen” e preenchendo os campos (ver Figura 4-30). De notar que o valor de  $T_i$  está convertido para minutos e o valor de  $T_d$  é zero, tornando a função PID, num PI.

O valor de “setpoint” é introduzido a partir da supervisão, escrevendo na “word” 2.

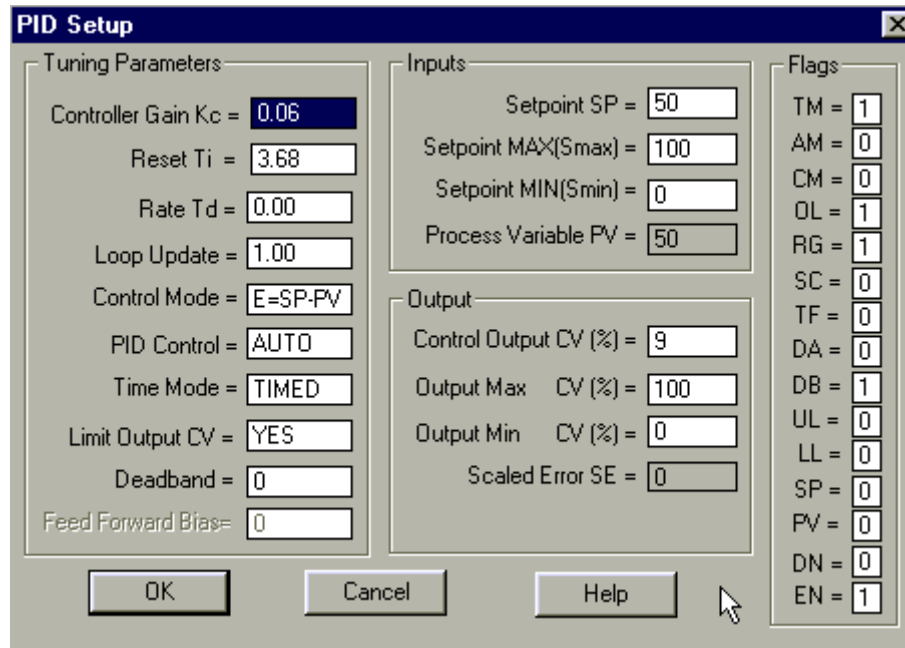


Figura 4-30 Menu de configuração da função PID.

Em função do “setpoint” e da leitura de Cloro residual do analisador, o PI gera um sinal

SCP	
Scale w/Parameters	
Input	N7:8 1660<
Input Min.	0 0<
Input Max.	16383 16383<
Scaled Min.	1 1<
Scaled Max.	655 655<
Output	N7:27 67<

de saída (N7:8). Esse número inteiro encontra-se na escala de números inteiros do autômato (0 a 16383) e é necessário diminuir a escala devido a limitações físicas. Quando a saída do PI fosse 16383, o tempo entre impulsos seria muito pequeno. A bomba não conseguiria receber todos os impulsos e daria erro de falha de impulsos. Estipulou-se que no máximo a bomba daria dois impulsos por segundo, ou seja, o valor máximo de saída do PI teria de ser 655 (Figura 4-31).

Figura 4-31 Conversão da saída do PID.

O valor de saída do PI, já escalado, (N7:27) é invertido e multiplicado por uma constante (Figura 4-32). O resultado é um valor de tempo (inverso de frequência). Este valor é utilizado para temporizar o intervalo entre impulsos. A constante escolhida foi 32767, por ser o máximo do temporizador. Assim, quando a saída do PI for 1, o intervalo entre impulsos será o máximo de tempo permitido pelo temporizador.

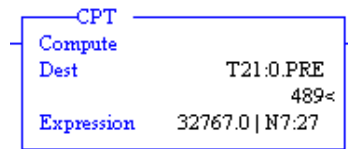
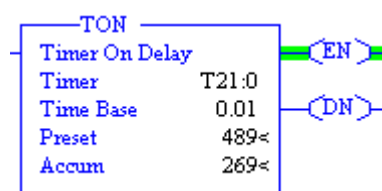


Figura 4-32 Cálculo do tempo entre impulsos.

O valor de tempo entre impulsos é enviado para o “Preset” do temporizador (Figura 4-33). O temporizador coloca o bit “DN” a “1” sempre que termina a temporização. O “Time Base” de 0,01 significa que o “Preset” e o “Accum” (acumulado) estão em centésimas de segundo. No exemplo da figura, o



“Preset” é de 4,89 segundos e o “Accum” é de 2,69 segundos. Isto significa que a bomba estava a dosear um impulso de 4,89 em 4,89 segundos.

Figura 4-33 Temporizador do tempo entre impulsos.

De modo a garantir que o sinal do bit “DN” activa a saída do autómato, colocou-se um temporizador (Figura 4-34) para manter o sinal a “1” durante tempo suficiente para activar a saída (0,3 segundos, no caso).

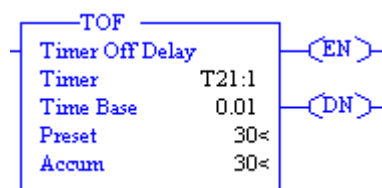


Figura 4-34 Temporizador do tempo de duração dos impulsos.

O sinal “EN” do temporizador da Figura 4-34 activa a saída do autómato O:9/10 (Figura 4-35) que por sua vez, está directamente ligada à bomba. Trata-se do sinal de comando da bomba.

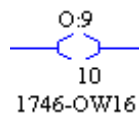


Figura 4-35 Saída autómato - comando bomba de impulsos.

O gráfico da Figura 4-36 foi retirado da supervisão e serve para exemplificar, o comportamento do sistema, depois de implementar o controlador PI, quando em regime permanente.

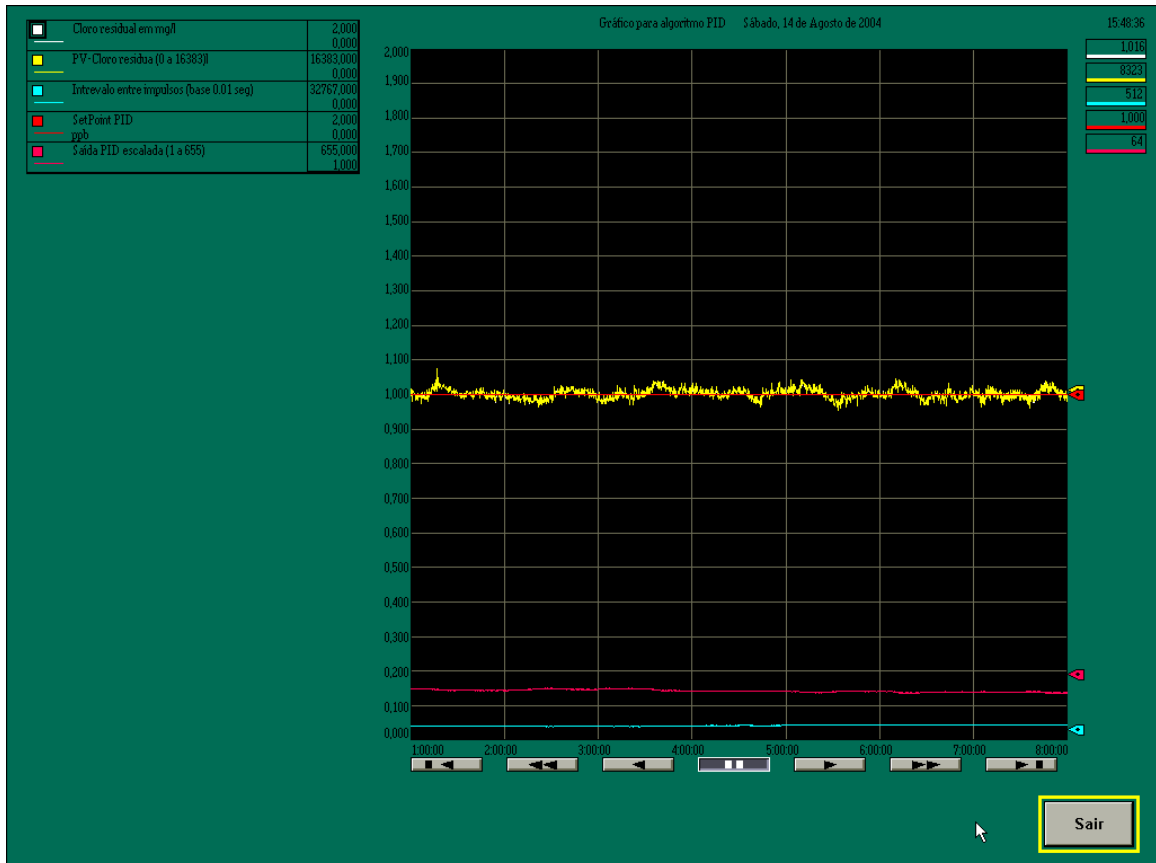


Figura 4-36 Comportamento controlador PI (saída 0 a 655).

Os valores de Cloro residual são representados a amarelo. O “setpoint”, linha vermelha, estava definido para 1,00 mg/l. As variações são entre 0,95 e 1,05, o que é desprezável para a aplicação em causa. Considerou-se o comportamento em regime permanente bom.

De modo a testar a resposta do sistema a alterações de “setpoint” (degraus), provocou-se, um degrau ascendente e um degrau descendente. Antes de aplicar o degrau descendente, aguardou-se pelo regime permanente. O resultado pode ser observado na Figura 4-37.

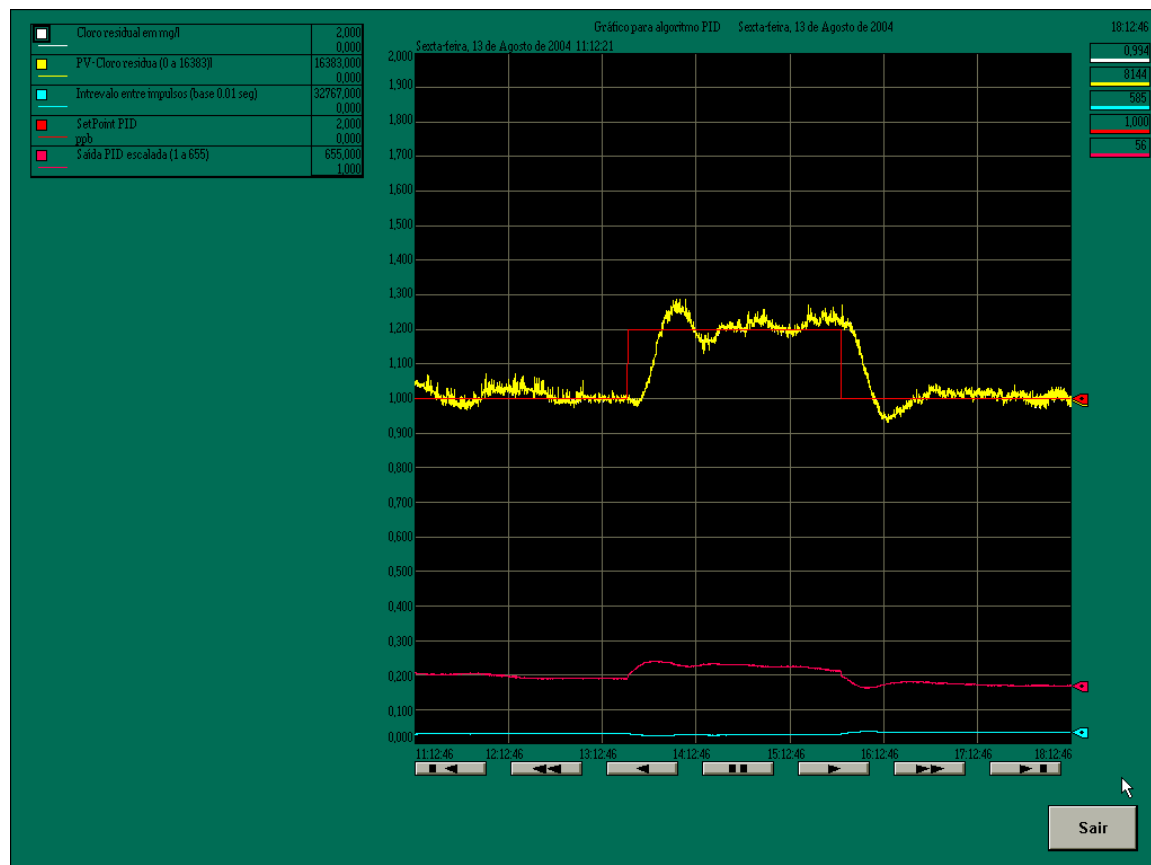


Figura 4-37 Resposta do sistema a alterações de “setpoint”.

O tempo de estabelecimento foi de aproximadamente 60 minutos, tanto no degrau ascendente como no descendente. A sobreelongação máxima foi de 0,1 mg/l. Os resultados foram bastante satisfatórios, embora com uma sobreelongação superior à prevista e por isso o controlador encontra-se actualmente em funcionamento.

## 4.4 Instrumentação adicionada

### 4.4.1 Controlo automático de doseamento de Dióxido de Cloro

No ponto 3.4 definiu-se que para a realização deste controlo automático, era necessário um caudalímetro, para medir o caudal de solução de Dióxido de Cloro e um analisador de Dióxido de Cloro residual.

- Caudalímetro.

O primeiro passo consistiu em calcular o diâmetro que o caudalímetro deveria ter.

A produção da ETA é de  $1250 \text{ m}^3/\text{h}$ . Supondo a taxa de tratamento de Dióxido de Cloro de  $2 \text{ g/m}^3$ , a quantidade de Dióxido de Cloro necessária é de  $1250 \times 2 = 2,5 \text{ kg/h}$ . A unidade de preparação de solução de Dióxido de Cloro, utiliza uma concentração de  $2 \text{ g/l}$ , logo numa hora, o caudal de solução de Dióxido de Cloro é de  $1250 \text{ l/h} = 0,347 \text{ l/s} = 0,000347 \text{ m}^3/\text{s}$  Supondo a velocidade =  $5 \text{ m/s}$ ,

$$\text{Secção} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Velocidade}} = \frac{0,000347}{5} = 0,694 \times 10^{-3} \text{ m}^2 . \text{ O diâmetro do caudalímetro é}$$

$$\text{dado por: Diâmetro} = \sqrt{\frac{S \times 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,694 \times 10^{-3} \times 4}{3,14}} = 9,4 \times 10^{-3} \text{ m} = 9,4 \text{ mm} .$$

O caudalímetro escolhido [21] é electromagnético, tem diâmetro  $10 \text{ mm}$  (por ser o diâmetro existente no mercado mais próximo do calculado) e saída ( $4 \text{ a } 20 \text{ mA}$ ) para



ligar directamente a uma entrada analógica do autómato. As razões para se optar por este equipamento foram: pequenas dimensões; de fácil montagem, configuração e manutenção; visor com caudal instantâneo e totalização de caudal; exactidão adequada à aplicação em causa ( $3\%$ ) e (boa relação qualidade/ preço).

**Figura 4-38 Caudalímetro.**

O caudalímetro foi instalado na tubagem logo a seguir às bombas doseadoras e ficou a funcionar de acordo com o esperado.

➤ **Analizador de Dióxido de Cloro residual.**

Em relação ao analisador, existia em armazém um analisador de Cloro residual de reserva. Esse analisador também pode ser utilizado para medições de Dióxido de Cloro, sendo necessário apenas, trocar o potenciostato e reprogramá-lo para o tipo de medida e escala pretendidos. Por razões económicas e também porque os resultados obtidos, com os analisadores semelhantes, em várias instalações da empresa, são fiáveis, optou-se por instalar o analisador existente em armazém. Existem vários controlos automáticos de doseamento de Cloro da empresa, que utilizam este modelo de analisador, com resultados bastante satisfatórios.

Montou-se uma bomba submersível no final da câmara de contacto com o Dióxido de Cloro, para recolher a água de amostragem para o analisador. O analisador foi

montado, programado e calibrado e encontra-se a funcionar correctamente, com resultados bastante satisfatórios.

### **4.4.2 Controlo da turvação da água filtrada**

Um indicador muito importante da qualidade da água é a turvação cuja unidade de medida é NTU (“Nephelometric Turbidity Units”).

No ponto 3.4, falou-se que, um dos problemas detectados na ETA de Castelo de Paiva, prendia-se com o facto de existir apenas um turbidímetro, com indicação “online”, para controlo da turvação da água filtrada.

Quando se detectava uma turvação elevada no reservatório de água filtrada, não se sabia qual dos filtros é que estava a provocar o problema. Para detectar era necessário medir a turvação, com o turbidímetro portátil, na saída de todos os filtros em funcionamento.

A avaliação deste problema, levou a concluir, que seria interessante ter a medida da turvação individual, ou seja, por filtro. Tanto para optimização do controlo da turvação da água filtrada, como para posteriormente, avaliar a influência deste parâmetro, na lavagem dos filtros.

A importância deste parâmetro, como indicador da qualidade da água, justificava o investimento na aquisição de cinco turbidímetros, um por cada filtro, para medir “online” a turvação à saída de cada filtro.

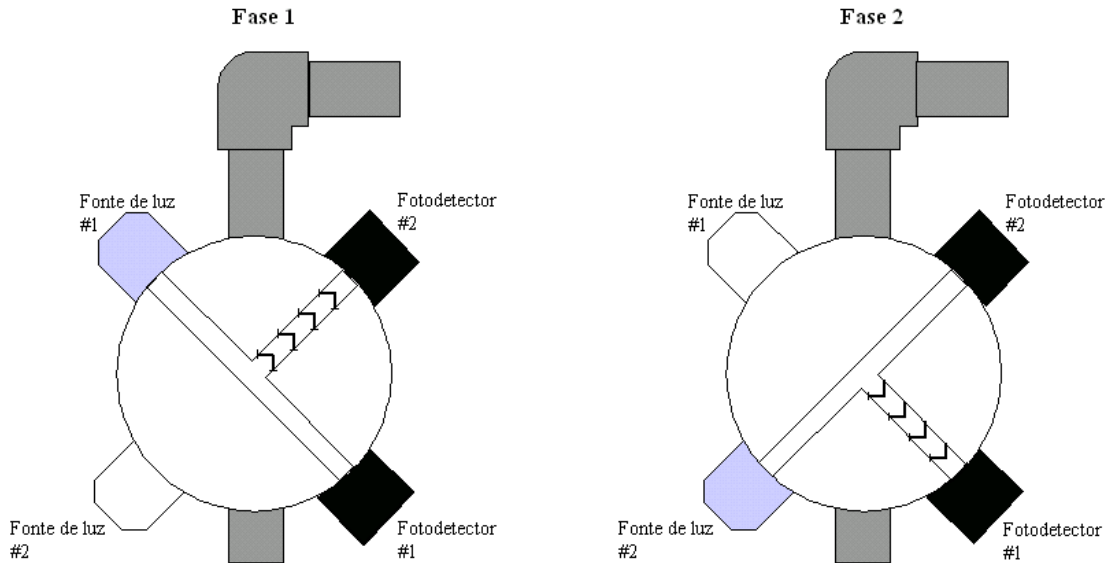
A escolha da marca e modelo foi cuidadosa, de forma garantir confiança nos valores “online” (visualizados no local e na supervisão) e também tendo em conta a possibilidade de vir a utilizar essa informação no algoritmo de controlo da lavagem automática dos filtros. O aparelho teria por isso que garantir: boa resolução, fiabilidade e uma manutenção fácil e pouco frequente.

A turvação é um parâmetro muito difícil de medir porque depende do número, tamanho, forma e cor das partículas em suspensão na água os quais variam muito.

Existem ainda factores que interferem com a medição efectuada pelo analisador, tais como: sujidade do sensor, cor da amostra, envelhecimento do fotodetector, bolhas de ar e dispersão da luz.

O turbidímetro seleccionado utiliza o método GLI 2 (“Great Lakes Instrument Method 2”) que é um dos três métodos para medição de turvação, aprovados pela USEPA (“United States Environmental Protection Agency”).

O princípio de funcionamento deste turbidímetro [22], consiste em utilizar duas fontes de luz e dois fotodetectores (ver Figura 4-39 [22]).



**Figura 4-39** Princípio de funcionamento do turbidímetro.

Como se pode ver na Figura 4-39 as fontes de luz e os fotodetectores estão localizados a 90°. Cada 0.5 segundos são retiradas duas medidas. Na primeira fase acende a fonte de luz #1 que é encaminhada para o fotodetector #1 e para o fotodetector #2 vai a luz que é reflectida a 90°. Em seguida, acende a fonte de luz #2 que é encaminhada para o fotodetector #2 e para o fotodetector #1 vai a luz que é reflectida a 90°. Em ambas as fases, o sinal do fotodetector que recebe a luz directa é chamado sinal activo e o sinal do fotodetector que recebe a luz reflectida a 90° é chamado sinal de referência. Das duas fases de medição resultam quatro medidas das duas fontes de alimentação: dois sinais activos e dois sinais de referência. O valor de turvação resulta de um cálculo matemático, cujo algoritmo considera as quatro medidas efectuadas. Em resultado, os erros introduzidos pela cor da amostra, aparecem tanto no numerador como no denominador e são desta forma cancelados. Este algoritmo, permite ainda, grande

sensibilidade para altos valores de turvação (a escala pode ir até aos 100 NTU). Este método de cancelar erros, também torna o instrumento muito preciso na escala de 0 a 1 NTU.

Os motivos que levaram à escolha deste turbidímetro foram:

- Utilização de um método aprovado pela USEPA;
- Compensação dos factores de erro;
- Existência de um cubo de verificação (“Cal-Cube”) que permite de uma forma muito rápida e simples, fazer a aferição do instrumento;

Pouca e fácil manutenção (limpeza da câmara de leitura, limpeza do “Cal-Cube” e aferição com o “Cal-Cube”).

Os cinco turbidímetros foram adquiridos e instalados nas saídas de água filtrada de cada um dos filtros e encontram-se a funcionar correctamente.

## **CAPÍTULO 5 – Considerações finais**

---

## 5 Considerações finais

### 5.1 Objectivos alcançados

O presente trabalho foi totalmente desenvolvido numa instalação em funcionamento, e como tal, sujeito a várias dificuldades inerentes a este tipo de situação. Contudo, e para grande satisfação pessoal, os objectivos propostos foram cumpridos:

1. Foi desenvolvida de raiz, uma supervisão, que preencheu as lacunas existentes na antiga e foi de encontro ao pretendido pelos seus utilizadores finais. A supervisão desenvolvida, tem a mais valia, de funcionar como sistema de aquisição de dados, possibilitando assim, a consulta do histórico de variáveis importantes, quer para o processo, quer para estudos futuros;
2. Foi implementada instrumentação fiável e de fácil manutenção, criando assim condições, para que se possa desenvolver um controlo automático de doseamento de Dióxido de Cloro e um controlo automático dos tempos de lavagem dos filtros. Foi ainda conseguida, uma monitorização individual, da turvação dos filtros. Da instrumentação apontada como necessária, ficou apenas em falta a necessária para o controlo automático de doseamento de Cloreto Férrico, por razões explicadas no ponto 5.3.3;
3. A rede de automação tornou-se mais rápida e resolveram-se os problemas de falhas de comunicação;
4. Foi implementado, com sucesso, um controlo automático de doseamento de Cloro. Com este consegue-se manter o Cloro residual da água tratada no valor desejado. O sistema encontra-se capaz de compensar perturbações externas e alterações de “setpoint”.

Definiram-se pontos chave para otimizar o sistema de automação, supervisão e controlo de Estações de Tratamento de Água. Desta forma, facilitou-se o desenvolvimento de um trabalho de optimização, numa outra ETA, muito mais rápido e objectivo. Considera-se assim atingido, o objectivo principal deste trabalho.

## 5.2 Conclusões

A realização deste trabalho no âmbito de um mestrado, permitiu aprofundar conhecimentos teóricos e estudar metodologias, sem os quais, o trabalho prático realizado seria mais pobre e os resultados obtidos não seriam os mesmos. No caso dos algoritmos de controlo, a falta de experiência e os conhecimentos pouco consolidados, de metodologias para identificação de modelos, escolha de controladores e critérios para cálculo dos seus parâmetros, teria resultado numa implementação muito mais empírica e menos científica. Por outro lado, todo o trabalho de desenvolvimento de uma nova supervisão, melhoramento da rede e estudo de instrumentação foi realizado com o objectivo acrescido, de implementar condições para futuros estudos. Assim, o trabalho realizado neste âmbito permitiu adquirir experiência, segurança e conhecimentos, e ao mesmo tempo criar as condições necessárias, para que no futuro se continue a desenvolver e implementar novos algoritmos de controlo, sempre com o objectivo de melhoria contínua dos processos.

## 5.3 Desenvolvimentos futuros

### 5.3.1 Sistema servidor-cliente

Em relação à supervisão da ETA de Castelo de Paiva, chegou-se à conclusão que seria necessário criar um servidor e dois clientes, para que se pudesse operar com a supervisão, em dois computadores simultaneamente. Para instalar este sistema são necessários os seguintes programas [23]:

- “RSLinx”: a instalar no servidor. Serve para fazer a comunicação entre o sistema de supervisão e os autómatos;
- “RSView32 Runtime”: a instalar no servidor. Serve para correr uma aplicação desenvolvida com “RSView32 Works”;
- “RSView32 Active Display Server”: a instalar no computador que se pretende que funcione como servidor;
- “RSView32 Active Display Dedicated Client”: a instalar nos computadores que se pretende que funcionem como clientes.

Estes programas encontram-se em fase de aquisição, motivo pelo qual este sistema ainda não foi instalado. A importância deste sistema prende-se não só com questões de funcionalidade, mas também com a obtenção de segurança, fiabilidade e redundância no sistema de supervisão. Este trabalho será efectuado num futuro próximo.

### **5.3.2 Controlo automático de doseamento de Dióxido de Cloro**

Uma vez estudado o algoritmo (ponto 3.4) e implementada a instrumentação necessária (ponto 4.4.1), estão agora reunidas as condições para o desenvolvimento e implementação de um controlo automático de doseamento de Dióxido de Cloro.

### **5.3.3 Controlo automático de doseamento de Cloreto Férrico**

A pesquisa realizada sobre analisadores de potencial zeta [10], [24] e [25], revelou que se trata de um equipamento muito caro e que necessita de uma manutenção muito cuidada e especializada para ser fiável, o que torna muito difícil a sua utilização num controlo automático. Facilmente o instrumento pode dar um valor menos correcto, o que pode levar a alterações da taxa de doseamento de coagulante incorrectas. A alteração da taxa de doseamento de coagulante tem que ser muito bem estudada, pois a sua influência na qualidade da água é muito grande. A aquisição de um analisador de tão elevado valor tem de ser muito bem estudada, pois não existe conhecimento de existir em Estações de Tratamento de Água, um doseamento de coagulante completamente dependente de um analisador deste tipo e não existem por isso, garantias de funcionamento.

Um trabalho que pode no entanto ser desenvolvido com algumas garantias de sucesso, trata-se do doseamento automático de cloreto de férrico em função da turvação e do ferro residual. Os analisadores de ferro residual são mais baratos e dão boas garantias de fiabilidade. O analisador de ferro residual para a ETA de Castelo de Paiva encontra-se numa fase de aquisição. Após implementação, será possível o desenvolvimento deste algoritmo.

#### **5.3.4 Lavagem dos filtros.**

Outro trabalho de grande interesse seria aproveitar a existência de histórico de variáveis como: turvação individual dos filtros, temperatura, nível de colmatação e outras (a estudar quais) para tentar compreender de que forma é que estas influenciam as lavagens dos filtros.

A ideia é criar um algoritmos, que dependendo do valor de certas variáveis, defina os tempos de lavagem com ar, ar e água e água, que otimizem a lavagem do filtro. Desta forma conseguia-se eliminar a forma empírica de atribuir o tempos de lavagem.

Com a implementação do sistema de aquisição de dados e dos turbidímetros, foram criadas condições para a realização deste trabalho.



**ANEXO A**

---

## Anexo A Sinópticos da supervisão desenvolvida



Figura A-1 Sinóptico Principal.

Neste sinóptico pode-se observar uma imagem da ETA de Castelo de Paiva, vista por cima. A barra de botões do lado esquerdo permite aceder a todos os sinópticos existentes e está sempre visível, à medida que se navega de sinóptico em sinóptico.

Também se pode aceder aos sinópticos passando o rato em cima da imagem da ETA. Por exemplo, é visível um quadrado preto em volta do reservatório de água tratada, trata-se de um apontador, para se aceder ao sinóptico, da elevação de água tratada.

Existe ainda uma barra, na parte inferior, que de momento se encontra a amarelo. Trata-se da sinalização de alarmes e também está disponível em todos os sinópticos. Se estiver a cinzento significa que não existem alarmes. Se ocorrer um alarme, começa a piscar a vermelho e amarelo e aparece a descrição do alarme na barra. Depois de reconhecido o alarme, se ele continuar activo, a barra fica a amarelo como mostra Figura A-1. O botão de Alarmes tem a mesma animação de cores.

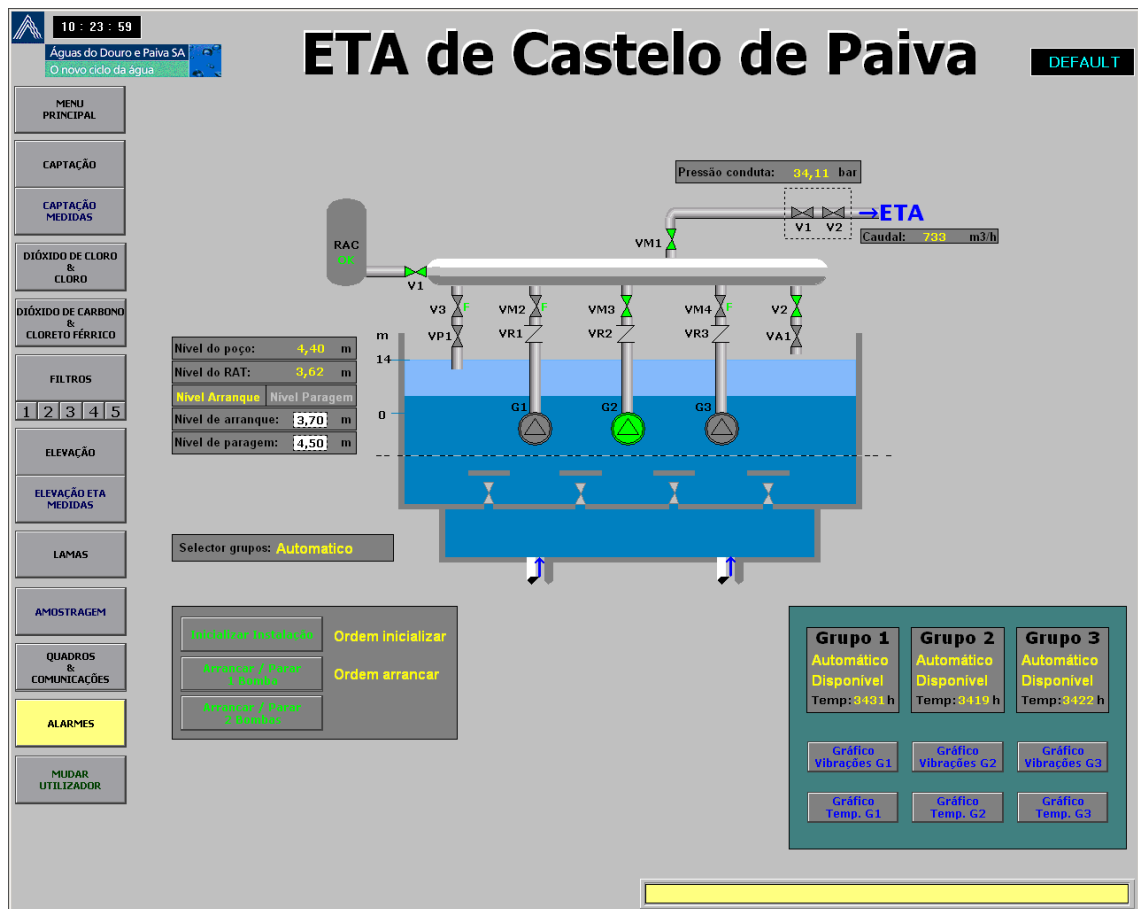


Figura A-2 Sinóptico Captação.

Neste sinóptico é possível visualizar e operar com o automático “Poço de bombagem”. Um grupo (ou válvula) a verde significa que está em funcionamento (ou aberta). A cinzento significa que está parado (ou fechada). Se um qualquer equipamento tiver um defeito começa a piscar a vermelho e amarelo. Os estados, modos e valores analógicos aparecem a amarelo. Os botões de comando têm fundo cinzento e letras verdes, por exemplo, “Arrançar / Parar 1 Bomba”. Os gráficos são acedidos através dos botões com letras a azul.

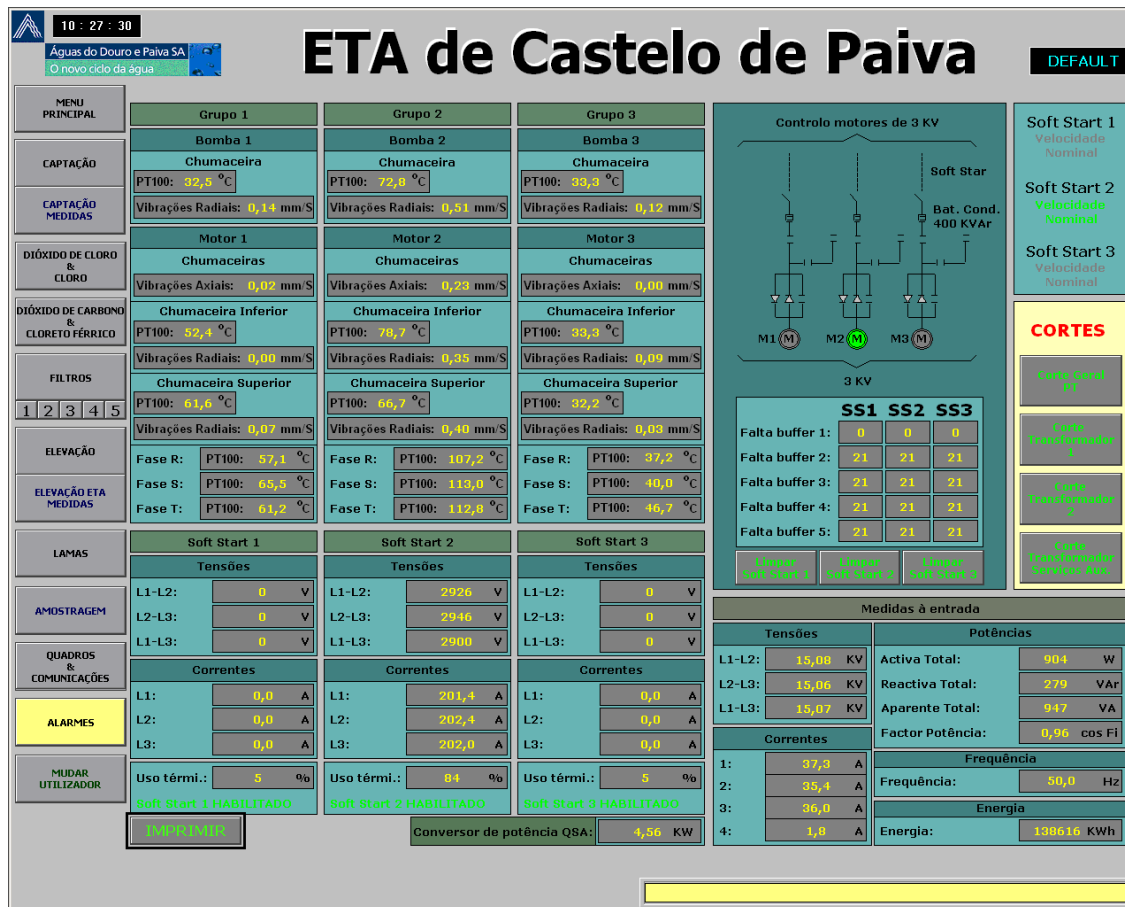


Figura A-3 Sinóptico Captação Medidas.

Neste sinóptico visualizam-se: temperaturas, vibrações, tensões, correntes, potências, etc., dos grupos e quadros eléctricos da Captação. Também é possível efectuar cortes dos transformadores ou mesmo corte de energia geral, do edifício da Captação (ver botões de comando, do lado direito).

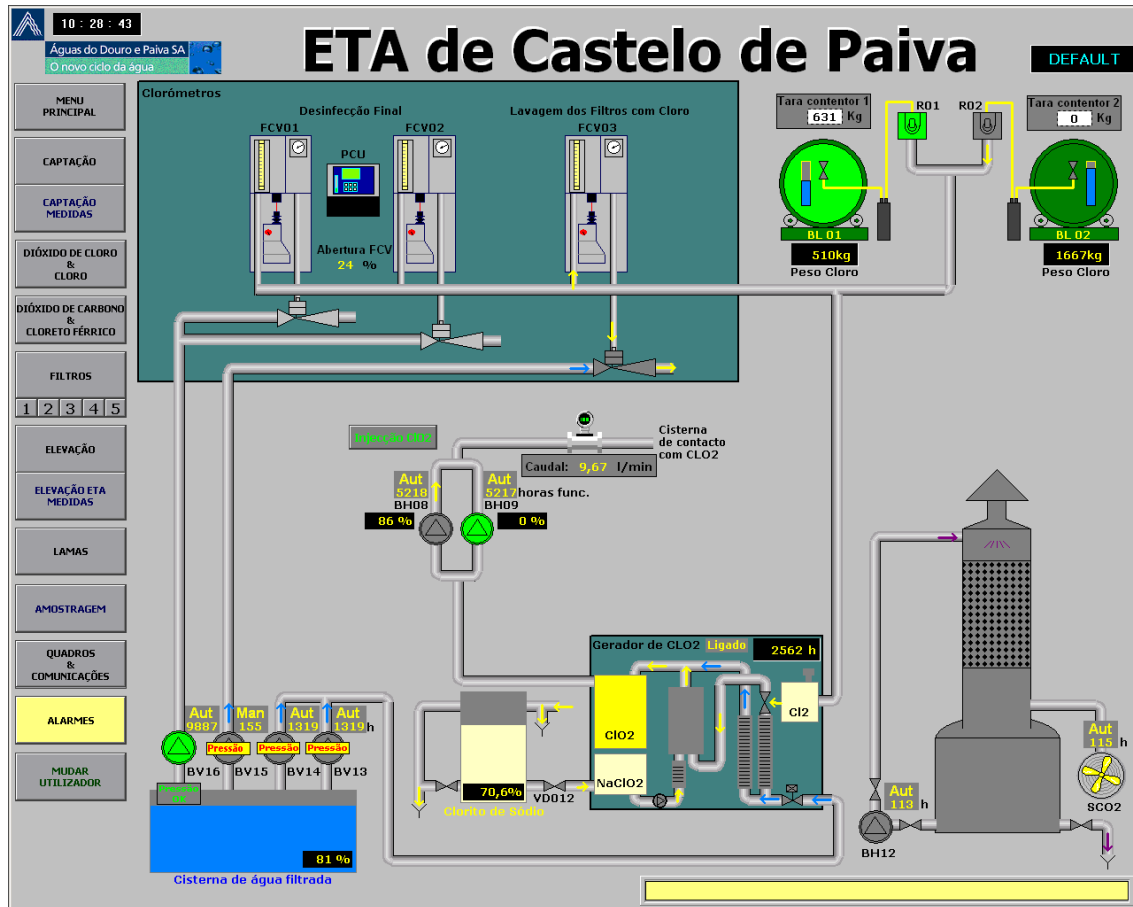


Figura A-4 Sinóptico Dióxido de Cloro e Cloro.

A monitorização e controlo dos doseamentos de Dióxido de Cloro e do Cloro, são efectuados neste sinóptico. Também se pode visualizar no canto inferior direito a torre de neutralização de fugas de Cloro.

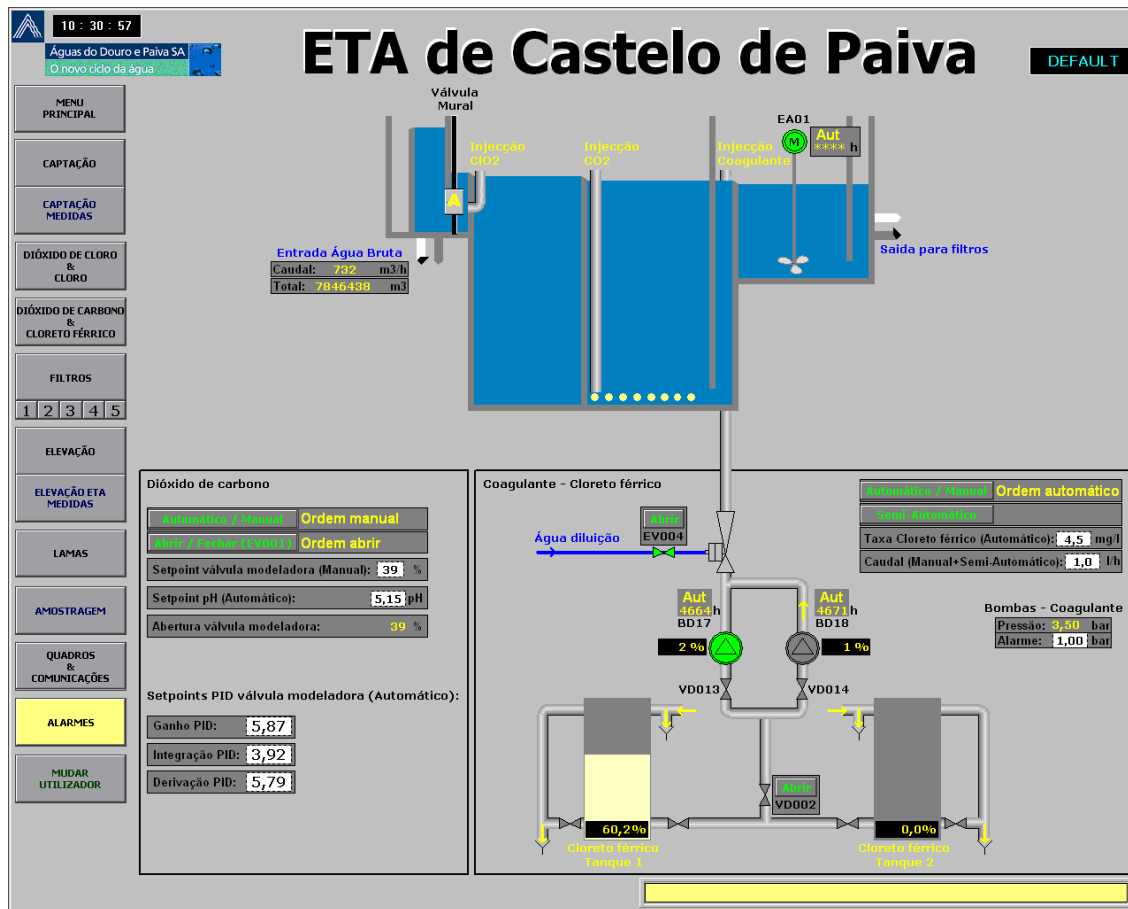


Figura A-5 Sinóptico Dióxido de Carbono e Cloreto Férrico.

A monitorização e controlo dos doseamentos de Dióxido de Carbono e de Cloreto Férrico, são efectuados neste sinóptico.

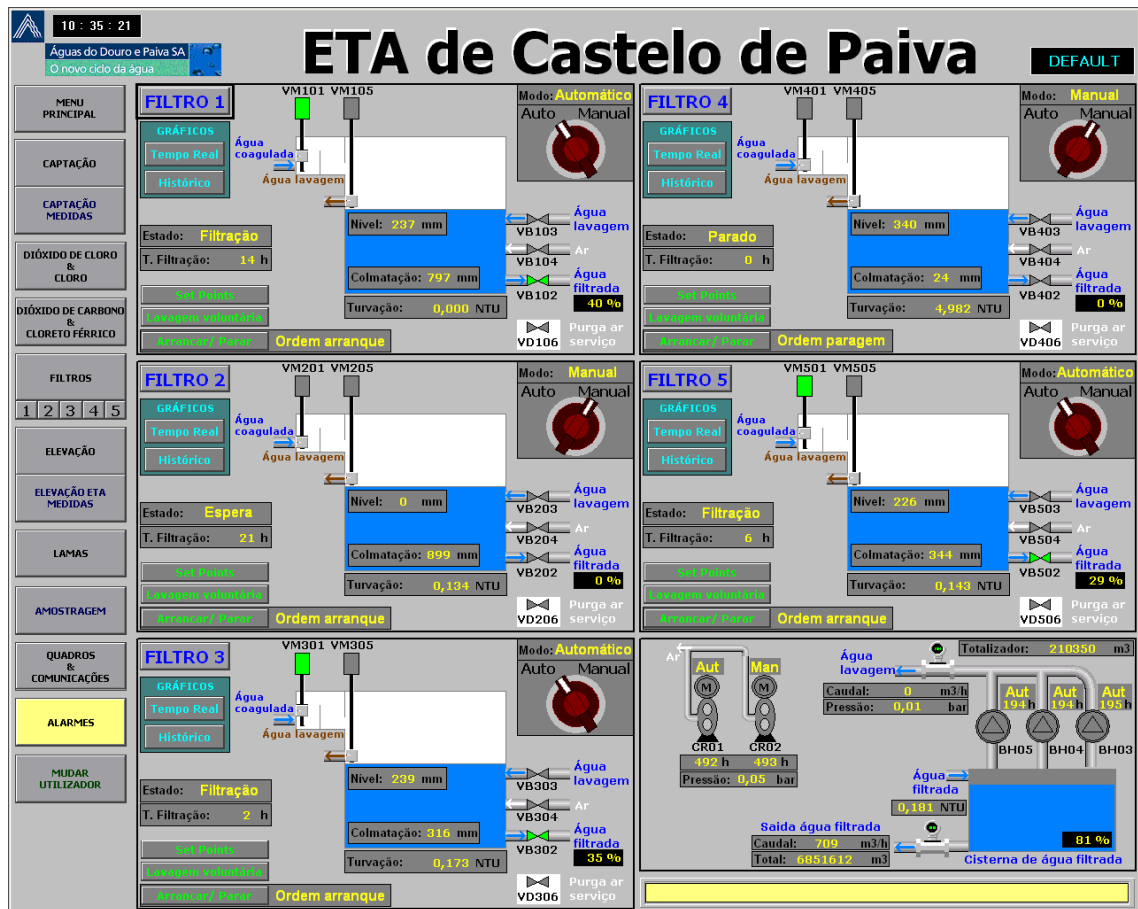


Figura A-6 Sinóptico Filtros.

No sinóptico dos filtros é possível operar e visualizar todos os filtros. Os filtros também podem ser operados individualmente, carregando no botão, do filtro desejado. Por cada filtro, existem dois gráficos onde se pode visualizar o valor das variáveis turbuência, tempo de funcionamento, nível, nível de colmatação, pressão da água de lavagem e caudal da água e lavagem. Um dos gráficos é de histórico possibilitando pesquisa de todo o histórico existente dessas variáveis e o outro mostra apenas as últimas horas.

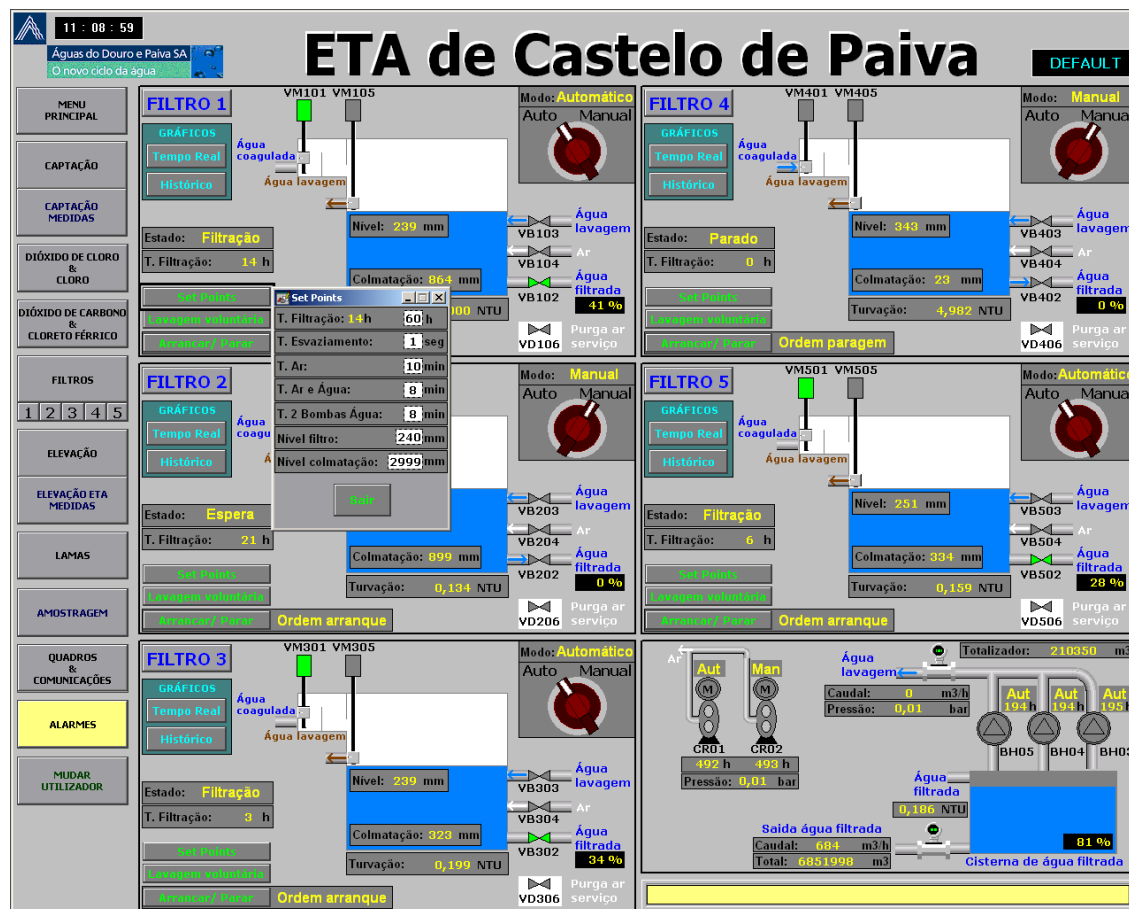


Figura A-7 Sinóptico Filtros – detalhe “Setpoints”.

Note-se que na Figura A-7 carregando no botão “Setpoints” parece um “display” onde é possível alterar os tempos de lavagem dos filtros. Para operar com os filtros em manual, passa-se o filtro para manual no botão rotativo castanho, e em seguida abre-se e fecha-se as válvulas, clicando em cima das mesmas (aparece um “display” com botões para abrir e fechar).

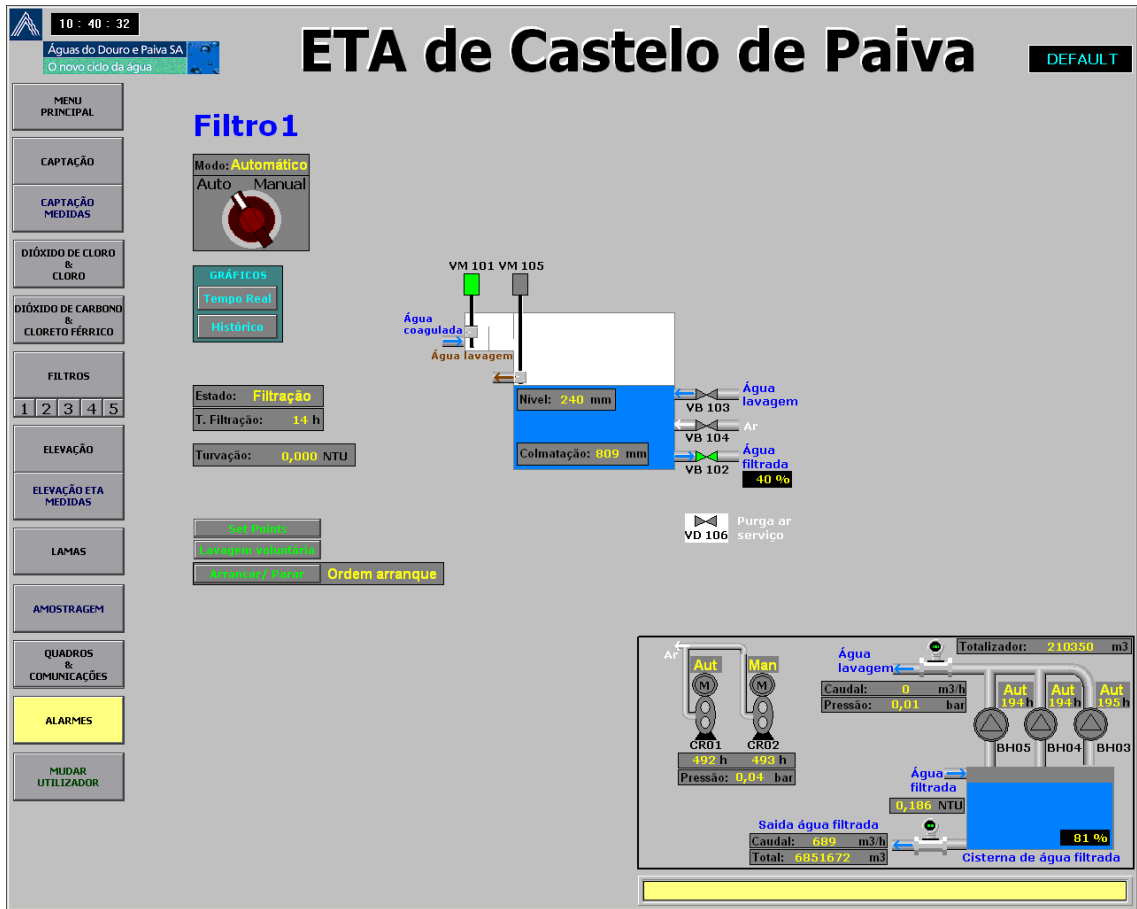


Figura A-8 Sinóptico Filtro 1.

Como no exemplo da Figura A-8, os filtros podem ser operados individualmente, sendo o modo de funcionamento igual ao do sinóptico Filtros.

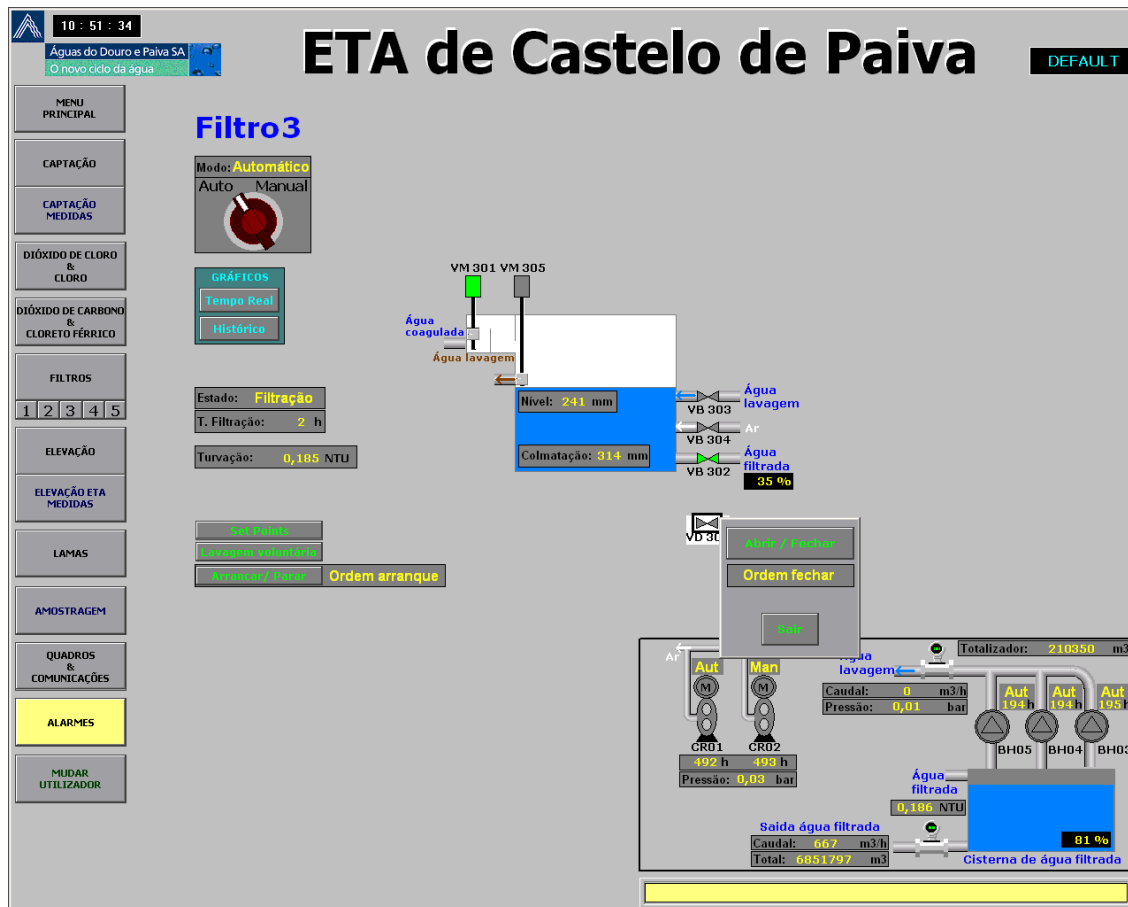


Figura A-9 Sinóptico Filtro 3 – detalhe válvula VD306.

Na Figura A-9, pode-se ver o “display” para abertura e fecho das válvulas.

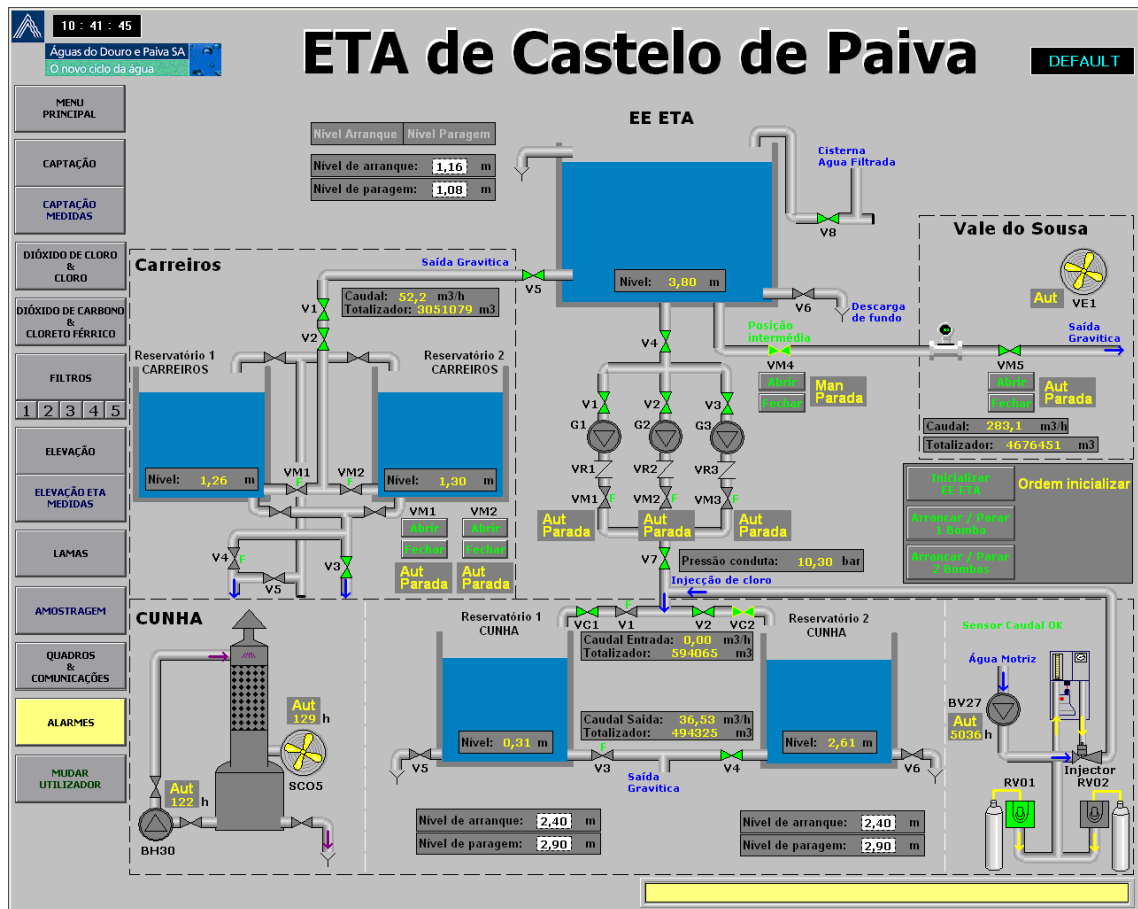


Figura A-10 Sinóptico Elevação.

Neste sinóptico pode-se monitorizar e operar com todos os autómatos que tratam da elevação de água tratada: “Elevação”, “Carreiros” e “Cunha”.



Figura A-11 Sinóptico Elevação ETA Medidas.

Neste sinóptico visualizam-se: tensões, correntes, potências, etc., dos quadros eléctricos da elevatória da ETA. Também se visualiza a informação de cada um dos três grupos.

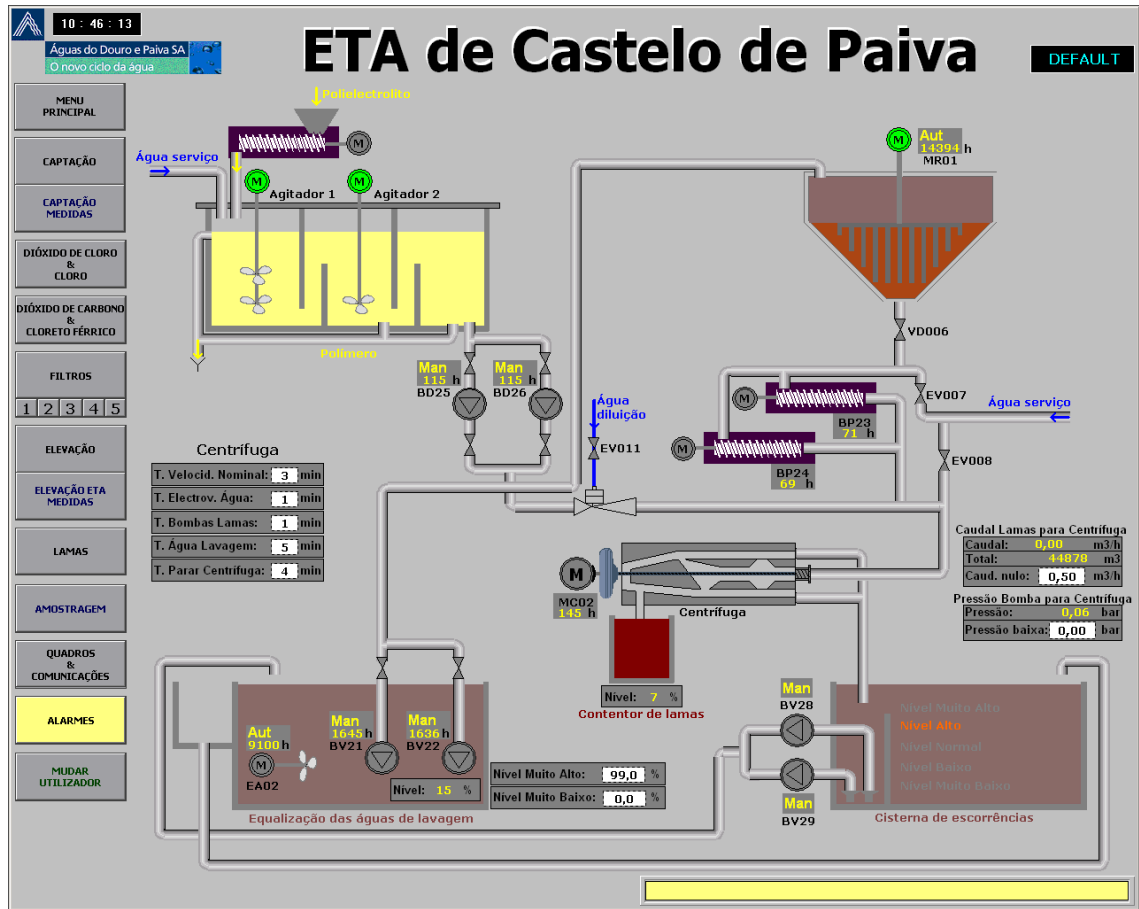


Figura A-12 Sinóptico Lamas.

No sinóptico da Figura A-12, visualiza-se e opera-se o processo de tratamento de lamas.

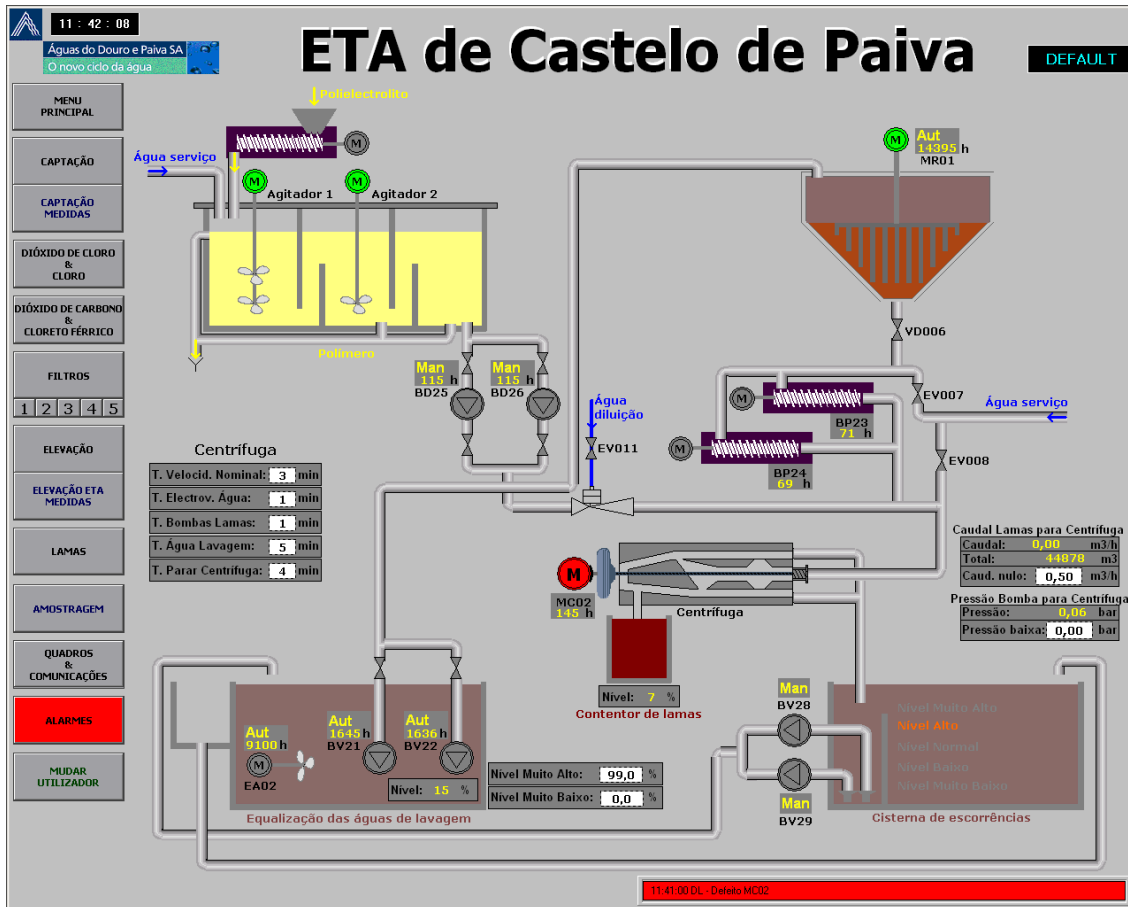


Figura A-13 Sinóptico Lamas – detalhe alarme.

Na Figura A-13, pode-se observar a indicação dada por uma situação de defeito no motor da centrífuga.



Figura A-14 Sinóptico Amostragem.

Este sinóptico contém todas as variáveis analógicas provenientes dos analisadores “on-line” existentes no processo de tratamento de água desta ETA.

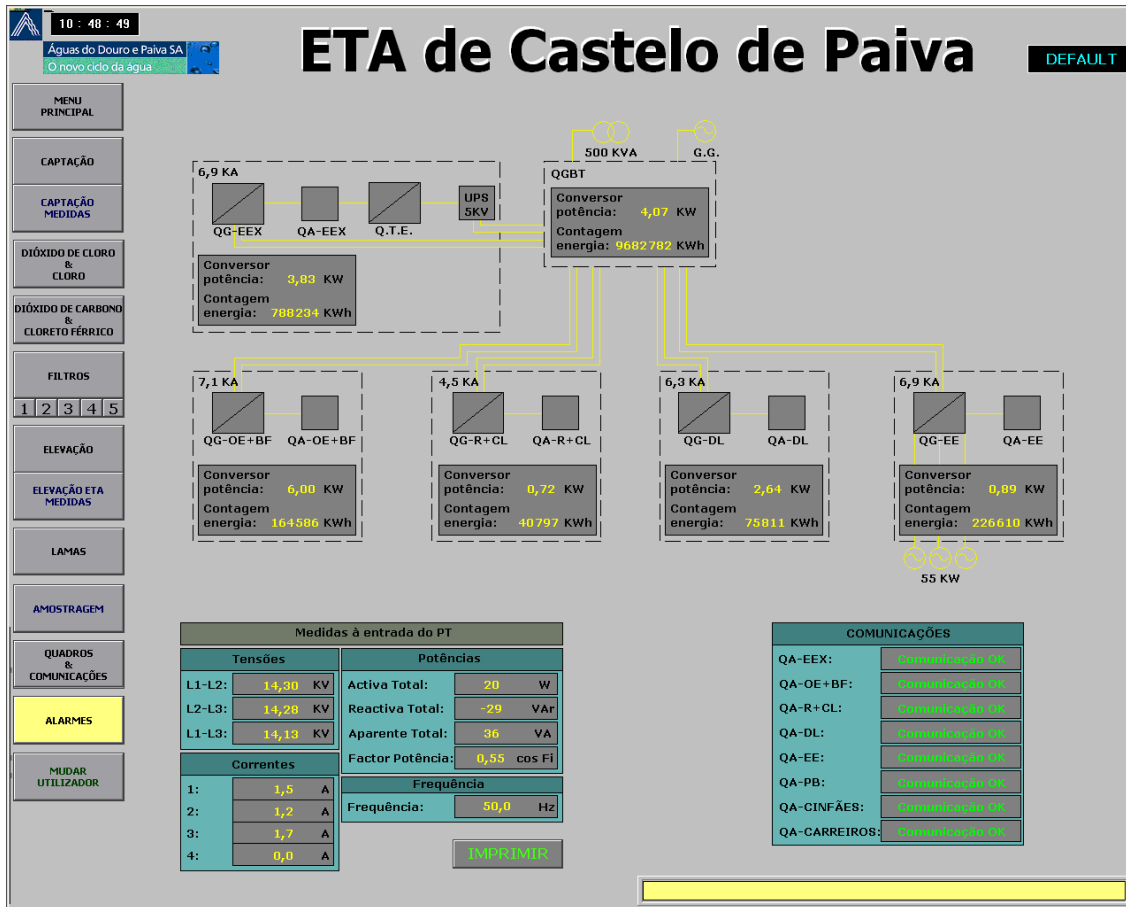


Figura A-15 Sinóptico Quadros e Comunicações.

Este sinóptico contém a informação disponível dos quadros eléctricos da ETA e também o estado de comunicação entre cada um dos autómatos e o autómato principal.

**ETA de Castelo de Paiva** [DEFAULT]

10 : 49 : 54  
Águas do Douro e Paiva SA  
O novo ciclo da água

**ALARMES**

Severidade de Alarme	Data de Alarme	Hora de Alarme	Variável (Tag)	Valor da Tag	Data Recon.	Hora Recon.	Descrição do Alarme
2	23-07-2004	10:12:32	PBISS2FUNC	1	23-07-2004	10:12:39	PB - Grupo 2 em funcionamento
1	23-07-2004	10:12:31	CVALARMES\SL02	1	23-07-2004	10:12:39	CUN - Nível baixo reservatório 1
1	23-07-2004	10:12:31	DLVALARMES\SL_20	1	23-07-2004	10:12:39	DL - Nível baixo bacia retenção água lavagem
1	23-07-2004	10:12:31	OE_BFVALARMES\SH11	1	23-07-2004	10:12:39	OE_BF - Interruptor nível alto sistema água filtrada
1	23-07-2004	10:12:31	OE_BFVALARMES\SL02	1	23-07-2004	10:12:39	OE_BF - Interruptor nível baixo filtro 2
1	23-07-2004	10:12:31	POPERNIVEL_CNF_R1_MIN	1	23-07-2004	10:12:39	Nível Reservatório 1 Cintões inferior ao mínimo especificado pelo POPER
1	23-07-2004	10:12:31	R_CLVALARMES\DEF_N_L1T07	1	23-07-2004	10:12:39	R_CL - Defeito medidor de nível tanque soda (LT07)
1	23-07-2004	10:12:31	R_CLVALARMES\SH09	1	23-07-2004	10:12:39	R_CL - Interruptor nível alto tanque soda
2	23-07-2004	10:12:31	DLBP23EMER	1	23-07-2004	10:12:39	DL - Emergência BP23

Items no Sumário: 9      Não Reconhecidos: Alm: 0, Sup: 0

Reconhecer Todos    Reset Defeitos EEX    Reset Defeitos PB    Reset Defeitos OE+BF    Reset Defeitos R+CL    Reset Defeitos EE    Reset Defeitos CARREIROS    Reset Defeitos DL    SAIR

Lista de Alarmes      Reset Defeitos CUNHA

Figura A-16 Sinóptico Alarmes.

Este sinóptico contém data, hora e descrição dos alarmes activos e também data e hora de reconhecimento do respectivo alarme.

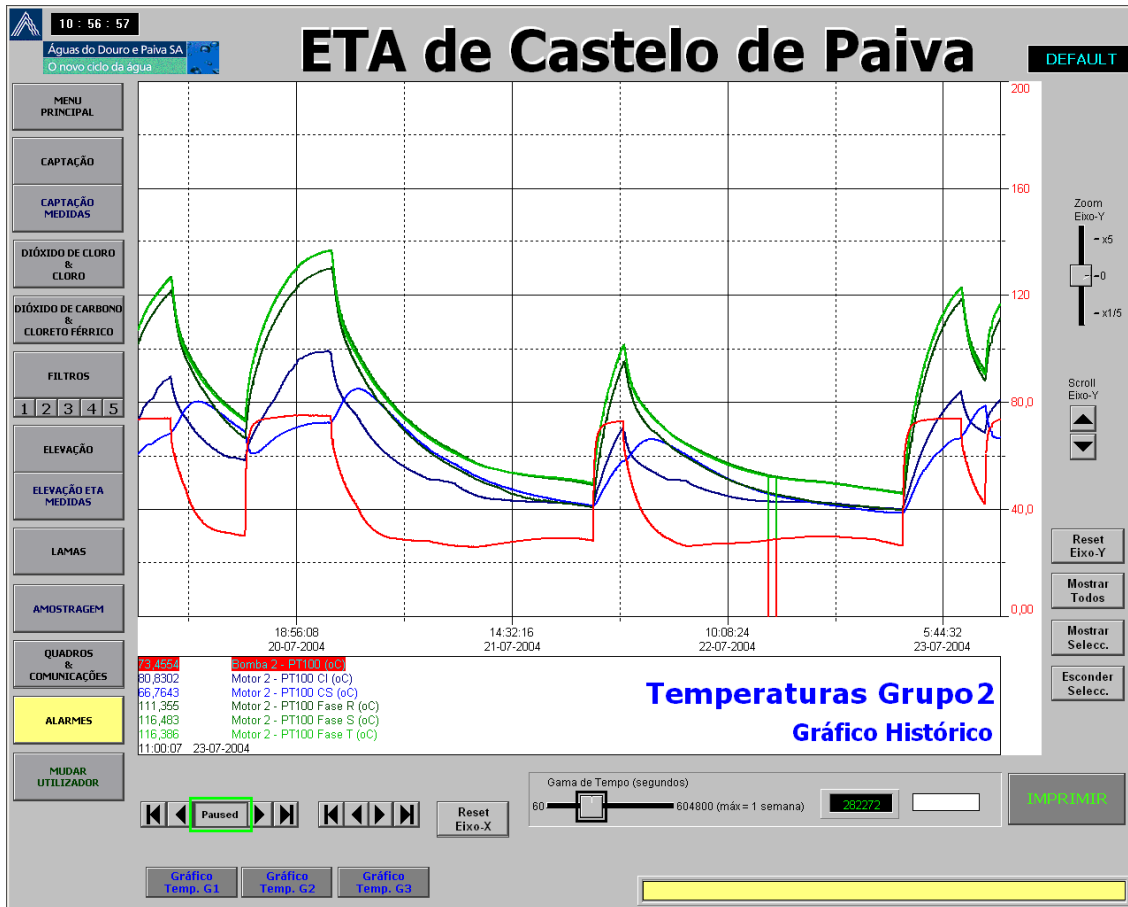


Figura A-17 Gráfico Temperaturas Grupo 2.

A título de exemplo apresenta-se o gráfico de temperaturas do grupo 2. É possível ver os restantes carregando nos botões respectivos (em baixo, do lado esquerdo). Também é possível imprimir estes gráficos (botão em baixo, do lado direito).

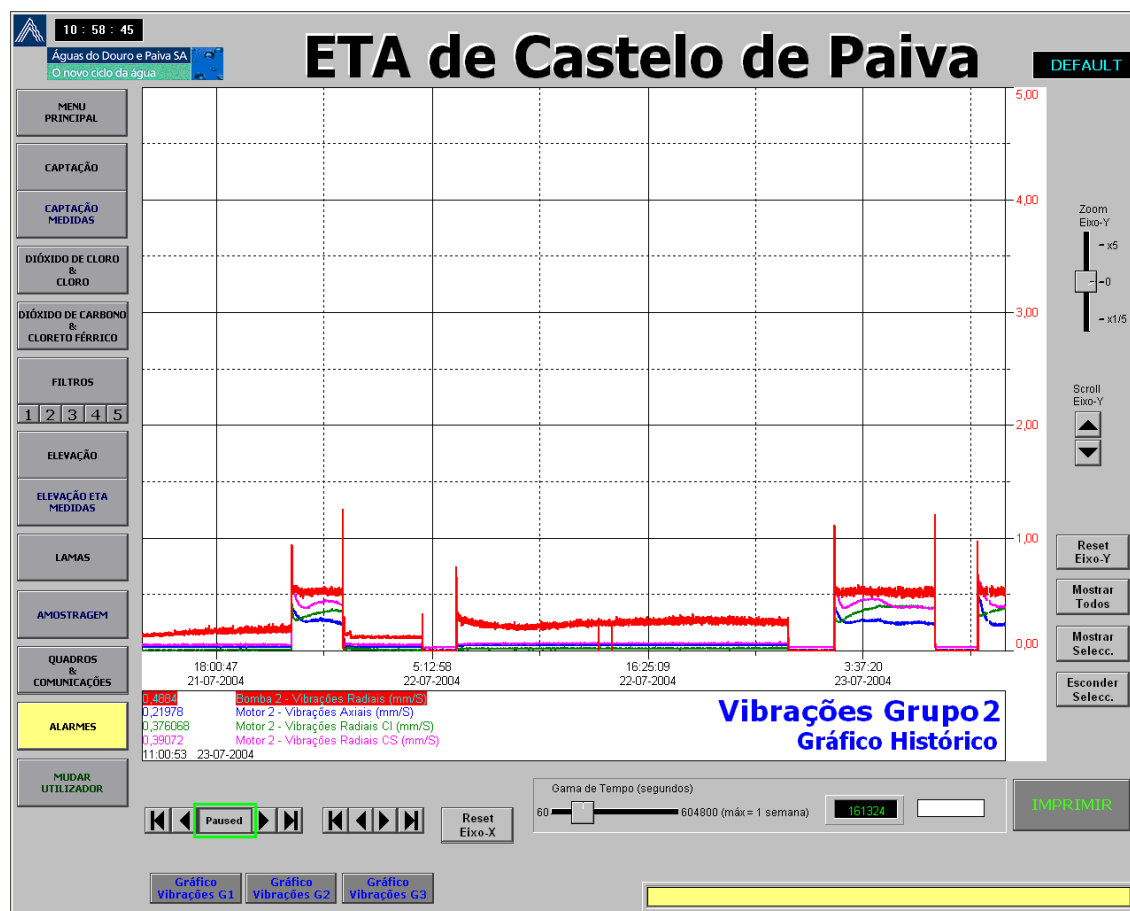


Figura A-18 Sinóptico Gráfico Vibrações Grupo 2.

Tal como para as temperaturas, também existem gráficos de vibrações dos grupos da Captação.



## **Bibliografia**

- [1] Setal Degrémont (2000). Manual de Funcionamento da ETA de Castelo de Paiva. Manual disponível no Sistema de Gestão Integrado da Empresa Águas do Douro e Paiva.
- [2] Allen Bradley (2003). DH-485, [<http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/214372/1535907/index.html>].
- [3] Allen Bradley (2003). DH+, [<http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/214372/1491278/index.html>].
- [4] Allen Bradley (2001, Janeiro). SLC 500 Programmable Controllers & IO Modules. Retirado em 2003 do site [<http://www.ab.com/manuals/cp/1747-so001b-en-p.pdf>].
- [5] Allen Bradley (2003). SLC500 – Software de Programação, [<http://www.ab.com/plclogic/slc/programming.html>].
- [6] Allen Bradley (2003). SLC500 – Especificações, [<http://www.ab.com/plclogic/slc/standards.html>].
- [7] Allen Bradley (2003). Ethernet, [<http://www.ab.com/networks/ethernet.html>].
- [8] Rockwell Automation (2003). RSView32, [<http://www.software.rockwell.com/rsvview32/>].
- [9] Ogata, Katsuhiko (1993). Engenharia de Controle Moderno, Prentice Hall.
- [10] Zeta-Meter (1998). Potencial Zeta: Un Curso Completo en 5 Minutos, Zeta-Meter Inc. Retirado em 2003 do site [<http://www.zeta-meter.com/zm3.html>].

- [11] Ljung, Lennart (1999). System Identification Theory for the User, Prentice Hall PTR.
- [12] Moreira, A. Paulo G. M., Costa, Paulo J. G., Lopes dos Santos, Paulo J. (2002, Novembro). Introdução à Identificação de Modelos Discretos para Sistemas Dinâmicos, Sebenta FEUP.
- [13] Schoukens, J., Pintelon, R. (1991). Identification of Linear Systems, Pergamon Press.
- [14] Martins de Carvalho, J. L. (2000). Sistemas de Controle Automático, LTC.
- [15] Vaccaro, Richard J. (1995). Digital Control A State-Space Approach, McGraw-Hill.
- [16] Neuman, C. P., Baradello, C. S. (1979, Dezembro). Digital Transfer Functions for Microcomputer Control, IEEE.
- [17] Feyo de Azevedo, S., Oliveira, F., Cardoso, A. Capelo (1994). TEACON – a Simulator for computer – Aided Teaching of Process Control, John Wiley & Sons.
- [18] Tavakoli, Saeed, Tavakoli, Mahdi (2003). Optimal Tuning of PID Controllers for First Order Plus Time Delay Models Using Dimensional Analysis, IEEE. Retirado em 2004 do site [<http://publish-uwo.ca/~tavakoli/ICCA03-2.pdf>].
- [19] William, C. Capítulo III. Sintonización de Controladores PID. Retirado em 2004 do site [<http://prof.usb.ve/williamc/PID/Pid.html>].
- [20] Widener. Methods for Tuning PID Controllers. Retirado em 2004 do site [<http://quantum.soe.widener.edu:280/Tuning.doc>].

[21] ABB (2003). [<http://www.abb.com/global/abbzh/abbzh251.nsf!OpenDatabase&db=/global/seitp/seitp330.nsf&v=9AAC910019&e=us&m=9F2&c=7034E6F7F36A9DA9C1256D340050373C>].

[22] United States Environmental Protection Agency (1999, Abril). Guidance Manual for Compliance with the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule: Turbidity Provisions, EPA/815/R99/010.

[23] Rockwell Automation (2003). Active Display System, [<http://www.software.rockwell.com/rsview32ads/>].

[24] Dispersion (2003). [<http://www.dispersion.com/pages/products/dt500/dt500.htm>].

[25] Yoval, Luciano Sandoval, Palacios, Leticia Montellano, Soberanis, Martín Piña, Guzmán, Laura Olivia Sánchez. Potencial Zeta como una Herramienta para Determinar la Aglomeración de las Partículas en la Reducción del Volumen del Lodo a Disponer, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

[26] D'Azzo, J. J., Houpis, C. H. (1966). Feedback Control System Analysis & Synthesis, McGraw-Hill.

[27] Astrom, Karl J., Wittenmark, Bjorn (1999). Computer - Controlled Systems Theory and Design, Prentice Hall.