



Estudo da recuperação de condensados para utilização como água de alimentação das caldeiras

JOÃO PEDRO INVERNO PAIVA
Licenciado em Biologia

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química e Biológica.
Área de processos químicos.

Orientador (es):

Doutor José Valério Nascimento Palmeira
Doutor Teodoro José Pereira Trindade

Júri:

Presidente: Doutora Ana Maria G.H Barreiros Joanaz de Melo

Vogais:

Engenheiro João José Vasconcelos de Oliveira Marques
Doutor Rui Manuel Gouveia Filipe
Doutor José Valério Nascimento Palmeira

novembro de 2025

Estudo da recuperação de condensados para utilização como água de alimentação de caldeiras

JOÃO PEDRO INVERNO PAIVA
Licenciado em Biologia

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química e Biológica.
Área de processos químicos.

Orientador (es):

Doutor José Valério Nascimento Palmeira
Doutor Teodoro José Pereira Trindade

Júri:

Presidente: Doutora Ana Maria G.H Barreiros Joanaz de Melo
Vogais:

Engenheiro João José Vasconcelos de Oliveira Marques
Doutor Rui Manuel Gouveia Filipe
Doutor José Valério Nascimento Palmeira

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha sincera gratidão à Adubos de Portugal (ADP Fertilizantes) pela oportunidade de integrar as suas instalações e pelos recursos disponibilizados para a realização deste trabalho final de mestrado. Foram 8 meses altamente gratificantes e que contribuíram para o meu desenvolvimento tanto profissional como pessoal.

Agradeço, igualmente, à equipa do Departamento Técnico pelo acolhimento. Um agradecimento especial é destinado ao Eng. Oliveira Marques, responsável pelo Gabinete Técnico, pela constante disponibilidade, partilha de conhecimentos, pela confiança depositada e, acima de tudo, pela amizade.

Ao meu colega do Gabinete técnico, Gonçalo, que me acolheu desde o primeiro dia, agradeço pela sua generosidade, partilha de conhecimentos e, sobretudo, pela sua boa disposição e amizade. Estendo o meu reconhecimento ao Fábio, que, mesmo tendo colaborado por um curto período, fez a diferença com a sua atitude positiva e espírito de camaradagem. Gostaria ainda de agradecer ao responsável pelas utilidades da ADP, Eng. Miguel Ribeiro, e ao Eng. Alexandre Dias, pela extrema disponibilidade e prontidão em esclarecer as diversas questões que surgiram ao longo deste percurso.

Virando agora a minha atenção para o ISEL, expresso a minha gratidão aos meus orientadores, os Professores José Valério N. Palmeira e Teodoro José Pereira Trindade, pelas críticas construtivas e pelo tempo dedicado ao longo de todo o processo. Aos meus colegas Raul, José e Filipa, deixo um agradecimento especial. Foram incontáveis as horas partilhadas entre trabalhos, sessões de estudo e conversas que ajudaram a manter o ânimo. A vossa amizade, companheirismo e apoio constante tornaram esta jornada muito mais memorável. A realização deste curso não teria sido a mesma sem vocês.

Por fim, agradeço aos meus pais, Cristina e António, ao meu irmão Ricardo e aos meus avós Rosa e Sabino, pelo carinho, dedicação, e constante motivação. Mostraram-me, com o seu exemplo, que com trabalho e perseverança tudo é possível.

“Obrigado aos que acreditaram, quando duvidei, e, especialmente, aos que duvidaram, quando eu acreditei.” – João Paiva

Declaração de integridade

Declaro que esta(e) dissertação / trabalho de projeto / relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor



Lisboa, 24. de Setembro. de 2025

Estudo da recuperação de condensados para utilização como água de alimentação de caldeiras

Resumo

Este trabalho avaliou a viabilidade da reintrodução dos condensados como água de alimentação das caldeiras de produção de vapor na unidade da ADP Fertilizantes, em Alverca do Ribatejo. Para tal, foram analisados parâmetros físico-químicos relevantes em amostras recolhidas em diferentes pontos da rede de condensados e realizadas monitorizações de caudal, de forma a caracterizar a qualidade e a quantidade disponível.

Foi ainda elaborado, pela primeira vez, um esquema da rede de condensados, permitindo compreender melhor os fluxos internos e identificar limitações associadas à falta de instrumentação. Apesar do esforço metodológico, os resultados não permitiram uma avaliação conclusiva. Foram detetadas incoerências nos dados laboratoriais e dificuldades nas medições de caudal, comprometendo a representatividade e a fiabilidade dos resultados.

Face a estas limitações, concluiu-se que a utilização direta dos condensados como água de alimentação não é recomendada. Em alternativa, sugere-se a sua integração nos sistemas de purificação já existentes, como a osmose inversa.

O trabalho contribuiu para melhorar o conhecimento interno da rede, identificar falhas operacionais e propor medidas de otimização, com impacto positivo na eficiência energética e económica. Recomenda-se, para investigações futuras, o reforço da instrumentação, a melhoria do isolamento de tubagens, maior rigor na recolha e análise de amostras e a otimização do circuito de condensados.

Palavras-chave: Condensados industriais, Água de alimentação de caldeiras, Parâmetros físico-químicos, Monitorização de caudais

Study of condensate recovery for use as boiler feed water

Abstract

This study assessed the feasibility of reintroducing condensates as feed water for steam production boilers at the ADP Fertilizantes plant in Alverca do Ribatejo. To this end, relevant physical and chemical parameters were analysed in samples collected at different points in the condensate network and flow monitoring was carried out in order to characterise the quality and quantity available.

A diagram of the condensate network was also drawn up for the first time, allowing for a better understanding of internal flows and identifying limitations associated with the lack of instrumentation. Despite the methodological effort, the results did not allow for a conclusive assessment. Inconsistencies in laboratory data and difficulties in flow measurements were detected, compromising the representativeness and reliability of the results.

Given these limitations, it was concluded that the direct use of condensates as feed water is not recommended. Alternatively, their integration into existing purification systems, such as reverse osmosis, is suggested.

The work contributed to improving internal knowledge of the network, identifying operational failures and proposing optimisation measures, with a positive impact on energy and economic efficiency. For future research, it is recommended to reinforce instrumentation, improve pipe insulation, increase rigour in sample collection and analysis, and optimise the condensate circuit.

Keywords: Industrial condensates, Boiler feed water, Physical-chemical parameters, Flow monitoring

Lista de Símbolos e de siglas

Siglas

FAO Food and Agriculture Organization

OECD Organisation for Economic Co-operation and Development

PEPAC Plano Estratégico da Política Agrícola Comum para Portugal

CUF Companhia União Fabril

ADP Adubos de Portugal

SAPEC Société Anonyme de Produits et Engrais

IEA International Energy Agency

UFAA Unidade Fabril de Adubos de Alverca

IST Instituto Superior Técnico

SMAS Serviços Municipalizados de Água e Saneamento

VFX Vila Franca de Xira

CEDI Central de Eletrodesionização

PPM Partes por Milhão

P&ID Piping and Instrumentation Diagram

EPI Equipamento de Proteção Individual

Índice

1	FERTILIZANTES E SEGURANÇA ALIMENTAR	1
1.1	PROCESSOS QUÍMICOS E SUSTENTABILIDADE.....	3
1.2	INDÚSTRIA E CONSUMO ENERGÉTICO	4
1.3	SISTEMAS DE VAPOR NA INDÚSTRIA.....	5
1.4	RECUPERAÇÃO DE CONDENSADOS.....	6
1.5	OBJETIVO	7
1.6	MOTIVAÇÃO	8
1.7	ESTRUTURA DA TESE	8
2	RECURSOS HÍDRICOS INDUSTRIAIS	9
2.1	SISTEMAS DE ÁGUA NA UFAA	9
2.2	SISTEMA 1: ÁGUA DE CAPTAÇÃO	10
2.3	SISTEMA 2: ÁGUA POTÁVEL.....	15
2.4	SISTEMA 3: ÁGUA OSMOTIZADA.....	16
2.5	SISTEMA 4: ÁGUA DESMINERALIZADA	19
2.5.1	Resinas de troca iónica	19
2.5.2	Segunda unidade de osmose inversa.....	22
2.6	SISTEMA 5: ÁGUA DA REDE DE INCÊNDIOS	24
2.7	SISTEMA 6: ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO.....	24
2.7.1	Segundo circuito de água de refrigeração	24
2.7.2	Quarto circuito de água de refrigeração.....	26
2.7.3	Oitavo circuito de água de refrigeração.....	28
3	PRODUÇÃO DE VAPOR.....	31
4	RECUPERAÇÃO DE CONDENSADOS	37
5	METODOLOGIAS	40
5.1	ABORDAGEM	40
5.2	AMOSTRAGEM	45
5.3	MEDIÇÕES DE CAUDAL.....	46
6	RESULTADOS	48
6.1	REDE DE CONDENSADOS.....	49
6.2	PRIMEIRA RECOLHA	52
6.3	SEGUNDA RECOLHA	55
6.4	TERCEIRA RECOLHA.....	59
6.5	MEDIÇÕES DE CAUDAL	63
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67

7.1	OPORTUNIDADES DE MELHORIA.....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

Índice de figuras

FIGURA 1 – DUREZA TOTAL E CONDUTIVIDADE.....	14
FIGURA 2 - CLORETOS E SÓDIO.....	14
FIGURA 3 - PH E ALCALINIDADE TOTAL.....	15
FIGURA 4 - SÍLICA E SULFATOS.....	15
FIGURA 5 - PRIMEIRA UNIDADE DE OSMOSE INVERSA DA UFAA.....	16
FIGURA 6 - OBTENÇÃO DE ÁGUA OSMOTIZADA.....	18
FIGURA 7 - SISTEMA DE RESINAS DE TROCA IÓNICA PRESENTE NA UFAA.....	19
FIGURA 8 - ESQUEMA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE RESINAS DE TROCA IÓNICA PRESENTE NA UFAA [32].....	20
FIGURA 9 - OBTENÇÃO DE ÁGUA DESMINERALIZADA.....	23
FIGURA 10 - SEGUNDO CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO.....	25
FIGURA 11 - QUARTO CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO.....	27
FIGURA 12 - OITAVO CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO.....	29
FIGURA 13 - CALDEIRA FLAMOTUBULAR PRESENTE NA CENTRAL DE VAPOR DA ADP FERTILIZANTES.....	32
FIGURA 14 - REDE DE VAPOR DA UFAA.....	35
FIGURA 15 – ENTRADAS E SAÍDAS DO TANQUE DE CONDENSADOS.....	38
FIGURA 16 – TANQUE A-060B.....	39
FIGURA 17 - HACH MODELO 2100N [57].....	44
FIGURA 18 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TURBIDÍMETRO [58].....	45
FIGURA 19 - CAUDALIMETRO EXTERNO ULTRASSÓNICO HÍBRIDO DA DYNASONICS [61].....	46
FIGURA 20 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO POR TEMPO DE TRANSITO [60].....	47
FIGURA 21 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO POR EFEITO DOPPLER [60].....	48
FIGURA 22 - REDE DE RECOLHA E DISTRIBUIÇÃO DE CONDENSADOS.....	50
FIGURA 23 - VALORES DOS COMPOSTOS DISSOLVIDOS NA AMOSTRA A-060B.....	53
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO ENTRE A PRIMEIRA E SEGUNDA AMOSTRAGEM DO TANQUE A-060B.....	57
FIGURA 25 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TRÊS RECOLHAS DO TANQUE A-060B.....	62
FIGURA 26 – MEDIÇÃO DE CAUDAIS NOS DIVERSOS PONTOS.....	64
FIGURA 27 - PERCURSO DOS CONDENSADOS.....	76
FIGURA 28 - FLUXO DE CONDENSADOS PROPOSTO E ATUALMENTE EM VIGOR NA ADP FERTILIZANTES.....	79
FIGURA 29 – COMPARAÇÃO ANTES E DEPOIS DA ALTERAÇÃO.....	81
FIGURA 30 - FLUXO DE CONDENSADOS PARA REINTEGRAÇÃO NA UNIDADE DE ÁCIDO NÍTRICO.....	83

Índice de tabelas

TABELA 1 - PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA CAPTADA.	11
TABELA 2 - VALORES MÉDIOS OBTIDOS PARA CADA FURO DE CAPTAÇÃO.	12
TABELA 3 - REQUISITOS DO FABRICANTE RELATIVOS À ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DE CALDEIRAS.	33
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA NO INTERIOR DA CALDEIRA SEGUNDO O FABRICANTE.	33
TABELA 5 - QUALIDADE DA ÁGUA DESMINERALIZADA PRODUZIDA PELA UFAA E DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DE CALDEIRAS APÓS TRATAMENTO.	34
TABELA 6- RESULTADOS DA PRIMEIRA AMOSTRAGEM.	52
TABELA 7 - CONDUTIVIDADE ESPECÍFICA DA PRIMEIRA AMOSTRAGEM.	54
TABELA 8 - RESULTADOS DA SEGUNDA AMOSTRAGEM.	55
TABELA 9 - COMPARAÇÃO ENTRE A PRIMEIRA E SEGUNDA RECOLHA DO TANQUE DE CONDENSADOS A-060B.	56
TABELA 10 - CONDUTIVIDADE ESPECÍFICA DA SEGUNDA AMOSTRAGEM.	58
TABELA 11 - RESULTADOS DA TERCEIRA RECOLHA.	59
TABELA 12 - COMPARAÇÃO ENTRE A TRÊS RECOLHAS DO TANQUE DE CONDENSADOS A-060B.	61
TABELA 13 - CONDUTIVIDADE ESPECÍFICA DA TERCEIRA RECOLHA.	63
TABELA 14 - VALORES MÉDIOS PARA O CONSUMO E PREÇO DE GÁS NATURAL.	81

1 Fertilizantes e Segurança Alimentar

A agricultura contemporânea depende de forma decisiva dos fertilizantes para garantir colheitas estáveis, alimentos de qualidade e segurança nos sistemas alimentares. A FAO sublinha que tanto os fertilizantes minerais como os orgânicos são indispensáveis para suprir as necessidades nutricionais das plantas, sobretudo em solos esgotados ou sujeitos a exploração intensiva [1]. Quando o acesso a estes insumos é desigual ou instável, muitas regiões agrícolas, em particular nos países com menos recursos, enfrentam sérias dificuldades em manter a produção e assegurar a disponibilidade alimentar.

O relatório OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034 reforça esta ideia ao identificar os fertilizantes como um dos principais fatores de custo da agricultura. A volatilidade recente dos preços teve impacto direto nos alimentos, e as simulações apresentadas mostram que uma redução de 20% no fornecimento de fertilizantes sintéticos pode elevar o índice de preços alimentares da FAO entre 6% e 13%, dependendo da duração do choque [2]. Estes resultados evidenciam a centralidade dos fertilizantes nos mercados globais e a urgência de políticas públicas que assegurem o acesso previsível e sustentável a estes insumos.

Para além da produtividade, os fertilizantes influenciam também a qualidade nutricional das culturas. Uma meta-análise publicada na *Agronomy for Sustainable Development* demonstrou que a aplicação adequada pode aumentar em média 11,9% a qualidade nutricional dos alimentos vegetais, com ganhos em proteínas, minerais como ferro e zinco, vitamina C e outros compostos relevantes [3]. Este efeito é particularmente importante num contexto global marcado pela coexistência entre insegurança alimentar e deficiências nutricionais.

Em Portugal, a indústria de fertilizantes tem uma relevância estratégica pela sua ligação direta à competitividade agrícola e à segurança alimentar. Contudo, a forte dependência de matérias-primas importadas, como fosfato e amoníaco, torna o setor vulnerável a choques externos, como a crise energética e a guerra na Ucrânia, que expuseram a fragilidade das cadeias de abastecimento [4], [5]. Para além da dimensão económica, trata-se também de uma questão política e social. Portugal tem defendido, no seio da União Europeia, a necessidade de uma estratégia integrada que assegure o acesso sustentável a fertilizantes, conciliando a competitividade agrícola com os objetivos ambientais do Pacto Ecológico Europeu e da estratégia Farm to Fork [6], [7]. Neste enquadramento, o PEPAC (Plano Estratégico da Política Agrícola Comum) surge como instrumento essencial para apoiar práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, reforçando a resiliência do setor [8].

Neste contexto, é igualmente importante compreender o papel das empresas nacionais que operam neste mercado, entre as quais se destaca a ADP Fertilizantes, pela sua relevância histórica e estratégica. Sediada em Alverca do Ribatejo, a empresa tem raízes na antiga Companhia União Fabril (CUF), fundada por Alfredo da Silva no final do século XIX, num período de modernização agrícola e industrial [9]. Ao longo do século XX, o setor atravessou várias fases: a criação da Nitratos de Portugal em 1957, a nacionalização e posterior privatização das empresas químicas, e a constituição da Quimigal em 1977, mais tarde integrada no grupo SAPEC [9]. Em 1999, o grupo José de Mello assumiu o controlo acionista, até à aquisição pela Fertiberia em 2009, atualmente pertencente ao fundo Triton [10].

Atualmente, o grupo Fertiberia detém em Portugal três unidades fabris, Alverca, Lavradio e Setúbal — cuja capacidade conjunta ultrapassa um milhão de toneladas anuais [10]. Entre estas, a unidade de Alverca distingue-se pela diversidade da sua produção, que abrange desde os adubos clássicos com macronutrientes essenciais até formulações compostas, fertilizantes líquidos, foliares e produtos industriais [10]. Esta realidade resulta de um processo contínuo de modernização tecnológica e de reorganização empresarial, que acompanhou as transformações do setor em Portugal e consolidou a posição da ADP Fertilizantes como referência nacional e ator relevante no mercado internacional.

1.1 Processos Químicos e Sustentabilidade

A indústria de fertilizantes caracteriza-se pela complexidade e exigência dos seus processos químicos. Um exemplo emblemático é a produção de ácido nítrico, composto essencial para fertilizantes nitrogenados, que decorre em condições severas de temperatura e pressão e com recurso a catalisadores específicos. O processo mais utilizado é o método de Ostwald, no qual amoníaco e oxigénio reagem em presença de uma liga de platina-ródio, a temperaturas entre 750 e 900 °C e pressões de 1 a 4 bar, originando monóxido de azoto. Este é subsequentemente oxidado a dióxido de azoto e conduzido às torres de absorção, onde a água promove a formação de ácido nítrico e ácido nitroso. Parte destes subprodutos é reciclada, aumentando a eficiência global do processo [11], [12]

A intensidade destas reações químicas tem, contudo, consequências ambientais relevantes. Durante a oxidação catalítica da amónia e noutras etapas de síntese, libertam-se óxidos de azoto (NOX) e óxido nitroso (N₂O), gases com impacto direto na qualidade do ar e reconhecido efeito de aquecimento global, razão pela qual estão sujeitos a regulamentação europeia rigorosa [13], [14], [15]. Outro desafio prende-se com o uso intensivo de água. A produção de ácidos e soluções fertilizantes requer grandes volumes para gerar vapor, essencial ao fornecimento de energia térmica no processo de Ostwald, bem como para arrefecimento, lavagem de gases e dissolução de compostos. A gestão eficiente deste recurso é, por isso, determinante para reduzir pressões sobre os ecossistemas e assegurar a sustentabilidade operacional [16].

A questão dos efluentes líquidos é igualmente crítica. Estes podem conter nitratos, fosfatos e outros compostos azotados que, sem tratamento adequado, representam risco de eutrofização dos meios aquáticos [17], [18]. Para mitigar estes impactos, a indústria tem investido em tecnologias de tratamento avançado e em práticas de economia circular, procurando recuperar nutrientes e reduzir perdas.

Entre as soluções adotadas destacam-se: a recuperação de calor das reações exotérmicas, como a do ácido nítrico, para gerar vapor de processo e eletricidade, reduzindo consumos externos [19]. O controlo de emissões através de tecnologias catalíticas, como a redução seletiva de NOX e o abatimento de N₂O em plantas de ácido nítrico, que aumentam simultaneamente o rendimento e a qualidade do produto [12], e a recirculação de águas de arrefecimento e de lavagem de gases, que fecha ciclos de água e nutrientes e melhora a eficiência hídrica [12].

1.2 Indústria e Consumo Energético

De acordo com o Relatório de Energia 2025 da Agência Internacional de Energia (IEA), a indústria mantém-se como o maior consumidor de energia a nível mundial. Em 2024, o consumo global aumentou 2,2%, com a indústria a assumir um papel central nesse crescimento, sobretudo devido ao dinamismo das economias emergentes, como a China e a Índia. O gás natural destacou-se como o combustível fóssil de maior expansão, registando uma subida de 2,7% e atingindo um novo máximo histórico. Este aumento foi particularmente expressivo na Ásia, mas também se verificou nos Estados Unidos e na União Europeia, associado sobretudo ao uso industrial e às necessidades de calor de processo [20].

Paralelamente, a eletricidade consolidou-se como eixo fundamental da transição energética: a procura mundial cresceu 4,3% num único ano, o maior salto registado fora de períodos de recuperação pós-crise. Este avanço foi impulsionado pela eletrificação de processos industriais, pela expansão dos setores digitais e pela maior utilização de equipamentos elétricos em fábricas. No conjunto, o panorama revela uma indústria cada vez mais dependente do gás natural para garantir estabilidade e da eletricidade para sustentar inovação e eficiência, refletindo tanto pressões imediatas de procura como transformações estruturais no sistema energético global [20].

No contexto europeu, a União Europeia definiu metas ambiciosas para 2030: reduzir em pelo menos 55% as emissões de gases com efeito de estufa face a 1990, diminuir em 11,7% o consumo de energia final e assegurar que 42,5% do consumo energético provenha de fontes renováveis, com a ambição de alcançar 45%. Estas metas enquadram-se no objetivo de neutralidade climática até 2050 e foram reforçadas em 2025 com o lançamento do Acelerador da Descarbonização Industrial, que procura apoiar setores intensivos em energia através de medidas como o acesso a energia a preços competitivos, o reforço de contratos de aquisição de eletricidade renovável, a agilização do licenciamento de projetos e a promoção de mercados globais para produtos industriais de baixo carbono [21].

Em Portugal, estas orientações são concretizadas no Plano de Recuperação e Resiliência, através da Componente de Descarbonização da Indústria, que apoia a eletrificação de processos, a eficiência energética e a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis.

O documento sublinha ainda a elevada dependência energética nacional, marcada pela importação de combustíveis fósseis, o que torna a transição para uma indústria mais eficiente e menos intensiva em carbono não apenas uma exigência climática, mas também uma prioridade estratégica para reduzir vulnerabilidades externas e reforçar a competitividade [22], [23].

1.3 Sistemas de Vapor na Indústria

Nas unidades industriais, o vapor é a principal forma de fornecimento de energia térmica. A sua utilização em vez de outros fluidos deve-se ao facto de transportar grandes quantidades de energia de forma segura, económica e facilmente controlável, ao contrário de alternativas mais dispendiosas ou perigosas, como os óleos térmicos. A elevada entalpia de vaporização, a relação direta entre pressão e temperatura e a possibilidade de recuperar os condensados tornam o vapor praticamente insubstituível em processos industriais [24].

Contudo, a eficiência destes sistemas depende fortemente das condições de operação, em especial da qualidade da água de alimentação. Como a água nunca é totalmente pura, a presença de sais como cálcio e magnésio pode originar incrustações que reduzem a transferência de calor e aumentam o consumo de combustível. A sílica tende a depositar-se em zonas de alta pressão, afetando até turbinas, enquanto oxigénio e dióxido de carbono dissolvidos aceleram fenómenos de corrosão, enfraquecendo tubagens e geradores de vapor. Sem um tratamento rigoroso, estas impurezas comprometem a eficiência energética, reduzem a vida útil dos equipamentos e aumentam o risco de falhas graves. Por isso, o tratamento da água é condição indispensável para a operação segura e económica dos sistemas de vapor [25]. Entre as tecnologias utilizadas destacam-se a desgaseificação, que remove oxigénio e dióxido de carbono dissolvidos, e a osmose inversa, que força a passagem da água por membranas capazes de reter sólidos suspensos, entre outras soluções [26].

Na indústria de fertilizantes, os sistemas de vapor recorrem sobretudo a caldeiras aquatubulares, pela sua capacidade de gerar grandes volumes em condições de média a alta pressão (20–80 bar) e temperaturas que podem atingir 400–500 °C, essenciais para processos como a síntese de amoníaco, a produção de ácido nítrico ou a secagem de matérias-primas.

Em unidades de menor escala ou como apoio, ainda se utilizam caldeiras flamotubulares, geralmente limitadas a pressões mais baixas (até cerca de 20 bar) e temperaturas próximas dos 220–250 °C, adequadas a consumos menos exigentes. A escolha entre estas tipologias resulta de um equilíbrio entre segurança, eficiência energética e fiabilidade operacional [24], [26].

O papel do vapor estende-se a várias fases do processo produtivo: fornece energia térmica a reatores de síntese (como no amoníaco e no ácido nítrico), é indispensável em operações de granulação e secagem, garantindo a remoção controlada de humidade, e pode ainda ser expandido em turbinas para gerar eletricidade ou acionar compressores. Desta forma, integra-se em sistemas de cogeração, aumentando a eficiência global das unidades industriais [27].

1.4 Recuperação de Condensados

O condensado de vapor é a água resultante da condensação do vapor após este ter transferido o seu calor útil em processos industriais, seja em permutadores, turbinas ou linhas de aquecimento. Apesar de parecer apenas “água quente”, o condensado é na verdade um recurso valioso: é água já tratada, praticamente livre de impurezas, e contém ainda uma quantidade significativa de energia térmica [28].

O potencial térmico e energético dos condensados é elevado. Como mostram estudos clássicos e recentes, a sua reutilização permite reduzir o consumo de combustível nas caldeiras, diminuir a necessidade de água fresca e de químicos de tratamento, e ainda recuperar calor que de outra forma seria desperdiçado [28], [29]. Em sistemas industriais de grande escala, como refinarias, a recuperação de condensados e de vapor flash pode traduzir-se em poupanças anuais de centenas de milhares de euros e reduções expressivas de emissões de CO₂ [30], [31].

Contudo, existem desafios técnicos e operacionais. Em muitos setores, como o químico e o petroquímico, há risco de contaminação do condensado com hidrocarbonetos ou outros compostos, o que leva algumas empresas a rejeitá-lo por receio de danificar as caldeiras [29]. Além disso, a queda de pressão nas linhas de retorno gera vapor flash, que pode causar instabilidade nos purgadores e perdas energéticas se não for devidamente recuperado [31].

Também se identificam problemas de perdas térmicas em tubagens mal isoladas, fugas de vapor, purgas excessivas e operação de caldeiras em condições fora do ponto ótimo [30]. Estes fatores exigem soluções de engenharia, como sistemas de monitorização, manutenção de purgadores, isolamento adequado e tecnologias de recompressão de vapor. Apesar destes obstáculos, a reintegração dos condensados como água de alimentação de caldeiras é não só possível como altamente recomendada.

Já em meados do século XX, trabalhos pioneiros demonstraram que a reutilização de condensados como água de alimentação de caldeiras era tecnicamente viável e trazia vantagens económicas [28]. Estudos posteriores, em contextos industriais mais recentes, confirmaram esse potencial e mostraram que, em muitos casos, o investimento necessário pode ser recuperado em menos de um ano [29], [30], [31]. Assim, a recuperação e reaproveitamento de condensados afirma-se como uma medida eficaz para aumentar a eficiência energética, reduzir custos de operação e diminuir o impacto ambiental. Quando sujeitos a controlo de qualidade e tratamento adequados, estes condensados podem substituir grande parte da água de reposição, permitindo fechar o ciclo do vapor de forma segura e eficiente.

1.5 Objetivo

O objetivo principal desta dissertação é analisar a viabilidade técnica e económica da reintegração de condensados como água de alimentação de caldeiras, de modo a contribuir para a eficiência energética e a sustentabilidade do sistema de produção de vapor. De uma forma mais específica pretende-se:

- ✓ Caracterizar o sistema atual de geração, distribuição e consumo de vapor, identificando os pontos de formação de condensados, sistemas de recolha e de descarte de condensados.
- ✓ Avaliar o impacto da sua recuperação no consumo de água tratada e no consumo de combustível.
- ✓ Propor soluções viáveis para a integração do condensado como água de alimentação de caldeira, caso este esteja com a qualidade exigida pelo processo.
- ✓ Quantificar as potenciais reduções de custos resultantes desta medida.

1.6 Motivação

A realização desta dissertação em contexto industrial, e não apenas académico, resulta da convicção de que a experiência prática acrescenta valor ao percurso formativo. O contacto direto com processos reais permite compreender melhor os desafios do dia a dia, acompanhar soluções adotadas pela indústria e criar ligações profissionais que podem ser relevantes no início da carreira.

A escolha da ADP Fertilizantes justifica-se pelo seu reconhecimento no setor, pelo compromisso com a eficiência e a sustentabilidade, alinhado com as metas europeias de transição energética e economia circular. A proximidade às instalações foi também um fator importante, facilitando visitas, recolha de dados e um acompanhamento mais próximo do estudo.

Este trabalho responde a uma necessidade identificada pela empresa: avaliar a viabilidade da recuperação de condensados no sistema de produção de vapor e o seu impacto técnico e económico. Trata-se de um tema que, além de contribuir para a melhoria dos processos da organização, permite aplicar e aprofundar os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico.

1.7 Estrutura da Tese

Esta tese está dividida em sete capítulos.

- ✓ Capítulo 1 - Apresenta a importância dos fertilizantes, os processos industriais, o papel do vapor e dos condensados, além dos objetivos do estudo e motivação.
- ✓ Capítulo 2 - Descreve os sistemas de água da ADP Fertilizantes.
- ✓ Capítulo 3 – Foca no uso do vapor e na sua rede de distribuição na ADP Fertilizantes.
- ✓ Capítulo 4 – Trata das estratégias de recuperação de condensados usadas pela ADP Fertilizantes e dos equipamentos envolvidos.
- ✓ Capítulo 5 – Explica as metodologias usadas durante o estudo.
- ✓ Capítulo 6 – Mostra os resultados obtidos.
- ✓ Capítulo 7 - Conclusões e sugestões de melhoria.

2 Recursos Hídricos Industriais

Nesta secção apresenta-se a caracterização dos recursos hídricos disponíveis na unidade industrial de adubos de Alverca, com especial atenção aos diferentes tipos de água utilizados ao longo do processo produtivo. A análise contempla a água proveniente de captação subterrânea, bem como a água tratada internamente, destacando os seus usos específicos e os requisitos de qualidade associados. Aborda-se também o sistema de produção de vapor, essencial para diversos circuitos térmicos da instalação, e o sistema de recolha de condensados.

2.1 Sistemas de Água na UFAA

A Unidade Fabril de Adubos de Alverca (UFAA) opera com seis sistemas de água distintos, cada um ajustado às exigências específicas dos seus processos industriais.

- ✓ **Sistema 1:** A água de captação, retirada de furos subterrâneos, é sujeita a tratamento antes da sua utilização.
- ✓ **Sistema 2:** A água potável, fornecida pelos SMAS, destina-se maioritariamente ao consumo humano.
- ✓ **Sistema 3:** A água osmotizada, obtida por osmose inversa, alimenta a central de tratamento de águas e é usada como compensação nos circuitos de refrigeração.
- ✓ **Sistema 4:** A água desmineralizada, de elevada pureza, é aplicada na produção de vapor e na unidade de ácido nítrico.
- ✓ **Sistema 5:** A água da rede de incêndios está reservada para situações de emergência.
- ✓ **Sistema 6:** A água de refrigeração assegura o arrefecimento dos equipamentos essenciais ao processo produtivo.

2.2 Sistema 1: Água de Captação

A água de captação utilizada na UFAA tem origem em furos subterrâneos, sendo a principal fonte de abastecimento hídrico da unidade. Atualmente, encontram-se em operação cinco furos ativos, designados JK-1, JK-2, JK-3, RA-2 e RA-3, a partir dos quais a ADP realiza a extração de água para posterior tratamento e utilização nos processos industriais. Após a extração, a água captada é encaminhada para dois tanques de betão cobertos, designados como tanque de águas brutas (T-506 a/b), cada um com uma capacidade de 2000m³ [32].

Toda a água captada é sujeita a um tratamento com (NaOCl) feito através de uma bomba doseadora. No tanque A, a capacidade máxima da bomba doseadora é de 387 mL/h e a injeção varia entre 48 e 52 mL/h [9]. Já no tanque B, a capacidade máxima da bomba é de 980 mL/h e o doseamento é significativamente superior, atingindo os 931 mL/h [9]. Este tratamento inicial visa garantir a segurança microbiológica da água antes da sua utilização nos processos industriais.

Complementarmente, diariamente é realizada uma análise hidrostática aos furos de captação, com o objetivo de monitorizar os níveis de água subterrânea disponíveis. Esta verificação permite avaliar se a quantidade extraída está em equilíbrio com a capacidade do aquífero, evitando sobre-exploração. Sempre que se deteta um desvio, seja por excesso ou por défice de extração, procede-se ao ajuste necessário, garantindo a sustentabilidade da captação e a continuidade do abastecimento industrial [32], [33].

A monitorização da qualidade da água captada é realizada mensalmente nas instalações da ADP Fertilizantes, com exceção do parâmetro relativo ao azoto nítrico, cuja análise é realizada nos laboratórios do Instituto Superior Técnico (IST), devido à falta de métodos analíticos adequados nos laboratórios da UFAA [9]. Na Tabela 1 é possível verificar os parâmetros físico-químicos considerados mais relevantes para a caracterização da água subterrânea captada na ADP.

Tabela 1 - Parâmetros físico-químicos para a caracterização da água subterrânea captada.

Parâmetro	Descrição
pH	É uma medida que mostra se a água é ácida (<7), neutra (=7) ou alcalina (>7). Ele traduz a quantidade de iões hidrogénio presentes na solução: quanto mais iões, mais ácida; quanto menos, mais alcalina. É um parâmetro essencial porque influencia o equilíbrio químico da água e condiciona fenómenos como corrosão, incrustações ou reações em processos naturais e industriais. [34]
Condutividade elétrica	Mede a capacidade da água de conduzir corrente elétrica, determinada pela presença de sais e iões dissolvidos. É influenciada pela temperatura e pela composição química, funcionando como um indicador rápido da mineralização. Por isso, é amplamente utilizada na avaliação da qualidade da água em contextos ambientais e industriais. [35]
Dureza total	Expressa a concentração de sais de cálcio e magnésio dissolvidos. Este parâmetro é essencial para perceber a tendência da água em formar incrustações em sistemas industriais, bem como a sua agressividade quando em contacto com tubagens e equipamentos. Quanto maior a dureza, maior o risco de depósitos calcários; por outro lado, águas muito macias podem ser corrosivas. [36]
Alcalinidade total	Traduz a capacidade da água neutralizar ácidos, funcionando como um tampão que estabiliza o pH. Está ligada sobretudo à presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, em especial de cálcio e magnésio. Este parâmetro é essencial para avaliar se a água tende a ser corrosiva ou a formar depósitos minerais em tubagens e equipamentos. [37]
Catiões/Aniões	Os principais catiões presentes na água subterrânea, como cálcio, magnésio e sódio, estão associados à dureza, ao grau de salinidade e refletem a geologia do aquífero. Entre os aniões, destacam-se bicarbonatos, cloretos e sulfatos, que contribuem para a alcalinidade e podem ainda indicar fenómenos de contaminação ou intrusão marinha. [37]
Azoto nítrico (NO₃⁻)	Permite avaliar a contaminação da água por fertilizantes, efluentes ou infiltrações urbanas. É um parâmetro essencial no controlo da qualidade de águas subterrâneas, dado o seu impacto ambiental e riscos para a saúde em concentrações elevadas. [38]
Sílica (SiO₂)	Água com sílica contém partículas dissolvidas de dióxido de silício, comuns em águas subterrâneas. Quando usada para gerar vapor, a sílica pode ser arrastada e formar depósitos duros em turbinas e tubagens, reduzindo a eficiência térmica e causando danos mecânicos. Por isso, é essencial controlar este parâmetro em sistemas industriais de vapor para evitar custos elevados e falhas operacionais. [25]

Com base nos parâmetros físico-químicos apresentados na Tabela 1, a Tabela 2 sintetiza os valores médios registados entre janeiro e julho de 2025 para a água subterrânea captada nos furos da UFAA, permitindo avaliar a estabilidade e a conformidade da qualidade da água ao longo do período em análise.

Tabela 2 - Valores médios obtidos para cada furo de captação.

Parâmetro	Unidades	JK-1	JK-2	JK-3	RA-2	RA-3
pH	-	7,4	7,4	7,4	7,1	7,0
Condutividade	µS/cm	1462	850	924	1119	2790
Dureza total	mg/L	324	255	275	432	1070
Alcalinidade total	mg/L	308	295	310	308	236
Cálcio (Ca ²⁺)	mg/L	96	73	75	148	381
Magnésio (Mg ²⁺)	mg/L	17	18	21	15	28
Sódio (Na ⁺)	mg/L	240	115	121	91	198
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	mg/L	362	360	378	375	288
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	174	65	46	94	135
Cloretos (Cl ⁻)	mg/L	251	100	128	159	798
Azoto nítrico (NO ₃ ⁻)	mg/L	2,7	7,6	0,6	29,0	21,0
Sílica (SiO ₂)	mg/L	8	9	10	10	8
Caudal extraído	m ³ /h	6,6	4,0	7,2	4,0	36,0

Com base na análise da variação relativa, verificou-se que o magnésio (Mg²⁺) foi o parâmetro mais sensível e instável entre todos os furos. O Cálcio (Ca²⁺) os Sulfatos (SO₄²⁻) e o Sódio (Na⁺) apresentavam variações moderadas, enquanto o pH, os bicarbonatos (HCO₃⁻), os cloretos (Cl⁻), o azoto nítrico (NO₃⁻) a condutividade e a Sílica (SiO₂) revelaram-se os mais constantes ao longo das amostras.

Com a Tabela 2 é possível também caracterizar o tipo de água de cada um dos furos:

- ✓ JK1 - Água de mineralização moderada, com condutividade em torno de 1460 µS/cm. Apresenta dureza total de 324 mg/L e alcalinidade elevada, dominada por bicarbonatos. O teor de sódio (240 mg/L) e cloretos (251 mg/L) é significativo, mas ainda dentro de valores aceitáveis para uso industrial geral. A sílica está presente a 8 mg/L, valor comum em águas subterrâneas, mas que pode causar incrustações em sistemas de vapor e comprometer a eficiência térmica se não for devidamente controlada.

- ✓ JK2 - Perfil semelhante ao JK-1, mas menos mineralizada (condutividade de 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e com dureza total de 255 mg/L. Mantém pH neutro e alcalinidade elevada (295 mg/L). O teor de sódio (115 mg/L) é mais baixo que no JK-1, e os cloretos (100 mg/L) estão em níveis moderados. A sílica surge com 9 mg/L, valor típico em águas subterrâneas, mas que pode favorecer a formação de depósitos em equipamentos de vapor, afetando o desempenho térmico se não houver controlo adequado.

- ✓ JK3 - Muito próximo dos dois anteriores, com condutividade e dureza na mesma ordem de grandeza. O cálcio e magnésio estão ligeiramente mais elevados, reforçando a dureza total. A composição iónica confirma uma água bicarbonatada-cálcica, com presença relevante de cloretos e sulfatos. A sílica está presente a 10 mg/L, A sílica apresenta-se com 10 mg/L, valor habitual em águas subterrâneas, mas que pode contribuir para a formação de depósitos em equipamentos de vapor, afetando o rendimento térmico se não houver medidas de controlo.

- ✓ RA-2 - Água de mineralização moderada (condutividade de 1119 $\mu\text{S}/\text{cm}$), com dureza elevada (432 mg/L) e alcalinidade significativa (308 mg/L), dominada por bicarbonatos. O teor de sódio (91 mg/L) e cloretos (159 mg/L) é inferior ao observado nos furos JK, não indicando risco acrescido de corrosão. A sílica está presente a 10 mg/L, tal como no furo JK3, sendo um valor comum para água subterrânea, com potencial para formar depósitos em sistemas de vapor e afetar a eficiência térmica caso não seja devidamente tratado.

- ✓ RA-3 - A água mais mineralizada do conjunto, com condutividade elevada (2790 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e dureza total de 1070 mg/L. O cálcio (381 mg/L) e magnésio (28 mg/L) estão em concentrações elevadas, reforçando o potencial de incrustação. O sódio (198 mg/L) e os cloretos (798 mg/L) atingem valores críticos, tornando esta água a mais problemática para uso industrial direto, exigindo tratamento específico para controlo de corrosão e precipitação. A sílica está presente a 8 mg/L, valor que, embora comum em águas subterrâneas, pode contribuir para depósitos em sistemas de vapor se não for devidamente controlada.

Como se pode verificar, entre os cinco furos, o RA-3 apresenta a pior qualidade de água, embora, segundo a Tabela 2 seja também aquele com maior caudal extraído. Este contraste explica-se pela maior disponibilidade hídrica deste furo face aos restantes [2].

Considerando os resultados obtidos, e numa perspetiva hipotética de seleção dos furos mais adequados à produção de água osmotizada e desmineralizada, é possível identificar parâmetros técnicos que orientariam essa escolha. A dureza total deve ser baixa, para reduzir o risco de incrustações por cálcio e magnésio [36], a condutividade limitada, pois menor carga iónica implica menos necessidade de purgas [39].

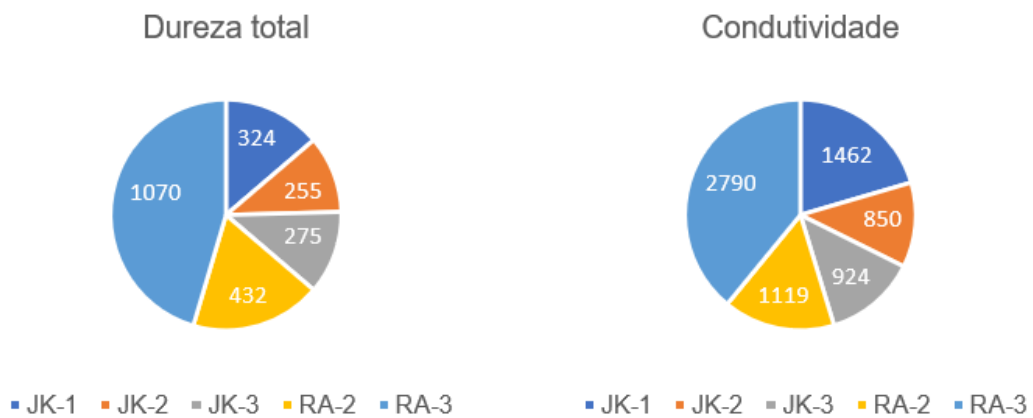


Figura 1 – Dureza total e Condutividade.

Os cloretos e o sódio em concentrações reduzidas, para minimizar fenómenos de corrosão [40].

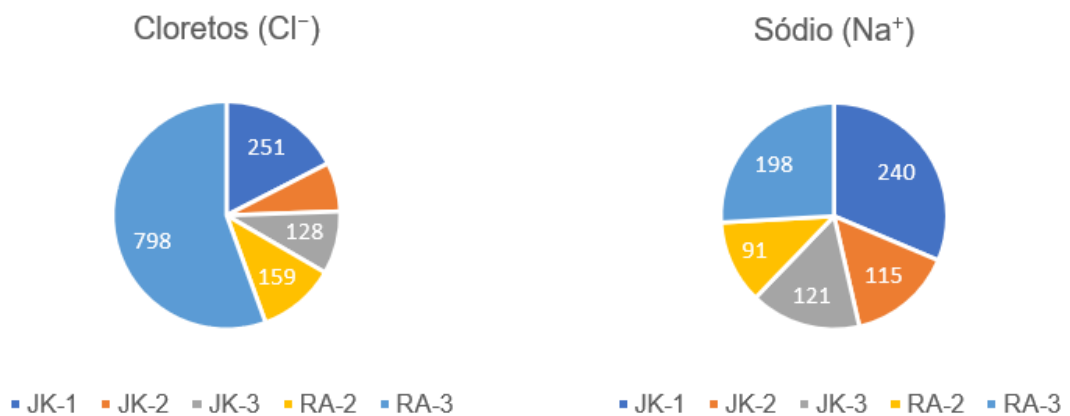


Figura 2 - Cloretos e sódio.

Um pH mais elevado e alcalinidade com valores estáveis, simplifica os ajustes químicos no processo [40].

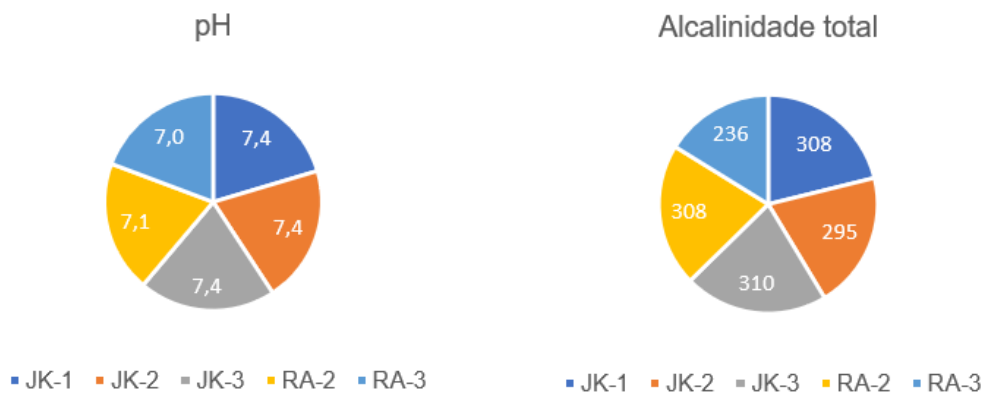


Figura 3 - pH e Alcalinidade Total.

Baixos teores de sílica e sulfatos, são essenciais para evitar depósitos em caldeiras [40].

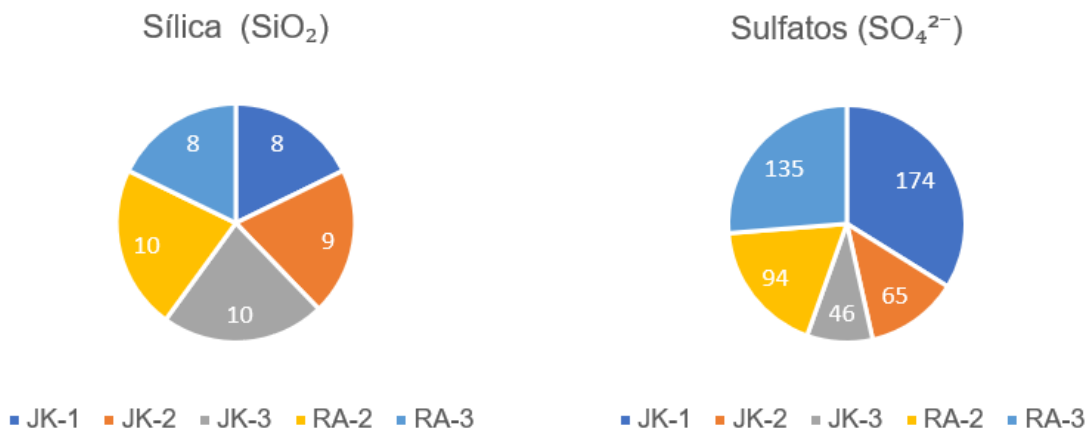


Figura 4 - Sílica e Sulfatos.

Esta análise não representa uma decisão operacional, mas permite identificar os furos com maior potencial para produção de vapor com menor exigência de tratamento. JK-2 apresenta-se como a opção mais equilibrada, com JK-3 também a revelar boas condições. RA-2 e JK-1 poderão ser considerados, embora exijam maior atenção no tratamento. Já RA-3, pelas suas características menos favoráveis, seria o menos indicado para este fim.

2.3 Sistema 2: Água Potável

A SMAS-VFX é responsável pelo abastecimento de água potável à UFAA. Esta água, é na sua maioria, utilizada para consumo humano, podendo ser direcionada para alimentação dos tanques de água bruta (T-506 A/B) caso o balanço dos níveis de água seja insuficiente para satisfazer as necessidades da fábrica [32].

2.4 Sistema 3: Água Osmotizada

A água osmotizada é uma forma de água purificada obtida por osmose inversa. A osmose inversa é uma tecnologia de purificação de água que funciona aplicando pressão sobre a água forçando a sua passagem através de uma membrana semipermeável. Esta membrana atua como um filtro, retendo sais dissolvidos, partículas e ainda microrganismos obtendo como produto final água pura. O movimento da água pode ocorrer através de diversos mecanismos, como a difusão através da membrana ou escoamento por microcanais, dependendo do material que constitui a membrana e das condições operacionais [41].

Apesar da elevada eficiência do processo, este gera um subproduto concentrado, denominado rejeitado, que contém os contaminantes removidos. Este rejeitado deve ser tratado ou reaproveitado de forma controlada, podendo ser integrado em processos de recuperação de minerais ou encaminhado para descarte ambiental [42]. No caso específico em análise, os rejeitados da osmose são direcionados para a rede de incêndios.

A UFAA, possui 2 unidades de osmose inversa [32]. A primeira é constituída apenas por um equipamento, enquanto a segunda integra dois sistemas que podem trabalhar em série. Esta configuração permite o garantir o tratamento da água em caso de avaria ou falha da primeira unidade. Na Figura 5 que se encontra abaixo encontra-se a primeira unidade de osmose da UFAA.



Figura 5 - Primeira unidade de osmose inversa da UFAA.

Inicialmente, a água que se encontra no tanque de águas brutas é bombeada e sujeita a um pré-tratamento que inclui filtração multimédia e carvão aditivado, para remoção de sólidos em suspensão e cloro, tornando o processo de osmose inversa mais eficiente e de modo a evitar danos nas membranas [9]. Esta unidade produz água osmotizada com um caudal de 65m³/h que é posteriormente armazenada num tanque (T-500) [32]. Na Figura 6 é possível observar todo este processo.

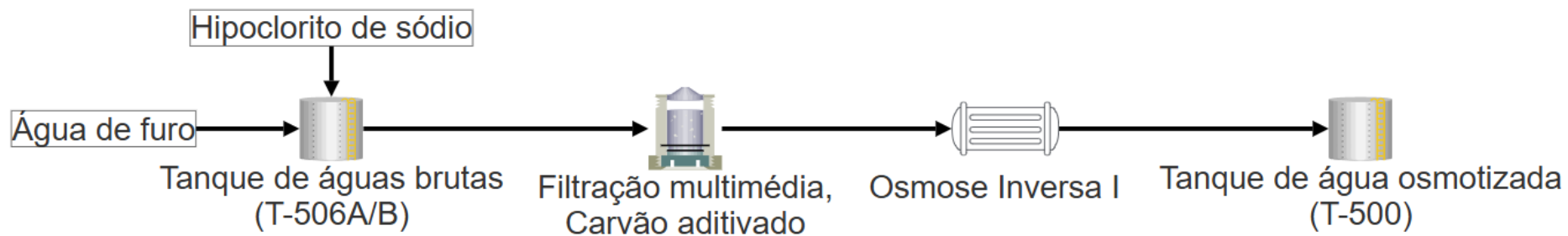


Figura 6 - Obtenção de água osmotizada.

2.5 Sistema 4: Água desmineralizada

2.5.1 Resinas de troca iónica

A água desmineralizada corresponde a uma forma de água tratada na qual se removem praticamente todos os sais e minerais dissolvidos, como cálcio (Ca^+), cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}). O resultado é uma água de elevada pureza, composta essencialmente por moléculas de água, com condutividade elétrica muito baixa. Esta característica torna-a especialmente adequada para aplicações industriais exigentes, como a produção de vapor, onde a presença de impurezas pode comprometer o desempenho dos equipamentos e a eficiência dos processos.

Este tipo de água era obtido na ADP através de um sistema de troca iónica (U-445) e pode ser observado na Figura 7.



Figura 7 - Sistema de resinas de troca iónica presente na UFAA.

O sistema de permuta iónica da UFAA foi inicialmente concebido para operar com água da rede pública (SMAS), garantindo um caudal máximo de $72 \text{ m}^3/\text{h}$ e um caudal nominal de $60 \text{ m}^3/\text{h}$, sob uma pressão de $5,5 \text{ bar}$ [9]. No entanto, com a transição para água proveniente de furos subterrâneos, observou-se uma redução no desempenho do sistema.

A nova água de alimentação apresenta maior variabilidade na composição e concentrações mais elevadas de sais dissolvidos, o que sobrecarrega as resinas e conduz a ciclos de produção mais curtos, com conseqüente aumento no consumo de reagentes utilizados na regeneração. Adicionalmente, esta nova água de alimentação acaba também por afetar a eficiência global do sistema de permuta iônica. O sistema de troca iônica presente na UFAA é constituído por três etapas principais [9], [32]:

- ✓ **Resina catiónica forte** – Retira iões positivos como cálcio (Ca^+), magnésio (Mg^{2+}) e sódio (Na^+), trocando-os por iões hidrogénio (H^+).
- ✓ **Resina aniónica forte** – Elimina iões negativos como cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}), substituindo-os por iões hidróxido (OH^-).
- ✓ **Leito misto** – Atua como polimento final, removendo traços residuais e garantindo uma água com condutividade muito baixa.

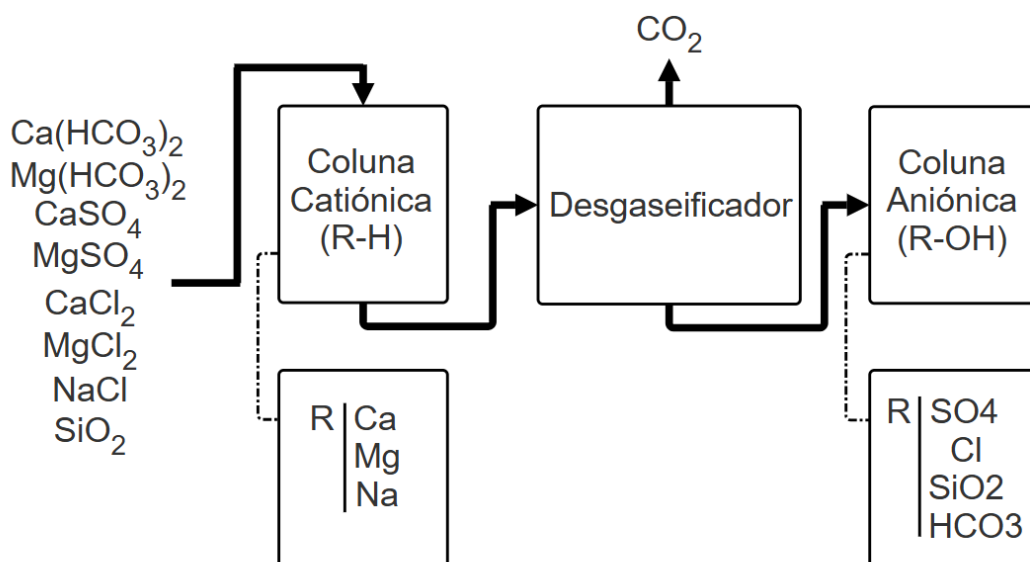


Figura 8 - Esquema de operação do sistema de resinas de troca iônica presente na UFAA [32].

A combinação de iões H^+ e OH^- forma moléculas de água pura (H_2O), sem sais dissolvidos. No entanto, este processo depende fortemente da qualidade da água de entrada. Com o tempo, as resinas tornam-se saturadas, deixando de realizar trocas iônicas de forma eficaz [32].

Para restaurar a sua capacidade, é necessário proceder à regeneração [9], [32]:

- ✓ As resinas catiónicas são regeneradas com ácido sulfúrico (H_2SO_4), que repõe os iões H^+ nos seus grupos funcionais.
- ✓ As resinas aniónicas recebem soda cáustica (NaOH), que devolve os iões OH^- à matriz da resina.

Para melhorar a qualidade da água de alimentação do sistema, a ADP Fertilizantes instalou a primeira unidade de osmose inversa referida anteriormente. Esta medida permitiu otimizar o desempenho das resinas de troca iónica, reduzindo significativamente o consumo de reagentes utilizados na regeneração, como o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e soda cáustica (NaOH) [9].

Apesar da melhoria na qualidade da água de alimentação, o sistema de resinas de troca iónica da ADP já apresentava sinais de envelhecimento, com estado de conservação limitado e desempenho abaixo do esperado. Face a esse cenário, em 2018, a empresa decidiu adquirir uma nova unidade de osmose inversa, conforme descrito no tópico 2.4. Esta segunda unidade integra dois sistemas que podem operar em série. A decisão foi motivada pelos seguintes motivos [41], [43]:

- ✓ **A diminuição significativa no uso de reagentes químicos.** Enquanto o sistema anterior com resinas exigia ácido sulfúrico (H_2SO_4) e soda cáustica (NaOH) para regeneração, a osmose inversa opera com menor necessidade de produtos químicos
- ✓ **A possibilidade de operação contínua e automatizada.** Ao contrário da troca iónica, que funciona em ciclos e requer paragens para regeneração, a osmose inversa permite uma produção estável e sem interrupções.
- ✓ **A maior capacidade de tratamento de águas com elevada carga de sais.** A tecnologia de membranas mostra-se mais eficaz na remoção de sais, metais e sílica (SiO_2), especialmente em situações onde as resinas rapidamente perdem eficiência.
- ✓ **A tendência para custos operacionais mais baixos ao longo do tempo.** Apesar do investimento inicial ser superior, a osmose inversa apresenta vantagens económicas em sistemas bem dimensionados, sobretudo pela redução no consumo de reagentes, menor necessidade de manutenção e simplificação na gestão de resíduos.
- ✓ **O menor impacto ambiental.** A redução no uso de químicos e a menor geração de efluentes perigosos tornam a osmose inversa uma alternativa mais sustentável em diversos contextos industriais.

Por fim, está prevista a desativação em definitivo das resinas durante a próxima paragem anual da fábrica, agendada para setembro de 2025.

2.5.2 Segunda unidade de osmose inversa

A água desmineralizada é produzida através de água osmotizada, armazenada num tanque (T-500). A partir deste ponto, a água é pressurizada, submetida a microfiltração, seguida de nova passagem por osmose inversa. O processo é finalizado com um polimento via electrodesionização (CEDI), reduzindo a condutividade até $0.05\mu\text{s}$. A água tratada, com um caudal de $45\text{m}^3/\text{h}$ é encaminhada para o tanque de armazenamento de água desmineralizada (T-452A/B) [32]. Todo o processo de obtenção desta água pode ser verificado na Figura 9.

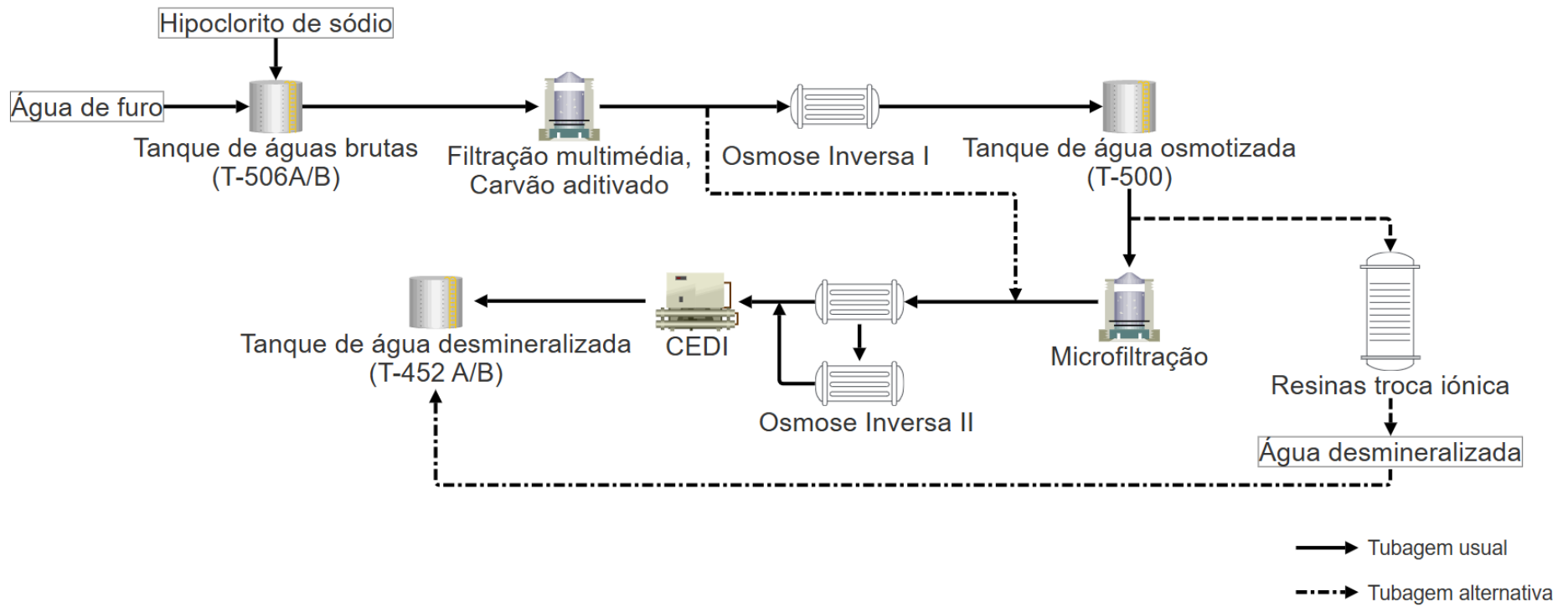


Figura 9 - Obtenção de água desmineralizada.

2.6 Sistema 5: Água da rede de incêndios

A rede de incêndios é abastecida com água proveniente do tanque de águas brutas (T-506 A/B), dos rejeitados da osmose inversa (1º unidade), do SMAS, quando necessário, e também das purgas dos circuitos de refrigeração. Essa água serve como recurso disponível para emergências de incêndio. O armazenamento é feito no tanque da rede de incêndios (T-503), construído em betão e com capacidade de 500m³ [32].

2.7 Sistema 6: Água de refrigeração

O sistema de água de refrigeração baseia-se num conjunto de três circuitos: o segundo, o quarto circuito e o oitavo, nos quais se faz o uso combinado de água osmotizada, água potável e água de captação (águas brutas). Cada circuito é concebido para servir diferentes equipamentos, assegurando uma gestão térmica eficaz e contribuindo para o controlo da temperatura nos pontos críticos de operação [32].

2.7.1 Segundo circuito de água de refrigeração

É responsável pela refrigeração dos equipamentos da UN-220/270 e UN-1000/1050, este circuito conta com um volume aproximado de 2000 m³, um caudal estimado em cerca de 600 m³/h uma temperatura que ronda os 26 a 28°C e um pH de 8 [32]. O segundo circuito encontra-se representado pela Figura 10 para uma melhor compreensão.

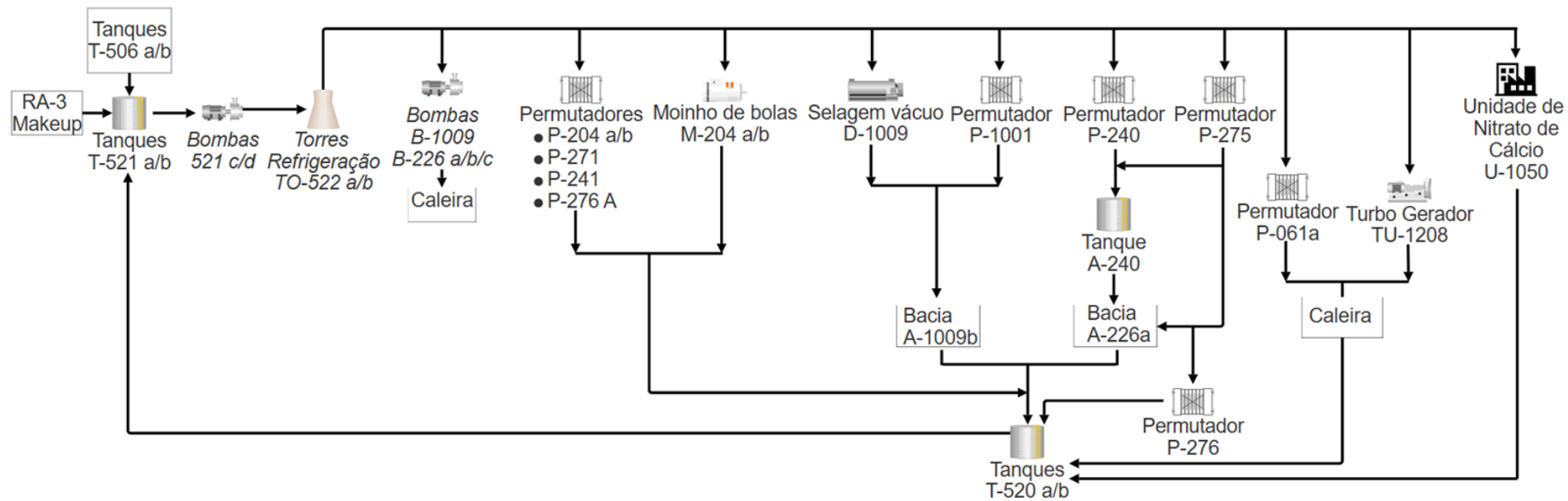


Figura 10 - Segundo circuito de água de refrigeração.

No segundo circuito de água de refrigeração representado pela Figura 10, os tanques de águas quentes (T-521 A/B) são abastecidos com água dos tanques de água bruta (T-506 A/B) bem como com água introduzida diretamente do furo RA-3 como makeup. Esta água é então bombeada para as torres de refrigeração (TO-522 A/B) onde é arrefecida e é distribuída para os diversos equipamentos incluindo permutadores de calor e bombas.

Uma parte da água refrigerada é encaminhada para a unidade de nitrato de cálcio (UN-1050), sendo ramificada para alimentar, por um lado, o permutador P-061a e, por outro, o turbogerador (TU-1208). As águas quentes resultantes são colhidas numa caleira. A água refrigerada fria remanescente é direcionada para os permutadores P-275 e o P-240, o P-1009b e o P-1001, bem como para o P-276a, P-241, P-271, para os motores do moinho de bolas (M-204 A/B) e para as bombas de vácuo B-1009 e B226 a/b/c.

As águas de refrigeração quentes são recolhidas nos tanques T-520 A/B com exceção das bombas de vácuo cujas águas quentes resultantes acabam numa caleira e não são reaproveitadas. A água recolhida nos tanques T-520 A/B é devolvida aos tanques T-521 A/B de onde são novamente bombeadas para as torres de refrigeração e redistribuídas pelos diversos equipamentos. A purga deste circuito é direcionada para o tanque da rede de incêndios (T-503).

2.7.2 Quarto circuito de água de refrigeração

Este pequeno circuito representado na Figura 11, é responsável pela refrigeração dos compressores de ar que alimentam a rede de ar comprimido da UFAA. Tem um volume total aproximado de 15 m³, um caudal de 30 m³/h, é alimentado por água do SMAS (<1m³/h) derivado da sua dimensão, tem uma temperatura entre os 21 e os 22°C e um pH de 7,95 [32].

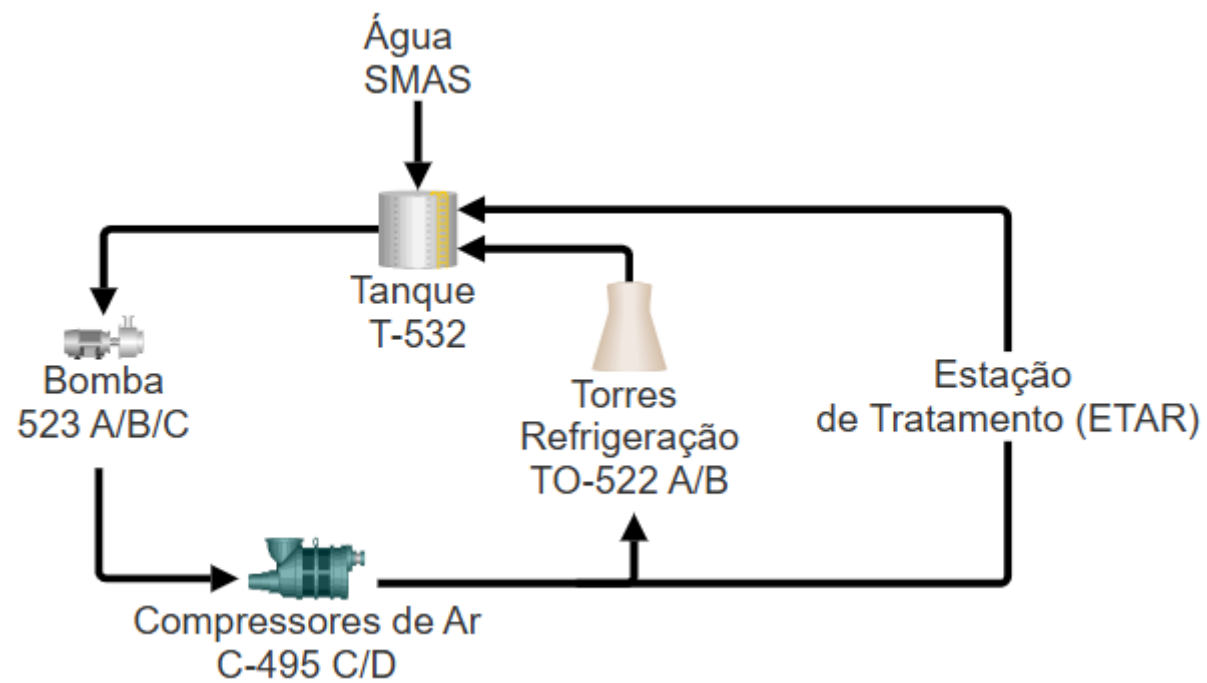


Figura 11 - Quarto circuito de água de refrigeração.

A água do tanque T-532 é bombeada para os compressores de ar C-495 C/D, arrefecida nas torres de arrefecimento TO-532 A/B e a água retorna ao tanque T-532. A purga deste circuito, tal como o anterior, é direcionada para o T-503 para futura utilização na rede de incêndios [32].

2.7.3 Oitavo circuito de água de refrigeração

O oitavo e último circuito é responsável pela refrigeração dos equipamentos da fábrica de ácido nítrico UN-060, é alimentado com água osmotizada, podendo ser alimentado também com água desmineralizada [32]. Dispõe de um volume total de circulação de 600m³ e um caudal de circulação aproximado de 1100 m³/h e encontra-se representado na Figura 12.

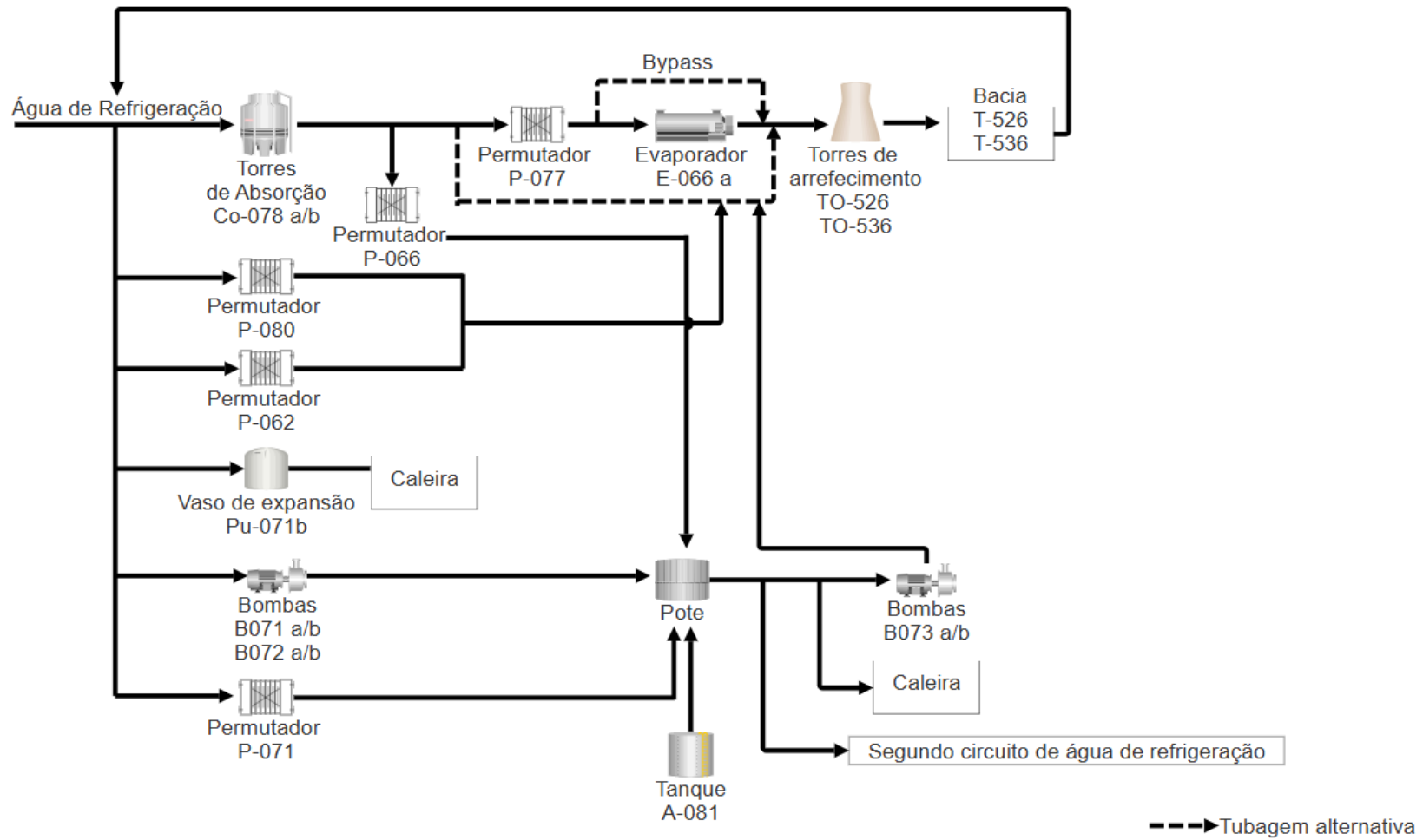


Figura 12 - Oitavo circuito de água de refrigeração.

A água de refrigeração fria distribui-se inicialmente por duas vias. Na primeira, a água segue para as torres de absorção CO-078 a/b, onde se ramifica novamente: uma parte dirige-se ao permutador P-066 e outra ao permutador P-077, que por sua vez alimenta o evaporador E-066a. Após este percurso, a água já aquecida é encaminhada para as torres de arrefecimento TO-526 e TO-536. Depois de arrefecida, entra nas bacias T-526 e T-536, retornando ao ponto de partida para reiniciar o ciclo de refrigeração.

Na segunda via, a água fria alimenta os permutadores P-080 e P-062, cujas águas quentes resultantes se juntam ao fluxo proveniente do evaporador E-066a. Em seguida, a água de refrigeração alimenta o vaso de expansão PU-071b, sendo que a água quente gerada nesta etapa é descarregada numa caleira. A mesma água fria alimenta ainda as bombas B071 a/b e B072 a/b, bem como o permutador P-071. As águas quentes resultantes destes equipamentos são recolhidas num pequeno reservatório conhecido como pote.

Este pote recebe, além dos fluxos já mencionados, águas quentes provenientes do permutador P-066 e do tanque A-081. A partir deste reservatório, a água pode seguir dois destinos: é encaminhada para as bombas B073 a/b, cujas águas quentes se juntam à linha que sai do evaporador E-066a, ou, caso o pH seja superior a 7 e a concentração de azoto amoniacal seja baixa, pode ser direcionada para o segundo circuito de refrigeração. Caso contrário, é descartada numa caleira.

Nota 1: O bypass representado na Figura 12 serve para controlar a temperatura no evaporador.

3 Produção de vapor

Para a produção de vapor torna-se indispensável fornecer energia térmica na água até que esta atinja a temperatura de ebulição, momento em que ocorre a transição do estado líquido para o gasoso. Para que o vapor possa ser gerado de forma eficiente e segura, é imprescindível recorrer a equipamentos especificamente concebidos para esse fim: as caldeiras. Estes sistemas térmicos desempenham um papel central na conversão da energia fornecida, seja por combustão ou eletricidade, em vapor utilizável nos mais diversos processos industriais [44].

A escolha do tipo de caldeira a empregar depende de múltiplos fatores, como a pressão requerida, o volume de vapor necessário, o tipo de combustível disponível e as características operacionais da instalação. No âmbito da análise de sistemas de geração de vapor em contexto industrial, é pertinente reconhecer a existência de duas configurações fundamentais de caldeiras: as aquatubulares e as flamotubulares. Ambas apresentam características estruturais e funcionais distintas, que influenciam diretamente o seu desempenho, eficiência térmica e adequação às exigências operacionais [44], [45]. No entanto, considerando que as instalações da ADP estão equipadas exclusivamente com caldeiras flamotubulares, toda a caracterização técnica e os dados apresentados se referem a este tipo específico de equipamento.

As caldeiras flamotubulares constituem uma das configurações mais tradicionais e amplamente utilizadas na geração de vapor em contextos industriais de pequena e média escala. O seu princípio de funcionamento baseia-se na circulação dos gases de combustão através de tubos metálicos imersos em água, promovendo a transferência de calor e subsequente vaporização do fluido [24], [44], [45].

Esta arquitetura inversa à das caldeiras aquatubulares confere uma estrutura mais compacta e simples, o que se traduz numa instalação menos exigente em termos de espaço e investimento inicial. Por estas razões, são frequentemente adotadas em unidades industriais com área reduzida e outras aplicações onde os requisitos de pressão e volume são moderados [45], [46].



Figura 13 - Caldeira flamotubular presente na central de vapor da ADP fertilizantes.

Contudo, apesar da sua acessibilidade e facilidade de operação, as caldeiras flamotubulares apresentam limitações técnicas que restringem a sua aplicabilidade em processos mais exigentes. A superfície de troca térmica é relativamente reduzida, o que compromete a eficiência em regimes de alta pressão. A resposta a variações de carga térmica tende a ser mais lenta e a capacidade de produção de vapor é limitada quando comparada com modelos aquatubulares. Por isso, apesar de serem mais práticas e económicas, caldeiras flamotubulares não são aconselhadas para instalações indústrias que necessitem de grandes quantidades de vapor ou que funcionam em condições exigentes [44], [45].

A central de vapor da UFAA, é composta por três caldeiras flamotubulares da marca Figueiredo (Figura 13). O sistema produz vapor sobreaquecido com um caudal compreendido entre as 6 e as 7 toneladas por hora, com uma pressão de 21 bar e a uma temperatura de 270°C [9]. Para a produção de vapor estes são os requisitos da água de alimentação de acordo com o fabricante das caldeiras:

Tabela 3 - Requisitos do fabricante relativos à água de alimentação de caldeiras.

Parâmetros	Unidades	Valor
pH	-	> 7,5
Condutividade	µs/cm	-
Dureza total	mg/L	0
Ferro	mg/L	0,2
Sílica	mg/L	25-30
Oxigénio	mg/L	0,05
CO2	mg/L	0
Óleo	mg/L	1

Tabela 4 - Características da água no interior da caldeira segundo o fabricante.

Parâmetros	Unidades	Valor
pH	-	9,6-12
Condutividade	µs/cm	2500
Dureza total	mg/L	0
Ferro	mg/L	200-300
Sílica	mg/L	100

Nota 2: O símbolo (–) na condutividade indica que o valor não foi medido ou não é fixo, pois depende do processo. Já os valores 0 representam medições abaixo do limite detetável. O fabricante não especifica a condutividade da água de alimentação, apenas da água dentro da caldeira. Segundo a norma EN 12953-10:2003 [47], existem valores de referência, sendo que, para a UFAA, a condutividade da água de alimentação deve ser $\leq 30 \mu\text{S/cm}$.

Para conseguir cumprir estes requisitos da água de alimentação, a ADP fertilizantes utiliza a água desmineralizada, produzida pela segunda unidade de osmose inversa (como mencionado no tópico 2.5.2). Esta água tem uma quantidade muito baixa de sais dissolvidos assim como uma baixa condutividade. Antes da entrada na caldeira, a água é sujeita a um tratamento com fosfato trisódico (Na_3PO_4) para remover o oxigénio e soda (NaOH) para aumentar a pH feito por uma empresa externa AquaProx. [9]

A água passa ainda por um desgaseificador térmico, para remoção de oxigênio e dióxido de carbono [9]. A qualidade da água desmineralizada e de alimentação das caldeiras pode ser observada na seguinte Tabela 5:

Tabela 5 - Qualidade da água desmineralizada produzida pela UFAA e da água de alimentação de caldeiras após tratamento.

Parâmetros	Unidades	Água desmineralizada	Água de alimentação
pH	-	7,7	8,5
Condutividade	µs/cm	< 5	20
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	0	15
Alcalinidade total	mg/L	0	0
Alcalinidade Fenolftaleína	mg/L	0	0
Dureza total	mg/L	0	0
Cloretos	mg/L	0	0
Sílica	mg/L	0	0
Ferro total	mg/L	0,02	0,02

Nota 3: Os valores 0 representam medições abaixo do limite detetável pelo equipamento de medição.

Após compreender os requisitos associados à geração de vapor, avançamos agora para a análise da sua distribuição pelos diferentes setores da unidade industrial representado na Figura 14.

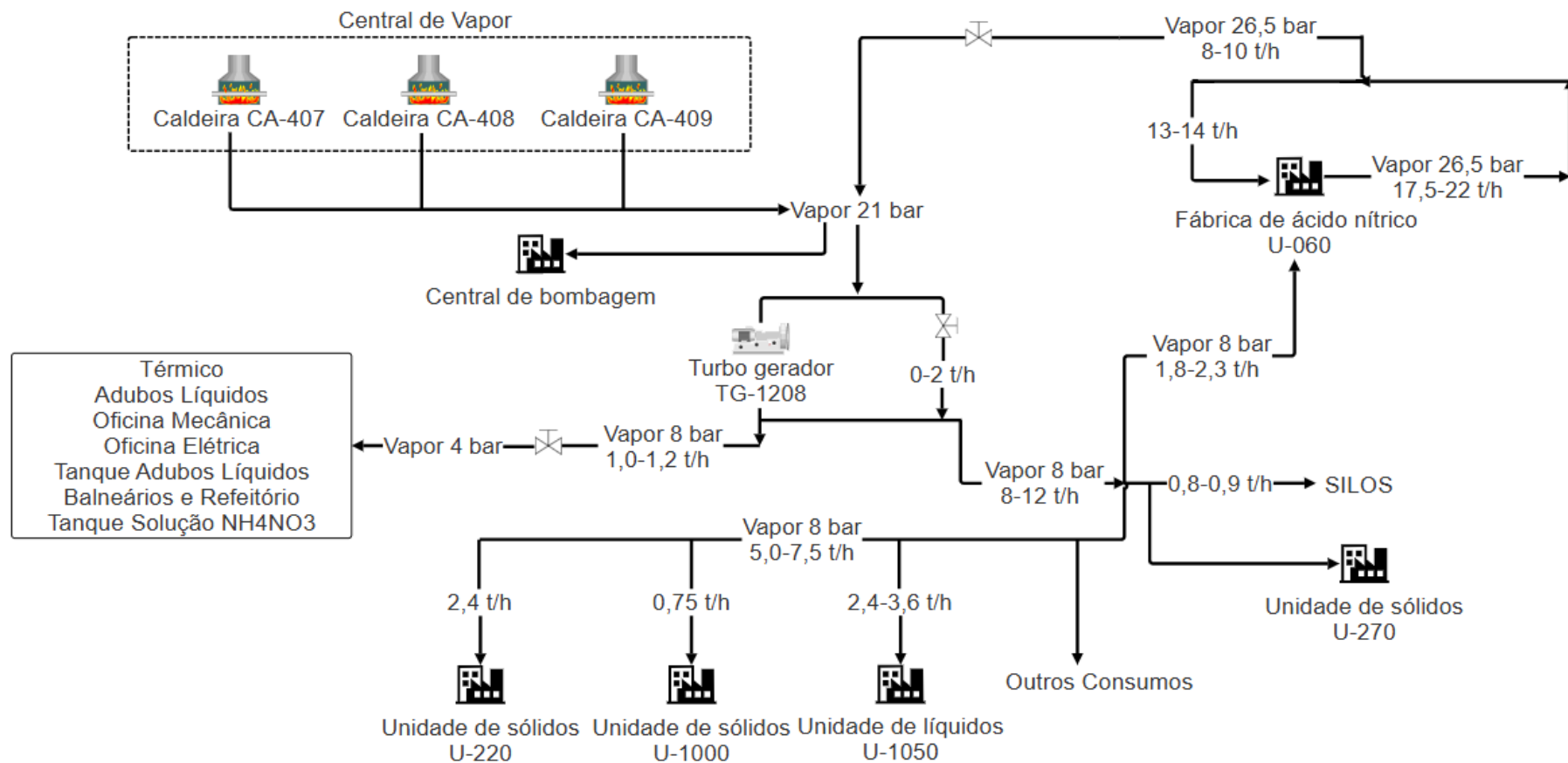


Figura 14 - Rede de vapor da UFAA.

Após ser distribuído, o vapor é utilizado nos diversos pontos da instalação como podemos verificar pela Figura 14. À medida que perde calor, o vapor condensa e transforma-se novamente em água. O modo como o condensado é recolhido e reaproveitado influencia diretamente a eficiência do sistema, reduzindo o consumo de água e energia. Esta temática será desenvolvida no capítulo seguinte, dedicado à recuperação de condensados.

Nota 4: Atualmente, os consumos de vapor nas diferentes unidades da instalação são estimados com base nas necessidades operacionais, uma vez que a ausência de instrumentação adequada impede a validação rigorosa dos valores e cálculos efetuados.

4 Recuperação de condensados

Em sistemas industriais, o condensado gerado pelo uso de vapor representa um recurso energético e hídrico valioso, mas frequentemente desperdiçado por falhas na recolha, contaminação ou ausência de monitorização adequada. Em muitos casos, o fluido é descartado integralmente devido à presença de óleos, químicos ou partículas, sem distinção entre condensado reaproveitável e contaminado [48]. Além disso, problemas como purgadores inoperantes, falta de isolamento térmico ou armazenamento em condições desfavoráveis agravam perdas térmicas e riscos de corrosão, tornando inviável a recuperação mesmo quando seria tecnicamente possível [49].

Esta realidade evidencia lacunas na conceção dos sistemas e compromete a eficiência e sustentabilidade dos processos industriais [49]. A abordagem mais eficaz para mitigar estas perdas consiste na implementação de um sistema dedicado de recolha e aproveitamento de condensado, com tubagens estrategicamente posicionadas e um tanque central de armazenamento. Este deve garantir o controlo da temperatura, através de sensores instalados na tubagem ou no próprio tanque, proteção contra contaminantes externos e monitorização contínua da qualidade [48].

A integração de sensores e sistemas de automação permite a análise em tempo real da composição do condensado, facilitando as decisões operacionais sobre o seu reuso ou descarte [49]. Este último exemplo foi parcialmente implementado na unidade industrial da ADP Fertilizantes, em Alverca, destacando-se o sistema de recolha de condensados centralizado no tanque A-060b. Este equipamento recebe condensados proveniente de diversos pontos da instalação. Apesar de não existir monitorização contínua em linha, nem quantificação individual dos caudais nas entradas e saídas do tanque, a qualidade dos condensados é acompanhada regularmente através de análises laboratoriais internas. A Figura 15 ilustra o tanque A-060b, os pontos de origem dos condensados e as suas respetivas saídas.

Entradas:	
1-	Unidade 1000
2-	Ensacamento e Purgador 13
3-	Recirculação do tanque
4-	Unidade 220 (A-250)
5-	Unidade 220 (P-233)
6-	Unidade 1050
7-	Nicav-17B
8-	Unidade 095 e Balneários

Saídas:	
9-	Atmosfera
10 A -	A-060a
10 B -	A-060a
11 e 12 -	Segundo circuito de água de refrigeração
13 -	P-061b
14 -	P-061a

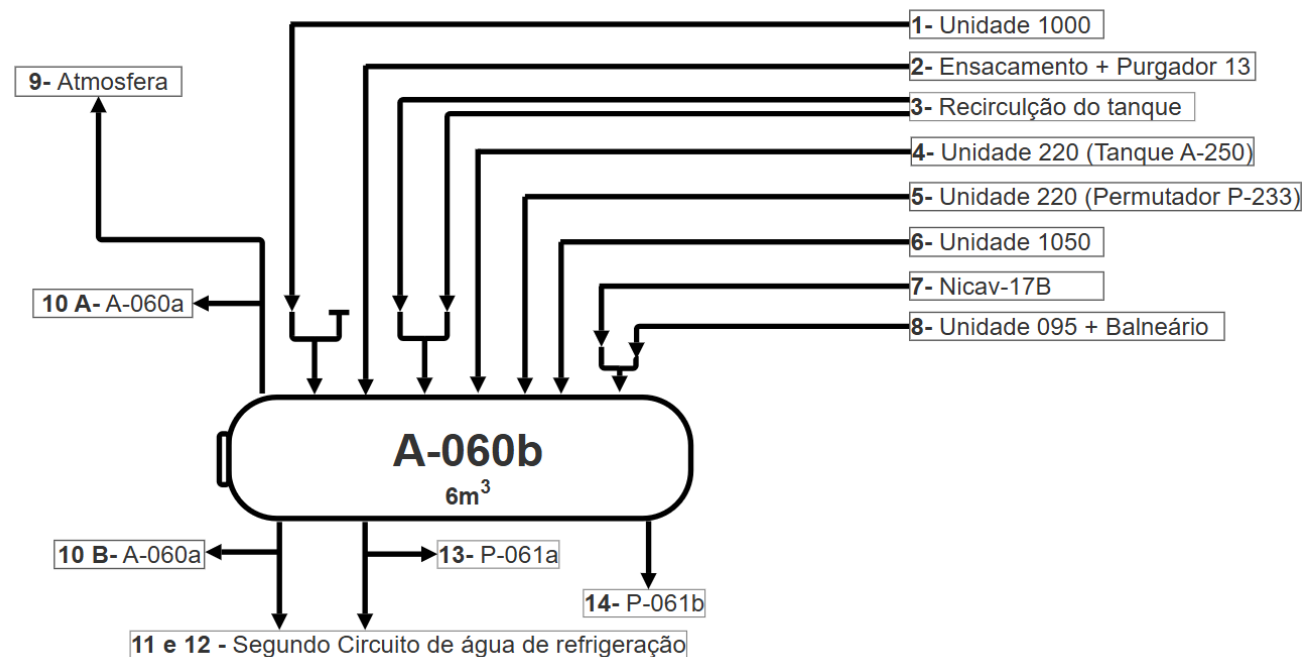


Figura 15 – Entradas e saídas do tanque de condensados

O tanque A-060b de capacidade 6m³, contém no seu interior condensado a uma temperatura que se situa entre os 100°C e 110°C, o que, em teoria, permite o seu reaproveitamento térmico. O tanque tem duas camadas de isolamento, a interna de lã mineral e a externa de chapa metálica, o que contribui para a retenção de calor. As tubagens de entrada apresentam isolamento térmico, assim como as de saída, contudo é importante salientar que as tubagens de saída se encontram revestidas apenas com lã mineral, a qual apresenta sinais evidentes de degradação. Em várias zonas, o isolamento está fragmentado ou ausente, comprometendo a retenção térmica e aumentando o risco de perdas energéticas. Na Figura 16 é possível observar o tanque de recolha de condensados.

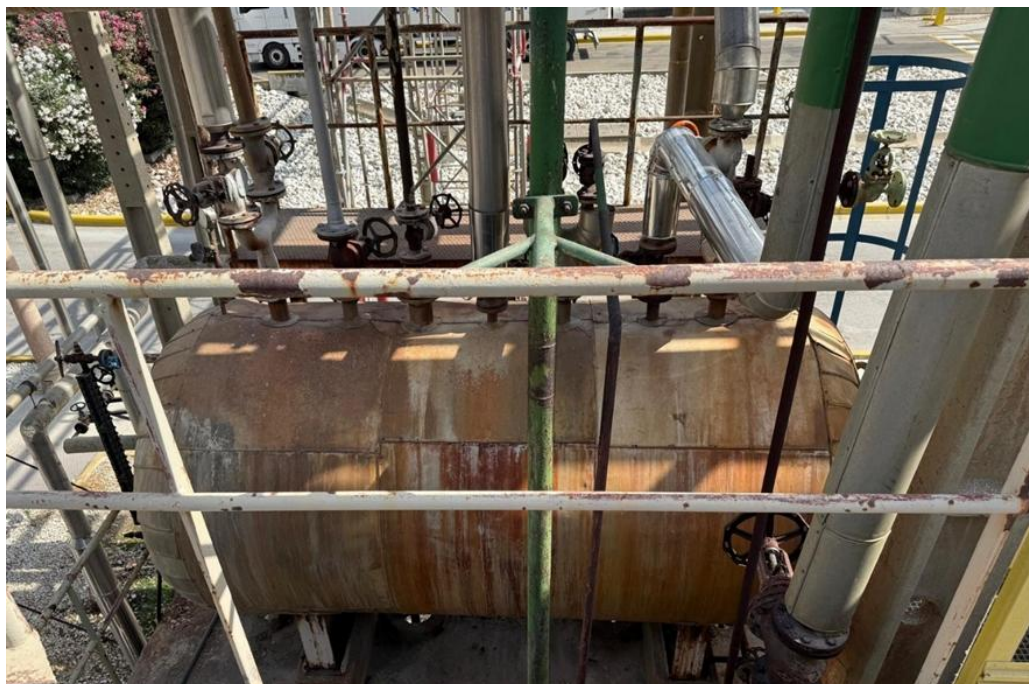


Figura 16 – Tanque A-060b.

5 Metodologias

5.1 Abordagem

Para melhor compreender os sistemas em funcionamento, foi realizada uma visita técnica à unidade industrial, em colaboração com o Eng. Miguel Ribeiro (responsável pelas utilidades fabris) e o Eng. Oliveira Marques (responsável pelo gabinete técnico). Esta observação direta permitiu analisar os principais processos associados à gestão hídrica e térmica, incluindo a captação de água subterrânea, o tratamento e armazenamento, a produção e distribuição de vapor, e o sistema de recolha de condensados.

O percurso abrangeu:

- ✓ **Pontos de captação de água subterrânea** – identificação dos furos utilizados para abastecimento da instalação.
- ✓ **Tanques de armazenamento** – observação dos diversos tanques que acolhem água na unidade, abrangendo tanto os reservatórios destinados ao tratamento e aplicação no processo produtivo, como aqueles associados a funções complementares, incluindo circuitos de refrigeração e rede de incêndios.
- ✓ **Unidades de tratamento de água** – observação das tecnologias de purificação aplicadas na unidade, com destaque para os sistemas de osmose inversa e resinas de troca iónica, bem como a sua integração funcional no circuito hídrico da fábrica.
- ✓ **Central de produção de vapor** – observação das caldeiras em operação, dos parâmetros técnicos e da rede de distribuição, incluindo os pontos de redução de pressão e respetiva integração no processo industrial.
- ✓ **Rede de recolha de condensados** – análise do sistema de recuperação de condensados, com destaque para os pontos de entrada e saída.

Com a visita concluída e os dados relevantes devidamente recolhidos, deu-se continuidade ao estudo com a definição do seguinte plano de ação:

- ✓ **Elaborar o diagrama da rede de condensados** – Com o intuito de mapear de forma precisa todas as origens, trajetos, equipamentos envolvidos e destinos finais dos condensados.
- ✓ **Analisar a água presente no tanque de recolha de condensados (A-060b)** - Avaliação laboratorial da qualidade atual dos condensados, com vista à sua eventual reutilização, incluindo a análise em diferentes regimes de funcionamento da fábrica, para compreender a variabilidade e os possíveis tipos de contaminantes que possam surgir.
- ✓ **Quantificação dos caudais nas entradas e saídas do tanque** – pretende-se medir com precisão os volumes movimentados, para calcular o impacto económico e a quantidade real de água envolvida, considerando a inexistência de instrumentação fixa e a necessidade de soluções externas para medição.
- ✓ **Avaliação do potencial de reaproveitamento dos condensados** – será analisada a viabilidade técnica de reutilizar os condensados como água de alimentação das caldeiras. A partir dessa análise, estima-se o potencial de poupança associado, tanto em consumo de água como em gás natural.

Para caracterizar a água do tanque de recolha de condensados (A-060b), é importante ter como referência os requisitos já definidos para a água de alimentação das caldeiras, disponíveis no Capítulo 3 – ‘Produção de vapor’. Procedeu-se à análise dos diferentes regimes de funcionamento da ADP, com o objetivo de identificar possíveis fontes de contaminação. As análises laboratoriais foram realizadas nas instalações da ADP Fertilizantes, tirando partido da experiência dos seus técnicos nos parâmetros em estudo e garantindo a rastreabilidade da informação, considerada estratégica para a empresa.

Foram analisados sete parâmetros, por ordem de relevância: pH, condutividade, amónia (NH_4^+), cloretos (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (NO_3^-) e fosfatos (P_2O_5).

pH – O pH representa a atividade dos iões hidrogénio presentes na água e é um parâmetro fundamental para avaliar o seu grau de acidez ou alcalinidade [50]. A sua variação está intimamente ligada a características químicas como a dureza e a alcalinidade [51]. Valores abaixo de 7 indicam um meio ácido, enquanto valores acima de 7 correspondem a um meio alcalino; o valor 7 é considerado neutro. Em contexto industrial, não existe um valor único ou uma gama de valores de pH para condensados que se vão reutilizar como água de alimentação de caldeiras. O que se procura é que o pH esteja o mais elevado possível dentro de limites seguros, geralmente ligeiramente alcalino (>7), para minimizar a corrosividade e a solubilidade de gases como CO_2 e O_2 [24].

Condutividade – A condutividade elétrica surge como um parâmetro essencial na avaliação da qualidade da água, especialmente no que diz respeito à sua pureza. Este indicador expressa a facilidade com que a corrente elétrica atravessa o fluido, sendo influenciado pela temperatura e pela presença de iões dissolvidos [52]. Quanto maior a concentração de sais ou minerais ionizados, maior será a capacidade da água para conduzir eletricidade. Por isso, existe uma relação direta entre o grau de mineralização da água e o valor de condutividade medido [51]. A bibliografia não indica um valor ou uma gama de valores para este parâmetro uma vez que depende muito do tipo de processo. Não obstante, os valores de condutividade pretendem-se baixos pois uma condutividade elevada aumenta o risco de corrosão e incrustação ($< 10\mu\text{s/cm}$) [24].

Amónia (NH_4^+) – A presença de amónia nos condensados altera parâmetros como o pH e a condutividade, podendo afetar de forma negativa o equilíbrio químico do ciclo água-vapor e acelerar fenómenos de corrosão em ligas metálicas [26], [52]. Por ser volátil, a amónia acompanha o vapor e regressa ao condensado, em concentrações elevadas, a amónia dificulta a purificação da água de retorno e pode reduzir a sua qualidade para a reutilização na caldeira. Apesar da sua relevância na bibliografia não existem valores máximos ou mínimos universalmente definidos para a presença de amónia em condensados. O que se pratica é a sua utilização de forma controlada como agente de ajuste de pH ($<2\text{mg/L}$). Como alternativa, recorrem-se a aminas neutralizantes, como a ciclohexilamina, que apresentam maior estabilidade, ajudam a neutralizar o CO_2 dissolvido e permitem manter o pH adequado de forma mais segura [53].

Sulfatos (SO_4^{2-}) – A presença de sulfatos nos condensados industriais representa um risco significativo quando estes são reaproveitados como água de alimentação de caldeiras. Em conjunto com outros contaminantes, como cloretos e sódio, os sulfatos podem favorecer a formação de depósitos e acelerar processos de corrosão em sistemas térmicos [40]. Mesmo em concentrações reduzidas, estes compostos contribuem para a degradação localizada de superfícies metálicas, afetando a eficiência operacional e a integridade dos equipamentos [54]. A literatura técnica descreve que a detecção de sulfatos em condensados deve ser interpretada como sinal de contaminação externa, exigindo intervenção imediata para evitar danos em caldeiras e turbinas [40]. O manual de boas práticas da Galp reforça esta visão, identificando os sulfatos como iões indesejáveis, associados a problemas de corrosão e de desempenho energético [25]. Importa sublinhar que a bibliografia consultada não estabelece valores concretos ou gamas aceitáveis para sulfatos em condensados; a orientação é clara no sentido de que estes devem ser mantidos em níveis tão baixos quanto possível, idealmente inexistentes, para garantir a fiabilidade e a longevidade do ciclo de vapor [25], [40].

Nitratos (NO_3^-) - A presença de nitratos nos condensados industriais é um sinal claro de contaminação externa, uma vez que estes compostos não fazem parte da química normal do ciclo água-vapor. Mesmo pequenas quantidades de nitratos podem acelerar processos de corrosão e favorecer a formação de sais instáveis, comprometendo a segurança e a eficiência do sistema. Em indústrias de fertilizantes que utilizam ácido nítrico, este risco é ainda mais relevante, pois a detecção de nitratos nos condensados denuncia falhas de isolamento ou de purificação [40]. O manual de boas práticas da Galp reforça esta preocupação, identificando os nitratos como impurezas indesejáveis que devem ser eliminadas para garantir a fiabilidade do ciclo [25]. A bibliografia não define valores de referência para este parâmetro, sendo unânime em recomendar que os nitratos sejam mantidos em níveis idealmente inexistentes, para assegurar a longevidade e a segurança das caldeiras [25], [40].

Fosfatos (P_2O_5) - Os fosfatos são tradicionalmente utilizados em programas de tratamento interno de caldeiras, com o objetivo de controlar a corrosão, estabilizar o pH e reagir com iões como o cálcio, formando sais pouco solúveis que reduzem a tendência para incrustações [25]. No entanto, a sua presença em condensados, especialmente em sistemas que não recorrem a este tipo de tratamento, deve ser interpretada como sinal de contaminação externa [55].

Nestes casos, os fosfatos podem favorecer a formação de depósitos em superfícies de troca térmica, diminuindo a eficiência da transferência de calor e comprometendo a integridade dos equipamentos. A bibliografia não apresenta valores de referência para fosfatos em condensados ou água de alimentação de caldeiras, sendo apenas clara na recomendação de que a sua presença deve ser evitada [56].

Nota 5: Durante a avaliação da qualidade dos condensados, foi inicialmente considerada a análise da turbidez ou dos sólidos suspensos. No entanto, face à ausência de metodologia específica e de equipamento adequado na UFAA, essa análise foi descartada. Ainda assim, para obter uma estimativa preliminar, foram analisadas amostras iniciais no laboratório de ambiente do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), utilizando um turbidímetro HACH, modelo 2100N, adequado à medição de turbidez em águas com baixa concentração de sólidos.



Figura 17 - HACH modelo 2100N [57].

O turbidímetro utilizado funciona com uma lâmpada de tungsténio que gera um feixe de luz, direcionado para a amostra através de estenopos e lentes. As partículas em suspensão dispersam essa luz em várias direções. Dois sensores registam o sinal: um capta o espalhamento lateral, a 90° do feixe, e outro mede a luz transmitida diretamente. Cada sinal é convertido em corrente elétrica proporcional à intensidade detetada. Para garantir consistência e minimizar interferências (como cor da amostra ou emissividade da lâmpada), o equipamento calcula a razão entre os dois sinais. O valor de turbidez é então determinado com base numa curva de calibração pré-definida e apresentado no visor digital em unidades NTU [58].

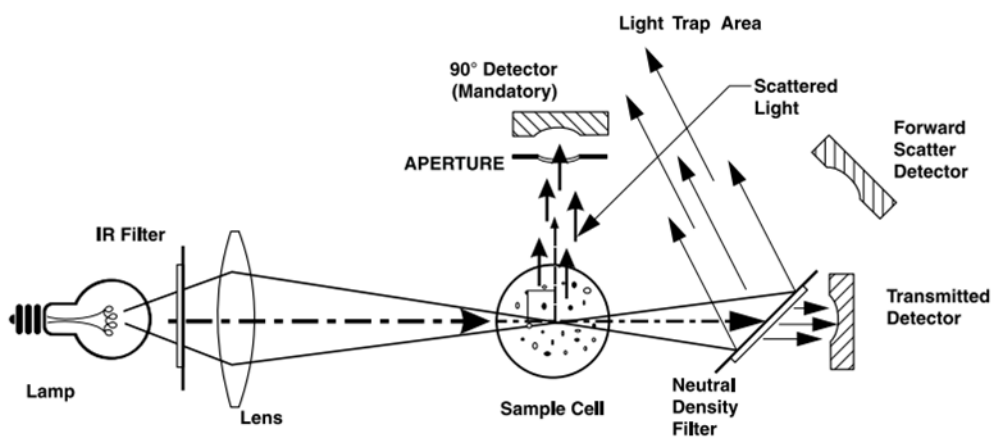


Figura 18 — Princípio de funcionamento do turbidímetro [58].

A calibração do turbidímetro foi realizada com padrões em gel e soluções aquosas preparadas a partir do Formazin Standard 4000 NTU (100 mL), em diferentes concentrações. A análise preliminar indicou valores de turbidez inferiores a 1 NTU, muito próximos de zero. Dado o reduzido impacto analítico nestas condições, optou-se por não avançar com ensaios adicionais. Ainda assim, regista-se que o teste foi devidamente realizado nas primeiras amostras.

5.2 Amostragem

Devido à ausência de conhecimento técnico sobre os pontos exatos de recolha, a primeira amostragem foi realizada pelos operadores da ADP, já familiarizados com os locais e com o procedimento. As segunda e terceira amostragens foram efetuadas por mim e pelo Eng. Oliveira Marques (responsável pelo gabinete técnico), com o objetivo de garantir a conformidade do processo e evitar qualquer tipo de interferência nos resultados. Todas as amostras foram acondicionadas em frascos de reagentes previamente lavados e secos.

O procedimento de amostragem seguiu os seguintes passos:

- ✓ Realizou-se uma purga dos pontos de recolha durante um período de 30 a 60 segundos.
- ✓ Lavou-se o recipiente de recolha com a própria amostra e descartou-se esse volume.
- ✓ Procedeu-se à recolha final da amostra para análise.

5.3 Medições de caudal

Para quantificar o caudal de condensados, foram inicialmente consideradas várias abordagens, como cálculos baseados no consumo dos equipamentos, na produção de vapor e nas quantidades evaporadas. No entanto, a ausência de instrumentação adequada impediu a obtenção de valores fiáveis. Perante esta limitação, a empresa decidiu alocar um orçamento para duas alternativas: contratar um serviço externo de medição ou adquirir um caudalímetro portátil, incluindo os custos de calibração.

A pesquisa de mercado concentrou-se em fornecedores da região de Lisboa e arredores, tendo sido identificadas mais de dez empresas. Após análise comparativa dos orçamentos, considerando prazos de execução, custos de aquisição e calibração, e a fiabilidade técnica, optou-se pela contratação de um serviço de medição de caudal, dada a urgência do estudo e o menor investimento necessário. A proposta selecionada foi a da empresa Contimetra [59], por apresentar a melhor relação custo-benefício e maior capacidade de resposta técnica.

O equipamento utilizado para as medições dos caudais foi um caudalímetro externo ultrassónico híbrido da Dynasonics, equipado com sensores que operam segundo os princípios de tempo de trânsito e por efeito de doppler. Esta configuração permite medir o caudal em diferentes tipos de fluídos, desde líquidos limpos com baixa carga de poluentes até misturas com partículas sólidas ou bolhas de gás em suspensão [60].



Figura 19 - Caudalímetro externo ultrassónico híbrido da Dynasonics [61].

No modo de tempo de trânsito, dois transdutores piezoelétricos são instalados em lados opostos da tubagem, formando um trajeto diagonal através do fluido. Cada transdutor emite, alternadamente, pulsos ultrassônicos e recebe os sinais transmitidos pelo oposto. Quando o pulso se desloca no sentido do caudal, percorre o trajeto mais rapidamente do que quando viaja contra o fluxo. A diferença entre os tempos de trânsito nos dois sentidos é diretamente proporcional à velocidade média do fluido [60].

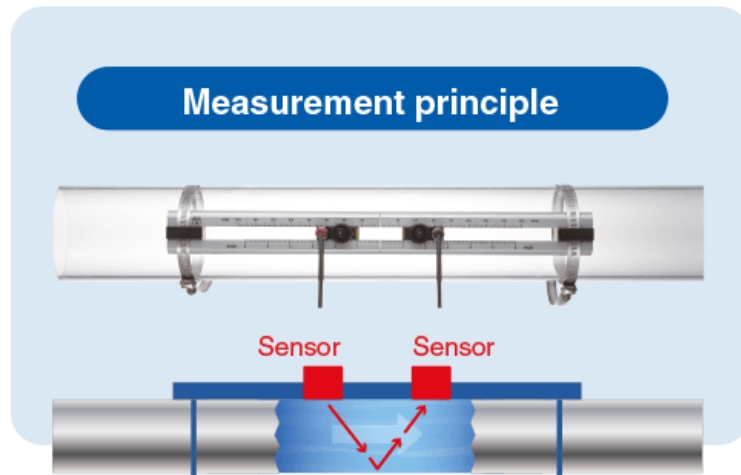


Figura 20 - Princípio de funcionamento por tempo de trânsito [60].

Conhecendo a área interna da tubagem, a velocidade medida pode ser convertida diretamente em caudal volumétrico. Para garantir precisão, o método exige que o fluido seja relativamente limpo, com baixa presença de partículas ou bolhas, pois estas interferem na propagação do ultrassom e podem comprometer a leitura. A tubagem deve estar completamente cheia e os transdutores corretamente alinhados, conforme especificações do fabricante. Além disso, a calibração deve considerar a velocidade do som no fluido, que varia com a temperatura e a densidade, assegurando medições estáveis e repetíveis [60].

Na técnica Doppler, o transdutor emite pulsos ultrassônicos que atravessam o fluido. Essas ondas são refletidas por partículas ou bolhas em movimento, regressando ao recetor com uma frequência ligeiramente alterada. Essa variação é proporcional à velocidade média do fluido, permitindo calcular o caudal volumétrico. O método Doppler é especialmente útil em fluidos não homogêneos, como lamas, misturas gás-líquido ou águas com sedimentos, desde que exista uma concentração mínima de partículas ou bolhas, tipicamente superior a 25 ppm, para garantir reflexões acústicas eficazes [60].

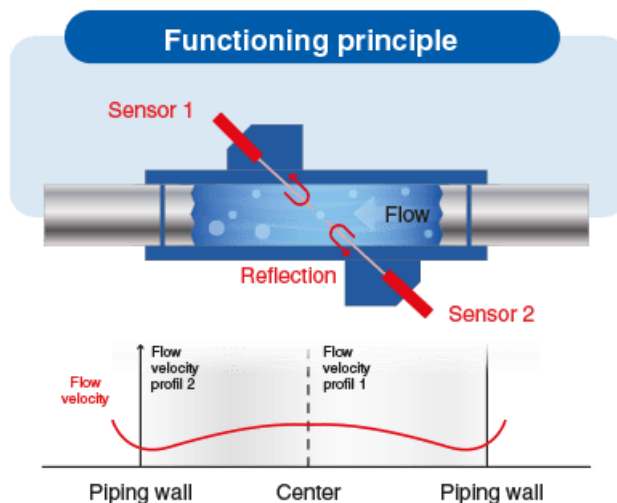


Figura 21 - Princípio de funcionamento por efeito doppler [60].

Como o sensor não precisa estar em contacto direto com o fluido, pode ser instalado externamente à tubagem, o que simplifica a manutenção e evita obstruções [16]. No entanto, a precisão depende das propriedades acústicas do meio: variações de temperatura e densidade afetam a velocidade do som e devem ser compensadas por calibração adequada [60].

6 Resultados

Este capítulo começa com o diagrama P&ID, que ajuda a visualizar a rede de condensados da UFAA e os pontos de amostragem. Seguem-se os resultados das análises laboratoriais e das medições de caudais, com a respetiva interpretação. Os dados são apresentados de forma clara e organizada.

6.1 Rede de condensados

De acordo com o plano de ação, foi realizada a análise dos pontos de origem dos condensados, bem como dos trajetos das tubagens que os conduzem até ao tanque de recolha (A-060b). Foram também identificados as linhas de distribuição após o tanque e os respetivos destinos finais. Todo o trabalho de campo decorreu em colaboração com o Eng. Oliveira Marques (responsável pelo gabinete técnico) e permitiu elaborar o diagrama apresentado na Figura 22.

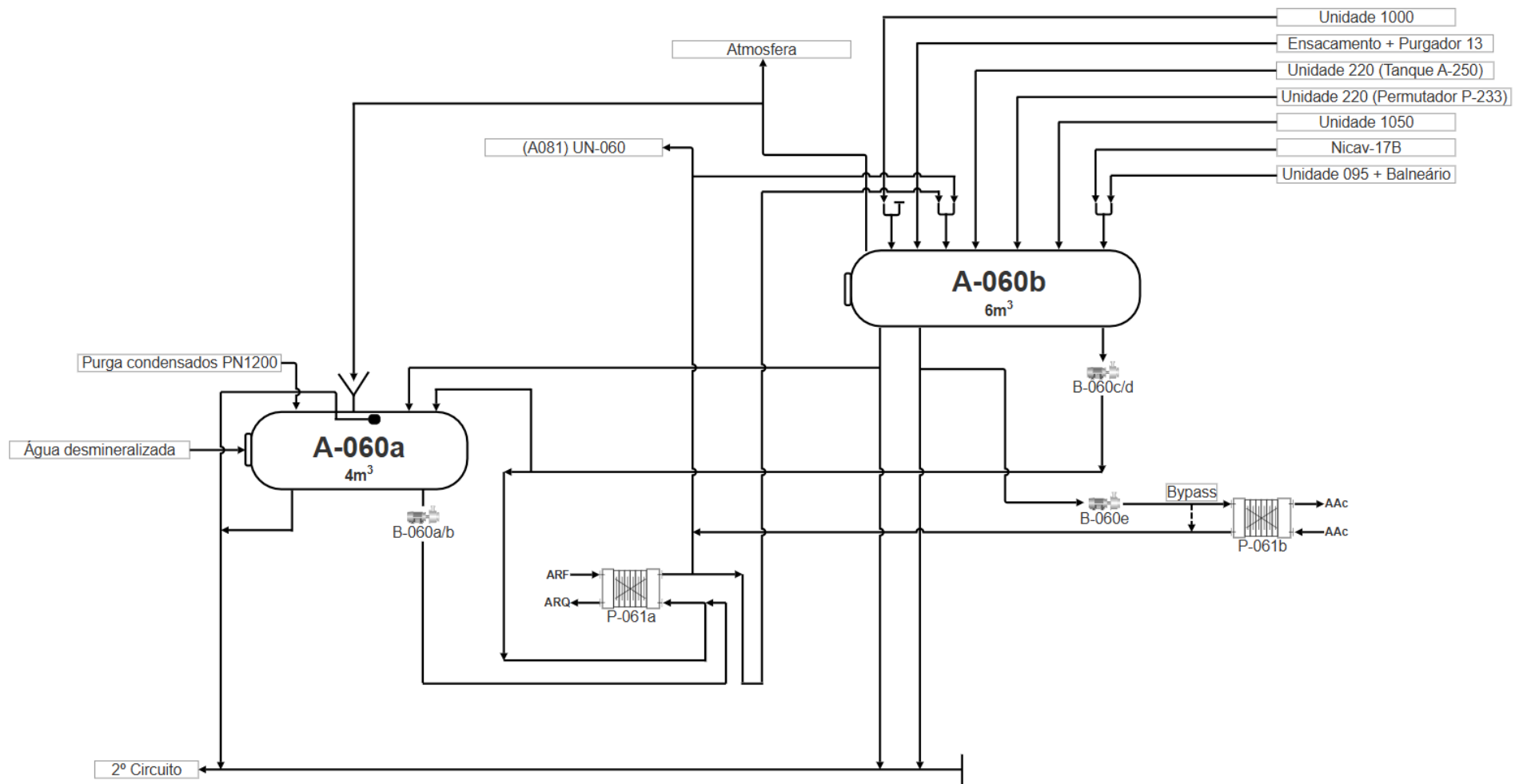


Figura 22 - Rede de recolha e distribuição de condensados.

Todo o condensado gerado na UFAA é recolhido no tanque A-060b, conforme visto ilustrado na Figura 15 capítulo 4 “Recuperação de condensados”. Este tanque conta com 8 entradas e 7 saídas.

As principais fontes de condensado são as unidades de produção de adubos sólidos: Unidade 1000, Unidade 220 e Unidade 1050. A válvula NICA V 17-B, da unidade de ácido nítrico, esco a água das serpentinas do reator e só funciona durante os arranques da fábrica, mas quando está ativa gera grandes volumes de água. As contribuições menos relevantes vêm da Unidade 095, da área de ensacamento e do purgador 13. Esta identificação foi feita com base nas informações do Eng. Miguel Ribeiro e dos operadores da fábrica.

O tanque A-060b tem quatro linhas principais de saída, com cinco destinos possíveis. Na parte superior (conforme ilustrado na Figura 22), existe uma saída tipo escape para a atmosfera, com uma ramificação ligada ao tanque A-060a (capacidade de 4 m³), que ajuda a equilibrar os níveis entre tanques e evita transbordos. Na parte inferior, há três linhas principais. A da esquerda pode encaminhar os condensados para o tanque A-060a ou, através de um jogo de válvulas, para o segundo circuito de água de refrigeração. Em funcionamento normal, apenas é feita a passagem entre tanques, de forma manual pelos operadores, e a ligação ao segundo circuito permanece fechada.

Ao lado, há outra saída que se ramifica em duas: uma leva diretamente ao segundo circuito de água de refrigeração e outra ao permutador P-061b. Normalmente, a válvula para o segundo circuito está fechada, permitindo que os condensados sigam para o permutador. A terceira e última saída encaminha os condensados para o permutador P-061a, com uma ramificação intermédia para o tanque auxiliar A-060a (de emergência), que normalmente também se encontra fechada.

Relativamente aos permutadores, o P-061b encontra-se à direita e o P-061a à esquerda. O P-061b, instalado em 2018, promove a troca térmica entre os condensados e a água de alimentação das caldeiras, contribuindo para a redução do consumo de gás natural. Já o P-061a é responsável por arrefecer os condensados antes da sua utilização como água de processo na unidade de ácido nítrico (UN-060). Esta troca térmica ocorre com a água do segundo circuito de refrigeração, garantindo que os condensados chegam à torre de absorção a baixa temperatura, condição essencial para a eficiência do processo.

6.2 Primeira recolha

Durante a recolha das primeiras amostras, a unidade de nitrato de cálcio (UN-1050) encontrava-se parada devido a avaria, tal como a unidade de adubos sólidos (UN-1000), que estava inativa por ausência de necessidade de produção. Para além disso, devido à ausência de conhecimento técnico sobre os pontos exatos de recolha, a primeira amostragem foi realizada pelos operadores da ADP, já familiarizados com os locais e com o procedimento. Os resultados da primeira amostragem encontram-se na Tabela 6: Tabela 6- Resultados da primeira amostragem

Tabela 6- Resultados da primeira amostragem

Parâmetro	Unidades	A-060b
pH	-	8
Condutividade	µs/cm	8,7
Amónia (NH ₄ ⁺)	mg/L	2,4
Cloretos (Cl ⁻)	mg/L	7,1
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	2,2
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	182
Fosfatos (P ₂ O ₅)	mg/L	0,7

A amostra do tanque de condensados (A-060b) apresenta pH 8, valor adequado para água de alimentação de caldeiras, já que se privilegia um meio ligeiramente alcalino para reduzir riscos de corrosão. A presença de fosfatos (0,7 mg/L) em baixa concentração é esperada, dado que o fosfato trisódico é frequentemente adicionado à água de alimentação para remover o oxigénio dissolvido e prevenir a formação de incrustações nas tubagens [26].

Os teores de sulfatos (2,2 mg/L) e cloretos (7,1 mg/L) são moderados, sem limites normativos definidos para este uso, mas idealmente deveriam ser mínimos ou indetetáveis, devido à sua agressividade sobre superfícies metálicas. Já a amónia (2,4 mg/L) excede ligeiramente o valor desejável (<2 mg/L), podendo representar risco de corrosão em ligas sensíveis como o aço inoxidável [26].

O parâmetro mais crítico é a concentração de nitratos, com 182 mg/L. Este valor é claramente indicativo de contaminação, os nitratos deveriam estar ausentes (citar nitratos). Apesar da condutividade aparente ser baixa (8,7 µS/cm), o valor não é coerente com a carga iónica observada, sobretudo face à elevada concentração de nitratos.

No contexto de reaproveitamento dos condensados como água de alimentação de caldeiras, tal contaminação inviabiliza o uso direto, sendo motivo para descarte ou tratamento específico. No caso da ADP, a presença de nitratos provavelmente tem origem na unidade de produção de ácido nítrico e resulta de alguma falha de isolamento no sistema.

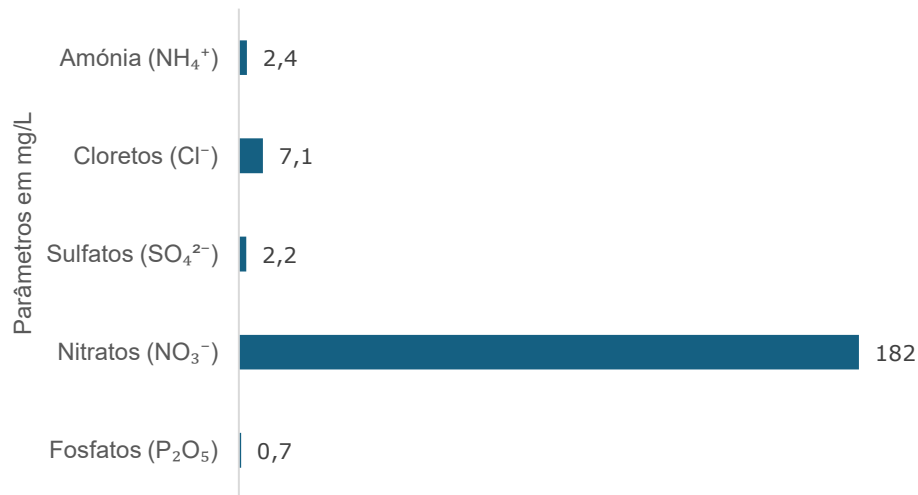


Figura 23 - Valores dos compostos dissolvidos na amostra A-060b

Nota 6: Parâmetros como pH e condutividade foram excluídos do gráfico por não representarem concentrações de massa. A distribuição dos compostos em mg/L apresentada servirá de base para avaliar a coerência entre carga iónica e condutividade medida.

A condutividade elétrica da amostra depende de vários fatores, entre os quais se destacam a concentração iónica, o pH e a temperatura. O aumento da temperatura favorece a mobilidade dos iões em solução, elevando a condutividade medida, razão pela qual se adota, por convenção, a correção para 25 °C, permitindo comparações consistentes entre amostras [26]. Como a temperatura não foi registada, essa correção foi assumida para efeitos de análise.

O pH foi medido e apresenta valor de 8, indicando um meio alcalino. Embora não permita correção direta da condutividade, este parâmetro pode influenciar o equilíbrio entre formas iónicas, como entre NH_4^+ e NH_3 , ou entre espécies derivadas dos nitratos, afetando indiretamente a carga iónica observada [26], [40].

Para avaliar a coerência entre a composição química e o valor de condutividade medido, foi estimada a condutividade específica de cada ião identificado.

Tabela 7 - Condutividade específica da primeira amostragem.

Amónia (NH₄⁺)	9,78
Nitratos (NO₃⁻)	209,89
Sulfatos (SO₄²⁻)	3,66
Cloretos (Cl⁻)	15,28
Ácido fosfórico (H₃PO₄)	0,43
Total (µS/cm)	239,04

Segundo os valores obtidos de condutividade específica, esta amostragem deveria ter um valor de condutividade de 239,04 µS/cm. Os iões que mais contribuem para a condutividade elétrica são os nitratos (NO₃⁻), com 209,89 µS/cm, seguidos pelos cloretos (Cl⁻) com 15,28 µS/cm e pela amónia (NH₄⁺) com 9,78 µS/cm. Os sulfatos (SO₄²⁻) e o ácido fosfórico (H₃PO₄) apresentam condutividades específicas muito inferiores, de 3,66 µS/cm e 0,43 µS/cm, respetivamente, tendo impacto marginal no valor total. Note-se que o ácido fosfórico foi considerado nos cálculos por ser a forma resultante da reação do pentóxido de fósforo (P₂O₅) com água, embora a análise laboratorial tenha quantificado apenas o P₂O₅.

Face a esta distribuição, a condutividade elétrica medida de 8,7 µS/cm revela-se incompatível com a presença de iões de elevada condutividade, como os nitratos. Esta incoerência sugere possíveis falhas na medição, na amostragem ou na identificação química, sendo recomendável repetir as análises para validação. Todos os valores utilizados foram corrigidos para 25 °C, conforme prática técnica estabelecida.

Face aos resultados incoerentes obtidos na primeira amostragem, e ao facto de esta não ter sido realizada pelo autor, foi efetuada uma segunda recolha. Com o objetivo de avaliar os diferentes pontos de geração de condensados, foram visitadas as respetivas áreas para verificar a possibilidade de recolha individualizada. Como nem todos os pontos permitem esse tipo de amostragem, a segunda recolha foi realizada nos locais acessíveis: o tanque A-250, da unidade 220, e a unidade de nitrato de cálcio UN-1050.

6.3 Segunda Recolha

Na segunda recolha de amostras, as principais diferenças em relação à primeira foram a realização da recolha pelo autor e o funcionamento da unidade de nitrato de cálcio (UN-1050), já reparada. Durante essa recolha, verificou-se que os condensados da UN-1050 estavam a ser encaminhados diretamente para o chão, em vez de para o tanque de recolha A-060b. Os resultados da segunda amostragem encontram-se na Tabela 8:

Tabela 8 - Resultados da segunda amostragem.

Parâmetro	Unidades	A-060b	A-250	UN-1050
pH	-	4,9	4,5	9,3
Condutividade	µs/cm	36	74	21
Amónia (NH ₄ ⁺)	mg/L	0	0	0
Cloretos (Cl ⁻)	mg/L	7,1	3,6	3,6
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	2,5	3,9	2,5
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	0	68	7,6
Fosfatos (P ₂ O ₅)	mg/L	1,5	0,8	1

De forma geral, os resultados obtidos no tanque de condensados A-060b apresentam limitações face aos requisitos para reaproveitamento como água de alimentação de caldeiras. O pH registado foi de 4,9, abaixo do valor mínimo desejável (>7), e a condutividade elétrica atingiu 36 µS/cm, excedendo o limite recomendado (<10 µS/cm). Embora não tenham sido detetados nitratos nem amónia, o que é favorável, observam-se concentrações de fosfatos (1,5 mg/L), cloretos (7,1 mg/L) e sulfatos (2,4 mg/L), que, apesar de moderadas, deveriam idealmente estar ausentes ou em níveis residuais. Estes resultados indicam uma composição com tendência ácida e mineralização relevante, o que compromete, nesta fase, a adequação direta dos condensados para uso em caldeiras sem tratamento adicional [26].

Virando a atenção para os dois pontos de geração de condensados que podem ser individualmente analisados, o tanque A-250 da unidade 220 e a unidade de nitrato de cálcio UN-1050, observa-se que ambos apresentam perfis físico-químicos distintos, com implicações diretas na qualidade final dos condensados recolhidos no tanque A-060b. O tanque A-250 apresenta pH ácido (4,5), condutividade elevada (74 µS/cm) e uma carga iónica significativa, com destaque para os nitratos (68 mg/L), que ultrapassam claramente o limite admissível (idealmente 0 mg/L).

Os cloretos (3,6 mg/L) e sulfatos (3,9 mg/L) estão presentes em níveis que, embora moderados, não satisfazem os critérios ideais de ausência ou concentração mínima. Já os fosfatos (0,8 mg/L), apesar de não serem desejáveis, não representam um valor alarmante, uma vez que compostos como o fosfato trisódico são utilizados no tratamento de água para remoção de oxigênio dissolvido. Idealmente, a concentração seria nula, mas valores próximos de 1 mg/L são toleráveis neste contexto. Este perfil torna os condensados do tanque A-250 preocupantes uma vez que apresentam contaminação [26], [40].

Já a unidade UN-1050 apresenta pH alcalino (9,3), o que é favorável, mas registra condutividade de 21 $\mu\text{S}/\text{cm}$, acima do limite desejável ($<10 \mu\text{S}/\text{cm}$). Os nitratos (7,6 mg/L) continuam a representar um fator limitante, e os cloretos (3,6 mg/L), sulfatos (2,5 mg/L) e fosfatos (1 mg/L) mantêm-se em níveis não ideais. No entanto, a presença de fosfatos em concentrações próximas de 1 mg/L não é considerada alarmante, pelo mesmo motivo mencionada anteriormente [26], [40].

Entre os dois, o tanque A-250 parece ter maior influência sobre o A-060b, tanto pela carga iônica mais expressiva como pela ligação efetiva ao sistema de recolha. Além disso, é um dos pontos com maior geração de condensados, o que contribui para que a composição final do tanque A-060b se aproxime dos seus parâmetros. Por outro lado, a unidade UN-1050, embora também seja ponto gerador, não contribuiu diretamente para o A-060b, derivado da razão no início deste tópico que limita a sua representatividade.

Dando continuidade à análise, procede-se à comparação entre a primeira e a segunda amostragem do tanque A-060b, realizada na sequência da identificação de incoerências na recolha inicial. Os resultados encontram-se sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação entre a primeira e segunda recolha do tanque de condensados A-060b.

Parâmetro	Unidades	1º Amostragem	2º Amostragem
pH	-	8	4,9
Condutividade	$\mu\text{S}/\text{cm}$	8,7	36
Amónia (NH_4^+)	mg/L	2,4	0
Cloretos (Cl^-)	mg/L	7,1	7,1
Sulfatos (SO_4^{2-})	mg/L	2,2	2,5
Nitratos (NO_3^-)	mg/L	182	0
Fosfatos (P_2O_5)	mg/L	0,7	1,5

Observa-se que o pH na primeira amostragem é alcalino (8), enquanto na segunda amostragem é ácido (4,9). Esta diferença pode estar associada à ausência de amônia na segunda recolha, o que representa um fator positivo, apesar da descida do pH. A condutividade na primeira amostragem revela-se incoerente face aos iões identificados, como já discutido. Na segunda amostragem, o valor de condutividade de 36 $\mu\text{S}/\text{cm}$ não aparenta apresentar incoerências face ao perfil iónico observado. No entanto, essa compatibilidade será verificada mais adiante, através do cálculo da condutividade específica, permitindo confirmar se a medição foi devidamente representativa.

Os cloretos mantêm-se estáveis entre as duas amostragens, enquanto os sulfatos aumentam 0,3 mg/L e os fosfatos 0,8 mg/L. O ligeiro aumento dos cloretos, aliado à ausência de amônia, pode contribuir para o pH mais ácido observado na segunda amostragem [26], [40]. Em síntese, a segunda amostragem apresenta maior coerência analítica, reforçando a importância de procedimentos adequados de recolha para garantir a fiabilidade dos resultados.

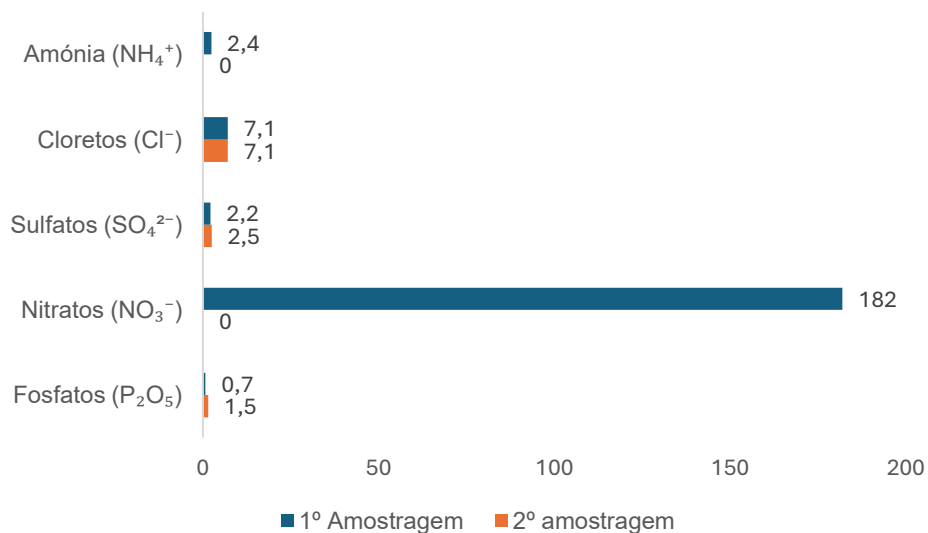


Figura 24 - Comparação entre a primeira e segunda amostragem do tanque A-060b.

Nota 7: Parâmetros como pH e condutividade foram excluídos do gráfico por não representarem concentrações de massa. A distribuição dos compostos em mg/L apresentada servirá de base para avaliar a coerência entre carga iónica e condutividade medida.

Tal como na primeira amostragem, a condutividade elétrica da amostra depende de fatores como a concentração iónica, o pH e a temperatura. Embora o pH tenha variado entre amostragens, a temperatura não foi registada em nenhuma das recolhas. Assim, mantém-se a correção convencional para 25 °C, conforme recomendado na literatura [26], [40]., permitindo comparações consistentes entre os valores obtidos.

O pH foi medido e apresenta valor de 4,9, indicando um meio ácido. Segundo Boiler Water Treatment de Colin Frayne, condições ácidas aumentam a carga iónica ao favorecer a dissociação de ácidos fracos e a presença de H⁺, o que intensifica a condutividade elétrica da água. Esse efeito é relevante para espécies como H₃PO₄, que se dissocia maioritariamente em H₂PO₄⁻ a este pH, contribuindo para a condutividade observada. Para avaliar a coerência entre composição química e condutividade medida, foi estimada a condutividade específica de cada ião identificado [26], [40].

Tabela 10 - Condutividade específica da segunda amostragem

Amónia (NH₄⁺)	0
Nitratos (NO₃⁻)	0
Sulfatos (SO₄²⁻)	4,16
Cloretos (Cl⁻)	15,28
Ácido fosfórico (H₃PO₄)	1,03
Total (µS/cm)	20,67

Na amostragem A-060b, foi registada uma condutividade elétrica de 36 µS/cm. Entre os iões identificados, o cloreto (Cl⁻) apresenta a maior condutividade específica (15,28 µS/cm), seguido pelos sulfatos (SO₄²⁻), com contribuição moderada (4,16 µS/cm). O ácido fosfórico (H₃PO₄) tem condutividade residual (1,03 µS/cm) e não foram detetados nitratos nem amónia. Considerando as concentrações reais e o pH de 4,9, é expectável a predominância da forma H₂PO₄⁻, o que reforça a compatibilidade entre os iões presentes e o valor medido. A análise sugere que a condutividade observada é coerente com o perfil iónico da amostra, confirmando a sua baixa mineralização [26], [40].

Ainda assim, é importante reconhecer que a diferença entre a condutividade estimada e o valor medido pode refletir a presença de iões não quantificados, como bicarbonatos, compostos orgânicos ionizáveis ou vestígios metálicos, que não foram incluídos nos cálculos, mas podem contribuir para a condutividade elétrica [26], [40]. Adicionalmente, existe sempre uma margem de incerteza associada à medição laboratorial, tanto na determinação da condutividade como na quantificação dos iões, o que deve ser considerado na interpretação dos resultados.

Por fim, realizou-se uma terceira recolha, assegurando que todas as unidades da fábrica se encontravam em funcionamento e que os condensados da UN-1050 (unidade de produção de nitrato de cálcio) estavam efetivamente a ser encaminhados para o tanque de condensados. Esta prática permite obter uma amostragem representativa do funcionamento global da instalação, refletindo a composição real dos condensados em condições operacionais completas. A recolha em regime integral contribui para uma avaliação mais fiável da qualidade da água, identificando potenciais interferências entre unidades e garantindo que os dados obtidos são relevantes para decisões técnicas e ambientais.

6.4 Terceira Recolha

Na terceira recolha de amostras, a principal diferença em relação à segunda foi o funcionamento de todas as unidades fabris, conforme referido anteriormente. Verificou-se que os condensados da UN-1050 não conseguiam alcançar o tanque de recolha, ficando retidos numa parte inicial da tubagem. Esta situação foi comunicada aos responsáveis, que prontamente iniciaram a investigação. Os resultados da segunda amostragem encontram-se na Tabela 11:

Tabela 11 - Resultados da terceira recolha

Parâmetro	Unidades	A-060b	A-250	UN-1050
pH	-	6,2	4,5	9,3
Condutividade	µs/cm	3,4	74	21
Amónia (NH ₄ ⁺)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ
Cloretos (Cl ⁻)	mg/L	7,1	3,6	11
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	19	22	24
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ
Fosfatos (P ₂ O ₅)	mg/L	0,2	0,1	0,1

De forma geral, os resultados obtidos na amostragem do tanque de condensados A-060b apresentam limitações face aos requisitos para reaproveitamento como água de alimentação de caldeiras. O pH registado foi de 6,2, abaixo do valor mínimo desejável (>7), o que indica um meio ainda ligeiramente ácido. A condutividade elétrica medida foi de 3,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dentro do intervalo recomendado (<10 $\mu\text{S}/\text{cm}$), o que à primeira vista sugere baixa mineralização. No entanto, este valor parece discrepante face à concentração de sulfatos registada (19 mg/L), que é elevada para este tipo de aplicação e deveria idealmente estar ausente ou em níveis residuais.

Embora não tenham sido detetados nitratos nem amónia, o que é favorável, observam-se concentrações de cloretos (7,1 mg/L) e fósforo (0,2 mg/L). Neste último caso, a presença de fosfatos em concentrações próximas de 0,2 mg/L não representa qualquer limitação técnica, sendo até compatível com práticas industriais que utilizam fosfato trisódico para remoção de oxigénio dissolvido. Estes resultados sugerem uma composição com presença significativa de sais dissolvidos e possíveis inconsistências entre os parâmetros físico-químicos, o que compromete, nesta fase, a adequação direta dos condensados para uso em caldeiras sem tratamento adicional [26], [40].

Virando a atenção para os dois pontos de geração de condensados que podem ser individualmente analisados, o tanque A-250 da unidade 220 e a unidade de nitrato de cálcio UN-1050, observa-se que ambos apresentam perfis físico-químicos distintos, com implicações relevantes para a qualidade dos condensados.

O tanque A-250 apresenta pH de 6,3, ligeiramente abaixo do valor mínimo desejável (>7), e condutividade elétrica de 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$, superior ao limite recomendado (<10 $\mu\text{S}/\text{cm}$). A carga iónica é marcada pela presença de sulfatos (22 mg/L), cloretos (3,6 mg/L) e ausência de nitratos e amónia (<LQ). Foram também detetados fosfatos em concentração mínima (0,1 mg/L), valor que não representa qualquer limitação técnica. Este perfil indica que os condensados do A-250 não cumprem integralmente os requisitos para reaproveitamento direto, sendo necessário considerar tratamento complementar.

Já a unidade UN-1050 apresenta pH de 6,1 e condutividade de 3,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dentro do intervalo recomendado. No entanto, regista concentrações elevadas de sulfatos (24 mg/L) e cloretos (11 mg/L), ambos acima dos níveis desejáveis para água de alimentação de caldeiras.

Não foram detetados nitratos nem amónia (<LQ), e os fosfatos, tal como no A-250, surgem em concentração mínima (0,1 mg/L), sem impacto negativo. Apesar da condutividade baixa, a presença significativa de sais dissolvidos compromete a viabilidade direta dos condensados [26], [40].

Comparando a segunda e terceira amostragem, nota-se uma maior qualidade nos condensados do tanque A-060b quando existem menos unidades em funcionamento (segunda amostragem). Os níveis de amónia (NH_4^+) e de nitratos (NO_3^-) passam de 0 para abaixo do limite de quantificação o que é desejável. O pH sobe de 4,9 para 6,2 aproximando-se de pH alcalino (>7). Existe uma redução de fosfatos de 1,5mg/L para 0,2 mg/L, contudo existe um aumento significativo de sulfatos de 2,5mg/L para 19 mg/L e ainda os cloretos mantiveram o seu valor de 7,1mg/L, ainda acima do ideal (concentração mais baixa possível e idealmente inexistente). Para além disso, novamente a condutividade não parece estar de acordo com a carga iónica sugerindo erros analíticos.

Em síntese, a segunda amostragem, com menor carga fabril, apresentou melhores condições para o reaproveitamento dos condensados, especialmente nos parâmetros mais críticos. A terceira amostragem, embora represente o regime completo de operação, revelou maior concentração de sais dissolvidos, o que pode comprometer a reutilização direta. Estes resultados reforçam a influência do regime fabril na qualidade dos condensados e a necessidade de estratégias de mitigação para garantir o reaproveitamento com segurança e eficiência.

Efetuada agora uma comparação entre as três amostragens do tanque de recolha de condensados (A-060b), nos diversos regimes fabris.

Tabela 12 - Comparação entre as três recolhas do tanque de condensados A-060b

Parâmetro	Unidades	1º Amostragem	2º Amostragem	3º Amostragem
pH	-	8	4,9	6,2
Condutividade	$\mu\text{s}/\text{cm}$	8,7	36	3,4
Amónia (NH_4^+)	mg/L	2,4	0	<LQ
Cloretos (Cl^-)	mg/L	7,1	7,1	7,1
Sulfatos (SO_4^{2-})	mg/L	2,2	2,5	19
Nitratos (NO_3^-)	mg/L	182	0	<LQ
Fosfatos (P_2O_5)	mg/L	0,7	1,5	0,1

Comparando as três amostragens do mesmo local, destaca-se a segunda como a mais favorável ao reaproveitamento dos condensados. Com menor regime fabril, apresentou pH de 4,9 (embora ainda abaixo do ideal), ausência de NO_3^- e NH_4^+ , e condutividade compatível com a carga iônica. Já a terceira, apesar de melhorias no pH (6,2) e na redução de P_2O_5 (0,1 mg/L), revelou aumento expressivo de SO_4^{2-} (19 mg/L), sugerindo maior carga salina. A primeira amostragem, embora com pH ideal (8), apresentou níveis críticos de NO_3^- (182 mg/L) e NH_4^+ (2,4 mg/L), comprometendo a qualidade. Os dados de condutividade da primeira e terceira amostragem não refletem a composição iônica, indicando erro analítico.

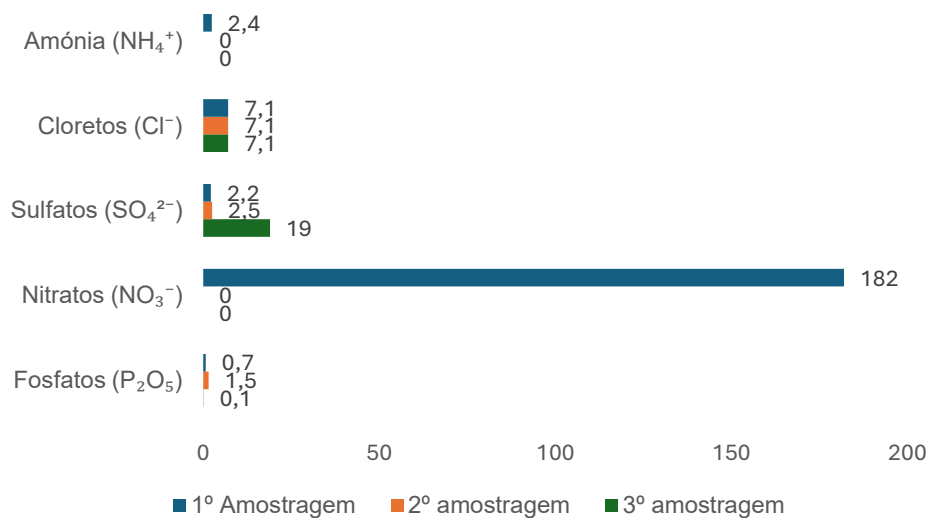


Figura 25 – Comparação entre as três recolhas do tanque A-060b

A um pH de 6,2 e temperatura de 25 °C, a água encontra-se ligeiramente ácida, o que pode favorecer a dissociação de ácidos fracos e aumentar a presença de H^+ . Segundo Boiler Water Treatment de Colin Frayne, essa condição intensifica a condutividade elétrica, especialmente quando há espécies como H_3PO_4 , que se dissocia em H_2PO_4^- , contribuindo para a carga iônica. O Nalco Water Handbook reforça que a condutividade é diretamente proporcional à concentração de íons móveis, sendo os cloretos e sulfatos os principais responsáveis em sistemas industriais [26], [40].

Já o Steam Plant Operation alerta que medições incoerentes entre condutividade e composição química devem ser reavaliadas, pois podem comprometer decisões operacionais. A 25 °C, a condutividade esperada deve refletir fielmente os sais dissolvidos presentes.

Tabela 13 - Condutividade específica da terceira recolha.

Amónia (NH₄⁺)	0
Nitratos (NO₃⁻)	0
Sulfatos (SO₄²⁻)	31,65
Cloretos (Cl⁻)	15,28
Ácido fosfórico (H₃PO₄)	0,14
Total (µs/cm)	47,07

Entre os iões presentes na amostra, os que mais influenciam na condutividade são os sulfatos (SO₄²⁻) e os cloretos (Cl⁻), devido à sua elevada concentração e forte capacidade de condução elétrica, com condutividades específicas de 31,65 µS/cm e 15,28 µS/cm, respetivamente. Já os fosfatos (P₂O₅), nitratos (NO₃⁻) e amónio (NH₄⁺) têm influência muito reduzida ou nula, seja pela baixa concentração ou pela natureza química [26], [40]. Como podemos verificar pelos cálculos efetuados, as suspeitas de que a condutividade obtida (3,4 µS/cm) não é representativa da amostra são justificadas, sendo um valor mais plausível próximo de 47 µS/cm.

6.5 Medições de Caudal

As medições dos caudais foram realizadas pelos operadores da Contimetra nas instalações da ADP, em Alverca do Ribatejo. No total, foram monitorizados 16 pontos distintos ao longo da rede de condensados.

Esta cobertura permitia quantificar os volumes que entram no tanque de condensados, os que dele saem e os que são desviados para o segundo circuito de refrigeração e para a unidade de ácido nítrico. Com base nestes dados, torna-se possível estabelecer um balanço hidráulico fiável do sistema. Os caudais medidos podem ser encontrados na Figura 26 que se encontra abaixo:

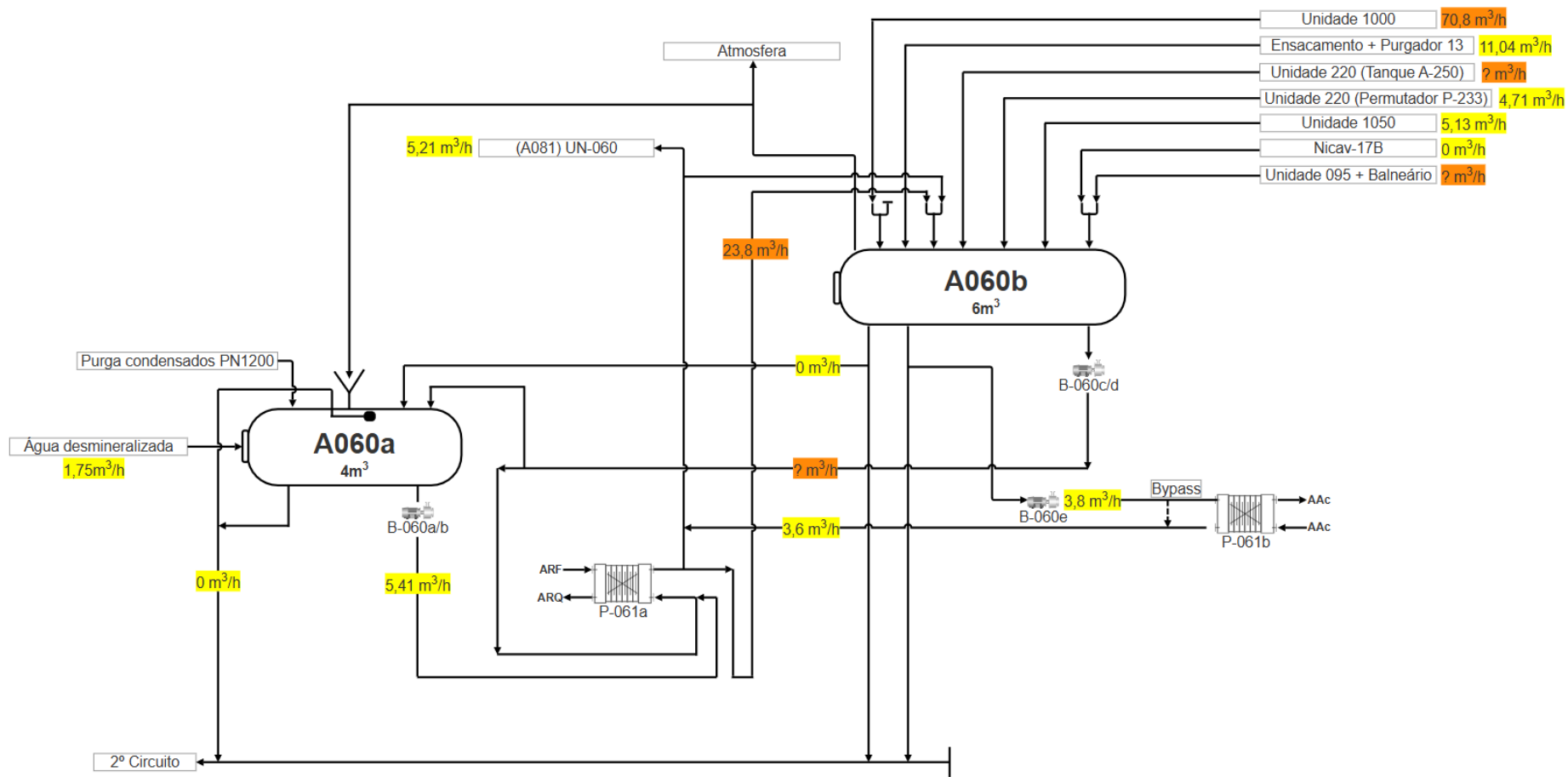


Figura 26 – Medição de caudais nos diversos pontos.

Com base na Figura 26, é possível observar diversos caudais assinalados a amarelo e vermelho. Os valores destacados a amarelo correspondem a medições consideradas válidas, realizadas sem qualquer interferência ou erro por parte do equipamento. Já os valores apresentados a vermelho referem-se a medições irrealistas ou a situações em que não foi possível obter dados fiáveis.

No entanto, é importante sublinhar que os valores assinalados a amarelo apenas indicam que o equipamento funcionou corretamente durante a leitura. Isso não significa, necessariamente, que os dados obtidos refletem com precisão a realidade do processo. Um exemplo claro é o caso do ensacamento e do purgador 13. Pelo conhecimento do processo, da trajetória do vapor e da sua utilização nesses pontos, nomeadamente em pequenas trocas de calor em radiadores e na fase de embalamento, sabemos que a quantidade de condensados gerada é muito reduzida. Assim, o valor registado de 11,04 m³/h não se mostra compatível com o que se conhece do funcionamento real.

Outro exemplo é o da unidade 1050. Esta unidade, durante o seu processo de concentração, gera uma quantidade significativa de condensados. No entanto, trata-se de um processo ainda em fase de consolidação, o que significa que não está totalmente estabilizado. Por esse motivo, o valor apresentado pelo equipamento não pode ser considerado justificável ou representativo da realidade.

Importa referir que nem todas as leituras assinaladas a amarelo devem ser consideradas incorretas. Um exemplo claro é o da válvula Nicav-17b, associada à unidade de produção de ácido nítrico (UN-060). Esta válvula opera exclusivamente durante os arranques da fábrica, permitindo o escoamento dos condensados gerados pelas serpentinas dos tanques enquanto estes ainda não atingiram a temperatura operacional. Assim, é perfeitamente aceitável que, em condições normais, o caudal registado nesta válvula seja de 0 m³/h.

De igual modo, os valores nulos registados entre os dois tanques de condensados, bem como na tubagem que liga o tanque auxiliar (A-060a) ao segundo circuito, são coerentes com a realidade operacional, uma vez que as válvulas se encontravam fechadas durante o período de medição. Por outro lado, os valores registados após as bombas B-060a/b, nomeadamente um caudal de 5,41 m³/h, revelam-se plausíveis, tendo em conta que estas bombas possuem uma capacidade máxima de 6 m³/h.

O mesmo se aplica à bomba B-060e, cuja operação se sabia estar a decorrer em níveis baixos face à sua capacidade nominal (10 m³/h). Relativamente aos valores assinalados a vermelho, como já mencionado, estes refletem tanto erros de medição do equipamento como leituras completamente incongruentes. Destaca-se, neste contexto, o caso da unidade 1000, que apresenta um caudal de 70,79 m³/h. Este valor é manifestamente irrealista no âmbito do processo da ADP, pois corresponderia a cerca de 1 698,96 m³/h por dia apenas para esta unidade, um volume absolutamente incompatível com a realidade.

Ainda que esta seja, de facto, a unidade que mais gera condensados, as dimensões da tubagem, bem como a capacidade dos tanques e das bombas associadas, não permitem o escoamento de água nestes volumes. Adicionalmente, o esquema de distribuição da rede de vapor indica que apenas 0,75 t/h são dirigidas para esta unidade, tornando este valor ainda mais incongruente. Outro exemplo de valor completamente irrealista é o de 23,83 m³/h. Este resultado não se considera apenas incorreto pelo volume indicado pelo equipamento, mas também pelas limitações físicas da infraestrutura envolvida. A tubagem em questão possui apenas uma polegada e um quarto de diâmetro, o que inviabiliza, do ponto de vista técnico, a passagem de tal quantidade de água. A incompatibilidade entre a dimensão da tubagem e o caudal registado evidencia, de forma clara, um erro de medição ou uma falha na leitura dos dados.

7 Considerações Finais

O estudo teve início com a elaboração do diagrama P&ID da rede de condensados (Figura 22), até então inexistente, o que dificultava uma compreensão integrada do sistema. Este tipo de representação é essencial para garantir uma visão clara e padronizada, facilitando a operação, a manutenção e a identificação de pontos críticos como purgadores, válvulas e trajetos de retorno [62]. Para construir o diagrama, foi realizado um levantamento direto no local, seguindo as tubagens desde os pontos de origem até os locais de descarga. Esse processo permitiu identificar todos os elementos da rede, incluindo dispositivos como válvulas e purgadores, embora alguns não estejam representados na Figura 22 por motivos de simplificação visual.

Durante a elaboração, ficou evidente a complexidade e a desorganização da rede de condensados da UFAA, até então pouco compreendida. Foram identificadas falhas na montagem de válvulas e nos isolamentos, com setas de fluxo orientadas no sentido errado, o que comprometia a leitura e interpretação do sistema. Essas inconformidades foram comunicadas aos setores responsáveis, juntamente com um plano de ações corretivas para alinhar a sinalética e a disposição das tubagens ao novo esquema definido. Além disso, o P&ID foi fundamental para compreender os fluxos de origem e destino dos condensados, permitindo identificar com precisão os pontos geradores e os locais de desaguamento. A representação também facilitou a organização das medições de caudal de forma lógica e segura, contribuindo diretamente para a análise crítica dos resultados obtidos. Sem esse diagrama, todo o processo teria sido significativamente mais difícil e sujeito a interpretações equivocadas.

Na primeira amostragem realizada, o pH registrado foi de 8, um valor adequado para condensados, o que à partida é um bom indicador. No entanto, os resultados revelaram concentrações elevadas de cloretos (7,1 mg/L) e, de forma particularmente preocupante, um valor extremamente alto de nitratos (182 mg/L), sugerindo uma contaminação significativa. Para além disso, a condutividade medida (8,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$) não é compatível com o perfil iónico da amostra, especialmente tendo em conta os teores de nitratos, cloretos, sulfatos e amónia todos eles contribuindo para a condutividade elétrica.

Esta incoerência levanta três hipóteses principais: (i) a amostragem pode ter sido incorretamente executada, uma vez que foi realizada por operadores e não pelo autor; (ii) os valores de condutividade e nitratos podem ter sido mal quantificados; ou (iii) apenas um dos dois parâmetros está incorreto. É importante notar que a condutividade também é influenciada pela temperatura e pelo pH. Embora o pH tenha sido registrado, a temperatura foi assumida como 25 °C, o que pode introduzir uma variação de cerca de 2% na condutividade, insuficiente, contudo, para justificar a discrepância observada.

Considerando que nitratos derivam do ácido nítrico, duas fontes possíveis foram identificadas: a unidade de produção de ácido nítrico (por fuga ou arraste) ou a unidade de adubos sólidos (220/270), que utiliza ácido nítrico no processo e se encontrava em operação no momento da amostragem, ao contrário da unidade 1000, que estava parada. A presença de nitratos nos condensados representa um risco sério: além de favorecer a corrosão nas caldeiras, pode levar à formação de sais que se acumulam nas superfícies metálicas, reduzindo a eficiência da transferência térmica e comprometendo a integridade do sistema [26], [40].

A segunda amostragem foi realizada com o intuito de verificar os resultados obtidos na primeira, que apresentava inconsistências evidentes e levantava dúvidas quanto à fiabilidade dos dados. Embora o regime fabril se tenha mantido constante, a recolha foi desta vez conduzida por mim, garantindo maior rigor no processo. Para além do tanque de condensados, procurou-se isolar ao máximo os pontos geradores, tendo sido possível recolher amostras de dois locais específicos: o tanque A-250, da unidade 220, e a UN-1050, unidade de nitrato de cálcio.

Nesta amostragem do tanque de condensados, não foram detetados nitratos nem amónia. Verificou-se também uma descida acentuada do pH, de 8 para 4,9, e a condutividade apresentou um valor coerente com o perfil iónico da amostra, sem inconsistências. Com base nestes dados, não é possível afirmar com certeza se a contaminação observada na primeira amostragem foi real ou resultado de erro analítico. No entanto, tudo indica que possa ter havido falhas na quantificação, especialmente considerando que a primeira recolha foi feita por operadores.

Além disso, foi possível perceber que o tanque A-250 tem maior influência na composição dos condensados do tanque A-060b do que a unidade UN-1050. Este comportamento deve-se, por um lado, ao maior volume de condensados gerado pela unidade de adubos sólidos e, por outro, à constatação de que os condensados da UN-1050 estavam a ser purgados diretamente para o chão, em vez de encaminhados para o tanque A-060b, o que compromete a representatividade da mistura final.

A terceira amostragem foi realizada com todas as unidades fabris em funcionamento, com o objetivo de avaliar o impacto do regime completo na composição dos condensados. Tal como nas amostragens anteriores, foram recolhidas amostras nos pontos principais, e desta vez não se detetaram nitratos nem amónia em nenhum dos locais, o que é um resultado positivo.

No tanque A-060b, observou-se uma subida do pH de 4,9 para 6,2, indicando uma melhoria na qualidade dos condensados. No entanto, surgiu um novo valor discrepante, desta vez nos sulfatos, que atingiram 19 mg/L. A condutividade medida (3,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) não acompanha o perfil iónico da amostra, o que sugere um possível erro na sua quantificação. Considerando que todos os pontos de amostragem apresentaram teores elevados de sulfatos, é mais plausível que o erro tenha ocorrido na medição da condutividade, e não na análise dos sulfatos.

A origem dos sulfatos nos condensados não é fácil de determinar. É possível que tenham sido arrastados por vapores que passaram por permutadores de calor ou tubagens contaminadas, acabando por condensar. Também podem ter resultado de névoas ou separações de fase ineficientes, ou ainda de reações com traços de compostos de enxofre, como tiosulfato ou sulfito [26], [40].

Tal como nas amostragens anteriores, confirmou-se que o tanque A-250 tem maior influência sobre a composição dos condensados do tanque A-060b do que a unidade UN-1050. Nesta terceira amostragem, garantiu-se que os condensados da UN-1050 estavam a ser corretamente encaminhados para o tanque de recolha. No entanto, identificou-se um problema na linha de drenagem: os condensados encontravam-se retidos numa secção inicial da tubagem. Este problema foi devidamente reportado aos responsáveis da manutenção que rapidamente investigaram o problema.

De forma geral, não é possível afirmar com segurança se os condensados analisados são viáveis para reaproveitamento direto como água de alimentação das caldeiras. Os erros analíticos identificados, aliados à variação significativa da composição dos condensados em função do regime fabril, dificultam qualquer decisão definitiva sobre este tema. Com base nos dados obtidos, considera-se que o reaproveitamento direto não é aconselhável. O risco associado é elevado, sobretudo devido à presença intermitente de compostos como nitratos e sulfatos, que representam um potencial de corrosão elevado e podem comprometer a integridade das caldeiras e das tubagens.

Relativamente aos caudais, conclui-se que as medições realizadas não foram bem-sucedidas. Embora a ADP tenha seguido os requisitos técnicos definidos pela Contimetra, diversos fatores não previstos acabaram por comprometer a fiabilidade dos resultados. Entre os principais obstáculos estiveram a presença de purgadores, a ausência de troços retos horizontais com fluxo estável, e a limitação do sensor quanto à leitura de caudais ascendentes ou descendentes. Além disso, a elevada temperatura das tubagens expostas ao sol, combinada com a temperatura dos condensados superior a 100 °C, ultrapassou a capacidade de leitura dos sensores, limitada a 120 °C.

Ainda assim, os caudais medidos à saída das bombas mostraram-se minimamente fiáveis, compatíveis com a capacidade dos equipamentos e com o conhecimento prático do processo.

A ausência de dados fiáveis sobre os caudais dificultou a compreensão global do comportamento da rede de condensados. Sem saber com precisão os volumes que circulam em cada ponto, torna-se impossível estabelecer uma relação direta entre a quantidade de água movimentada e a qualidade observada nas análises. Esta limitação restringe a interpretação integrada dos resultados e impede uma avaliação mais completa do impacto operacional dos contaminantes identificados. Apesar disso, a tentativa de medição permitiu identificar pontos críticos da rede e reforça a importância de uma instrumentação adequada, tema que será abordado no subcapítulo seguinte.

7.1 Oportunidades de melhoria

A presente secção reúne os pontos que, à luz da análise realizada, merecem atenção por parte da empresa. Não se trata de críticas, mas de sugestões fundamentadas que visam reforçar a eficiência, a segurança ou a coerência dos processos observados. Ao destacar estas oportunidades de melhoria, pretende-se contribuir para uma evolução prática e sustentada, alinhada com os objetivos operacionais e com os padrões técnicos aplicáveis.

- **Instrumentação recomendada:**

Ao longo deste trabalho, foi identificado um défice significativo de instrumentação na unidade da ADP Fertilizantes, especialmente em pontos críticos da rede de condensados e do sistema de produção de vapor. A ausência de equipamentos como caudalímetros, barómetros, condutivímetros e termómetros compromete a capacidade de monitorização contínua e impede uma caracterização precisa dos fluxos e das condições operacionais.

A instrumentação industrial desempenha um papel essencial no controlo, segurança e eficiência dos processos produtivos. Ao permitir a medição em tempo real de variáveis como pressão, caudal e condutividade, fornece dados fiáveis que sustentam decisões operacionais fundamentadas e permitem intervenções corretivas imediatas. No contexto específico das redes de condensados e da produção de vapor, quatro instrumentos assumem particular relevância. Os caudalímetros permitem medir o fluxo de água ou vapor, facilitando o balanço hídrico e a deteção de perdas. Os barómetros monitorizam a pressão em pontos estratégicos do sistema, garantindo que o vapor se mantém dentro dos limites operacionais seguros e protegendo os equipamentos contra sobrepressões ou falhas estruturais [63], [64] .

Já os condutivímetros medem a condutividade elétrica da água, um indicador direto da presença de sais dissolvidos. Esta informação é crucial para prevenir fenómenos de incrustação e corrosão nas caldeiras, assegurando a qualidade da água de alimentação e prolongando a vida útil dos equipamentos. Por fim, os termómetros instalados em linha permitem medir a temperatura dos condensados ou do vapor em tempo real, fornecendo dados essenciais para o controlo térmico do processo e para a proteção dos equipamentos [63], [64]. Caso estes instrumentos estivessem disponíveis, teria sido possível comparar os dados laboratoriais com os valores registados em tempo real, aumentando a fiabilidade das análises e permitindo validar ou corrigir desvios.

Como exemplo prático, a instalação de caudalímetros na rede de distribuição de vapor permitiria quantificar com maior precisão a produção de vapor da unidade UFAA. Isso possibilitaria verificar se as estimativas que sustentaram a elaboração da Figura 14, referente ao consumo de vapor na rede, estão corretas ou se carecem de revisão. Relativamente aos condensados, seria possível identificar com exatidão as temperaturas e os volumes gerados em cada ponto da rede, bem como as quantidades encaminhadas para os diferentes equipamentos, o que contribuiria para uma gestão mais racional e transparente dos fluxos internos. Deste modo, recomenda-se fortemente que a ADP Fertilizantes invista na instalação progressiva de instrumentação adequada, começando pelos pontos mais críticos da rede de vapor e condensados.

- Melhoria do isolamento dos condensados:

Na UFAA, verificou-se que a tubagem que conduz os condensados até ao permutador P-061b, responsável pela troca térmica com a água de alimentação das caldeiras, apresenta um isolamento básico, semelhante a esferovite. Nas proximidades do permutador, o isolamento encontra-se degradado e, em algumas secções, está mesmo ausente. O material está visivelmente deteriorado, desfazendo-se ao toque, o que compromete a sua função.

Um bom isolamento térmico é fundamental para minimizar perdas de calor e garantir maior eficiência energética, permitindo que o calor dos condensados seja preservado até ao ponto de transferência pretendido [65]. Dada a distância entre o tanque de recolha de condensados (A-060b) e o permutador P-061, recomenda-se, além do isolamento em lã mineral ou material equivalente, a aplicação de uma camada externa de alumínio. Esta solução contribui para a retenção térmica ao longo do percurso e protege o isolamento principal contra danos mecânicos e ambientais.

- Otimização da Geração e Distribuição de Vapor:

A central de vapor da UFAA apresenta uma configuração básica e tecnologicamente desatualizada, o que limita a eficiência energética do sistema e dificulta o aproveitamento integral dos recursos disponíveis. Face a esta realidade, recomenda-se a realização de um estudo técnico aprofundado com o objetivo de otimizar a operação da central e avaliar a possibilidade de reduzir a quantidade de vapor atualmente produzida, caso se verifique excesso face às necessidades reais da unidade.

Uma das atuações propostas incide diretamente sobre as caldeiras, através da instalação de um condensador destinado ao aproveitamento da água formada na combustão do metano, uma vez que o combustível utilizado é gás natural. Esta medida permitiria recuperar parte da água gerada no processo, contribuindo para a sustentabilidade hídrica e reduzindo a dependência de água externa para alimentação das caldeiras.

Adicionalmente, propõe-se a substituição do turbogerador atualmente em operação (TG-1208), que apresenta sinais de envelhecimento e baixa eficiência. A instalação de um equipamento mais moderno e eficiente permitiria melhorar o aproveitamento energético do vapor gerado, com impacto direto na produção de eletricidade e na gestão térmica da unidade.

Por fim, recomenda-se a realização de um estudo técnico para avaliar a viabilidade da instalação de um segundo turbogerador dedicado ao aproveitamento energético da redução de pressão de vapor de 8 para 4 bar. Esta redução ocorre numa zona já existente e devidamente assinalada na Figura **14**, sendo responsável por alimentar setores como o térmico, as oficinas e outros consumidores internos. No entanto, atualmente não existe qualquer aproveitamento energético associado a esta etapa, o que representa uma oportunidade clara de valorização de energia disponível no processo. A inclusão de um turbogerador nesta zona poderia permitir a recuperação de parte da energia térmica dissipada na redução de pressão, contribuindo para a eficiência global do sistema e para a sustentabilidade energética da unidade.

- Sensibilidade Analítica e Procedimentos:

Recomenda-se à ADP Fertilizantes uma melhoria no processo de recolha e entrega de amostras, com especial atenção às condições práticas e à fiabilidade analítica. Em função do ponto de colheita, o laboratório poderia disponibilizar Equipamento de Proteção Individual (EPI) aos operadores, como luvas, sempre que necessário ou quando não estiverem disponíveis no local. No que diz respeito aos frascos utilizados, recomenda-se a adoção de recipientes adequados à recolha de amostras a alta temperatura, como os de vidro borossilicato ou outros materiais compatíveis. O uso de frascos plásticos de reagentes, mesmo que previamente lavados, não é aconselhável, pois podem libertar compostos invisíveis que interferem nos resultados analíticos e comprometem a fiabilidade das análises.

Além disso, os frascos devem ser devidamente identificados com etiquetas claras e resistentes, garantindo a rastreabilidade da amostra desde a recolha até à análise. Durante este trabalho, verificou-se que alguns frascos estavam em mau estado de conservação, com inscrições feitas à mão com marcador, e em certos casos, continham referências a locais diferentes daqueles onde foram efetivamente recolhidas as amostras. Reforça-se também a importância de manter registos completos de cada amostragem, incluindo data, hora, ponto de recolha, responsável pela operação e temperatura da amostra. Estes dados são essenciais para garantir a coerência dos resultados e permitir uma interpretação técnica rigorosa.

No momento da receção das amostras pelo laboratório, recomenda-se a inclusão de um campo de observações que acompanhe a folha de resultados. Este campo deve conter informações relevantes como o estado de conservação da amostra, as condições ambientais no momento da recolha e o método utilizado, por exemplo, se a amostragem foi realizada com auxílio de mangueira ou diretamente de uma torneira. A presença destas informações é fundamental para a interpretação técnica dos resultados, sobretudo em casos de contaminação inesperada. Se forem detetados valores anómalos, o registo detalhado permite avaliar se a origem da contaminação está associada ao ponto de recolha ou a algum acessório externo utilizado no processo. Nesses casos, pode justificar-se a repetição da amostragem no mesmo local, com condições controladas, para confirmar ou excluir a hipótese de interferência externa e, assim, identificar com maior precisão a fonte do problema.

Sugere-se ainda que os operadores recebam formação específica sobre os procedimentos de recolha, com base nas práticas adotadas durante este trabalho e descritas no subcapítulo 5.2 “Amostragem”. Por fim, recomenda-se uma revisão dos métodos analíticos atualmente utilizados, com especial atenção à determinação de cloretos. Foi observado o mesmo valor de cloretos nas três amostragens do tanque A-060b, o que pode indicar limitações do método em uso ou falta de sensibilidade analítica para variações reais.

- Otimização do circuito de condensados:

Após reunião interna dedicada à análise do circuito de condensados e à apresentação dos resultados obtidos junto dos responsáveis das diferentes unidades, concluiu-se que os valores medidos, com exceção das medições realizadas junto às bombas, não refletem com precisão a realidade do processo na ADP. Com base em estimativas anteriores da própria empresa, calcula-se que o caudal total de condensados não deverá ultrapassar os 10 m³/h.

Dessa reunião resultou a definição de uma norma interna relativa à concentração de N-NH₃ (azoto amoniacal), cujo valor de referência foi revisto de 33 mg/L para ≤250 mg/L. Esta alteração baseia-se numa análise comparativa com o mesmo processo em operação na fábrica de Espanha, permitindo que a unidade UN-060 (fábrica de ácido nítrico) passe a aproveitar integralmente os condensados provenientes da unidade UN-270. A utilização dos condensados do tanque A-060b pela UN-060 fica, assim, limitada a situações pontuais e excecionais.

Com esta mudança, os condensados do tanque A-060b deixam de ser encaminhados para a fábrica de ácido nítrico, ficando disponíveis para outras finalidades. Após confirmação de que esta nova norma já se encontra em vigor, foi realizada uma inspeção visual ao sistema, com o objetivo de verificar o destino atual dos condensados, uma vez que já não são aproveitados pela UN-060. O que se observou encontra-se abaixo na Figura 27:

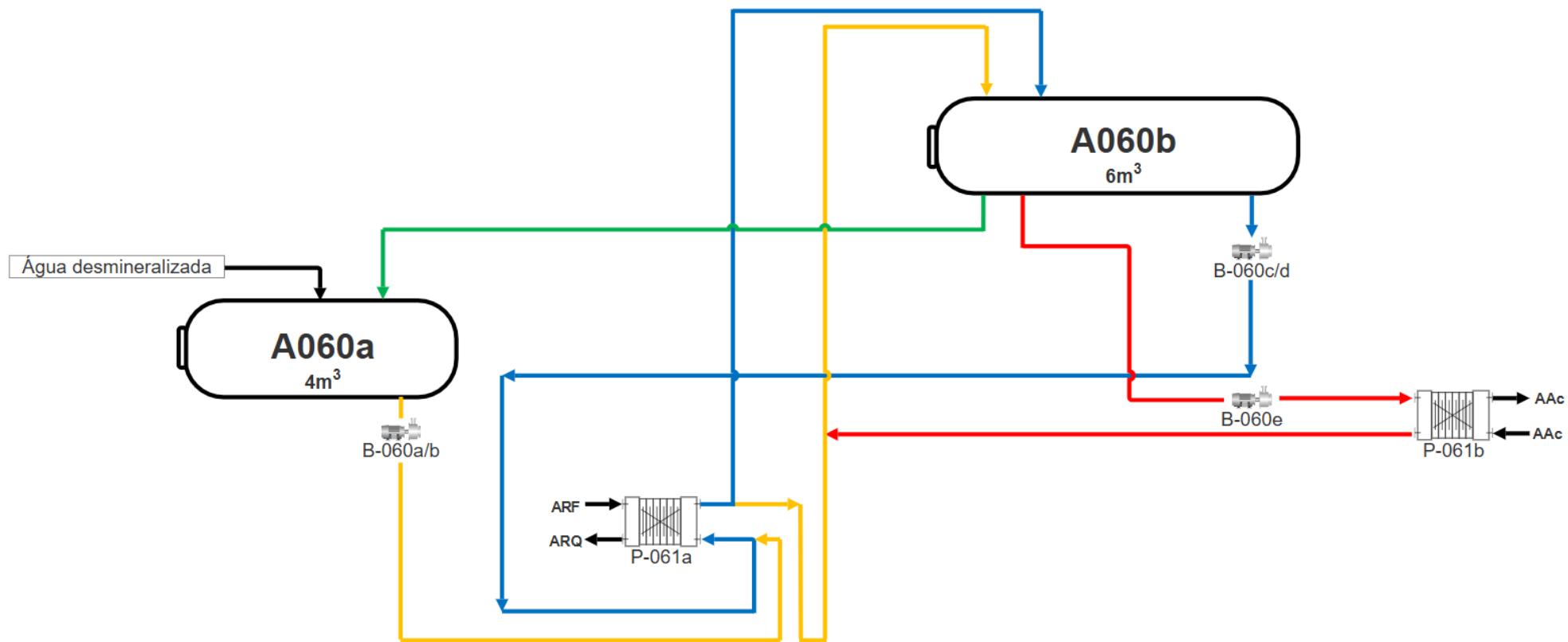


Figura 27 - Percurso dos condensados

Tomando como referência a figura anterior, identificam-se quatro trajetos possíveis para os condensados.

Trajetto azul: Os condensados são direcionados para o permutador P-061a, onde são arrefecidos. Anteriormente, após este processo, seguiam para a unidade de ácido nítrico (UN-060), no entanto, essa via já não está em operação. Atualmente, os condensados continuam a ser arrefecidos no permutador P-061a, mas retornam diretamente ao tanque de recolha de condensados A-060b.

Trajetto vermelho: Os condensados são encaminhados para o permutador P-061b, cuja função é transferir calor dos condensados para a água de alimentação das caldeiras. Após esta troca térmica, os condensados retornam e juntam-se aos provenientes do permutador P-061a, convergindo novamente para o tanque A-060b.

Trajetto verde: Para manter o equilíbrio de níveis entre tanques, parte dos condensados é transferida para o tanque auxiliar A-060a.

Trajetto Laranja: Os condensados do tanque auxiliar A-060a são também enviados para o permutador P-061a, os quais, após o arrefecimento, regressam ao tanque principal de recolha A-060b.

Este sistema apresenta um claro contrassenso: os condensados são arrefecidos no permutador P-061a e P-061b e são devolvidos ao tanque A-060b, o que resulta no arrefecimento simultâneo dos condensados já presentes no tanque e daqueles que nele acabam de chegar. Esta situação é prejudicial não apenas pela redução da temperatura dos condensados (perda de energia), mas também porque compromete a função do permutador P-061b, cuja finalidade é o pré-aquecimento da água de alimentação de caldeiras.

Ao receber e enviar água a uma temperatura inferior à desejada, o permutador deixa de assegurar o rendimento térmico previsto, comprometendo assim a transferência energética necessária para atingir as temperaturas adequadas no processo de alimentação de caldeiras. A solução rápida proposta para este contrassenso, consiste na inativação das bombas B-060a/b e B-060c/d, no encerramento de todas as válvulas de passagem para o tanque A-060a, bem como na interrupção do fluxo de água desmineralizada, uma vez que esta já não é necessária para o processo e apenas contribuiria para a redução da temperatura dos condensados.

Com esta configuração, todos os condensados recolhidos no tanque A-060b passam a ser encaminhados exclusivamente através da bomba B-060e para o permutador P-061b e, garantindo que chegam com a temperatura mais elevada possível. Esta condição favorece uma transferência térmica mais eficiente, permitindo o pré-aquecimento da água de alimentação de caldeiras com maior aproveitamento energético e contribuindo para uma redução significativa no consumo de gás natural.

Após a troca de calor, os condensados arrefecidos são descartados diretamente para o segundo circuito, eliminando recirculações desnecessárias e assegurando uma gestão térmica mais racional e eficaz do sistema. Esta proposta já foi implementada e encontra-se atualmente em funcionamento no sistema de condensados da ADP Fertilizantes e pode ser visualizada na Figura 28.

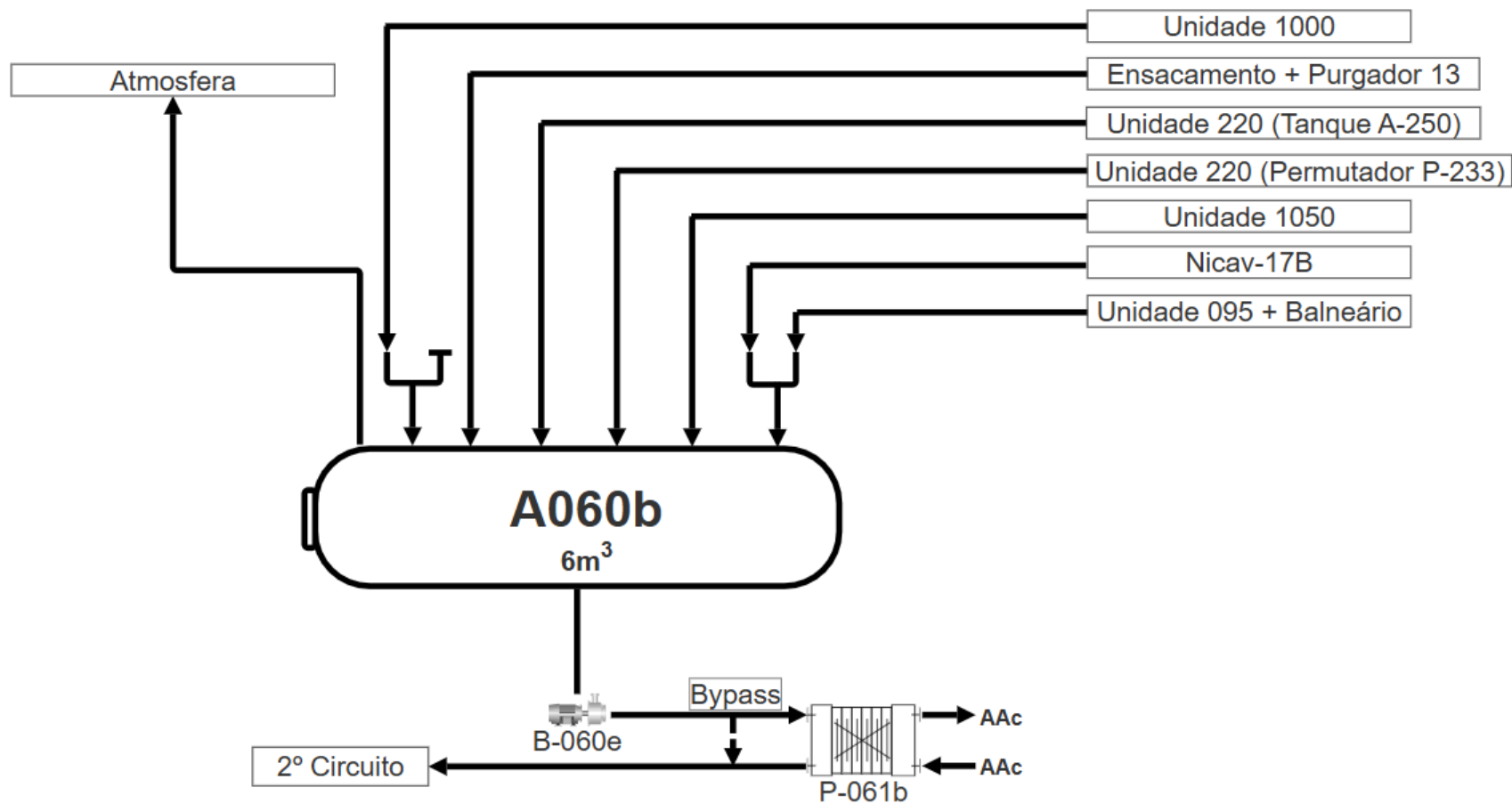


Figura 28 - Fluxo de condensados proposto e atualmente em vigor na ADP Fertilizantes.

- Aproveitamento Térmico e Poupança:

Como referido no capítulo dedicado aos resultados, mais concretamente nas medições de caudal, verificou-se que a bomba B-060e, responsável por encaminhar os condensados para o permutador P-061b, cuja função é transferir calor dos condensados para a água de alimentação das caldeiras, operava com um caudal significativamente inferior ao seu valor nominal de 10 m³/h. Com a alteração implementada, esse caudal passou de 3,72 m³/h para valores próximos dos 9,5 m³/h (uma diferença de 5,78 m³/h).

Considerando que os condensados se encontram a temperaturas entre 100 °C e 110 °C, e que, segundo o desenho técnico do permutador de placas P-061b, este foi concebido para receber os condensados nessa gama térmica, arrefecê-los até cerca de 40 °C e realizar a permuta térmica com a água de alimentação das caldeiras, que entra a 18 °C e é aquecida até 88 °C, torna-se possível estimar o potencial de poupança em gás natural para a ADP, caso se compare o desempenho antes e depois da alteração do fluxo de condensados.

Antes da implementação, foram realizadas medições com recurso a um termómetro infravermelho portátil, à entrada e saída do permutador P-061b. Os resultados indicaram que os condensados chegavam a 62 °C e eram arrefecidos até aos 36 °C, enquanto a água de alimentação das caldeiras era aquecida dos 29 °C até aos 54 °C.

Deste modo, comparam-se duas situações distintas:

Situação 1 (antes da alteração): Caudal de 3,72 m³/h; condensados entram a 62 °C e saem a 36 °C; água de alimentação aquece de 29 °C até 54 °C.

Situação 2 (após a alteração): Caudal de 9,5 m³/h; condensados entram a 100–110 °C e saem a 40 °C; água de alimentação aquece de 18 °C até 88 °C.

Esta comparação permite avaliar com maior precisão o impacto energético da alteração e estimar o potencial de redução no consumo de gás natural.

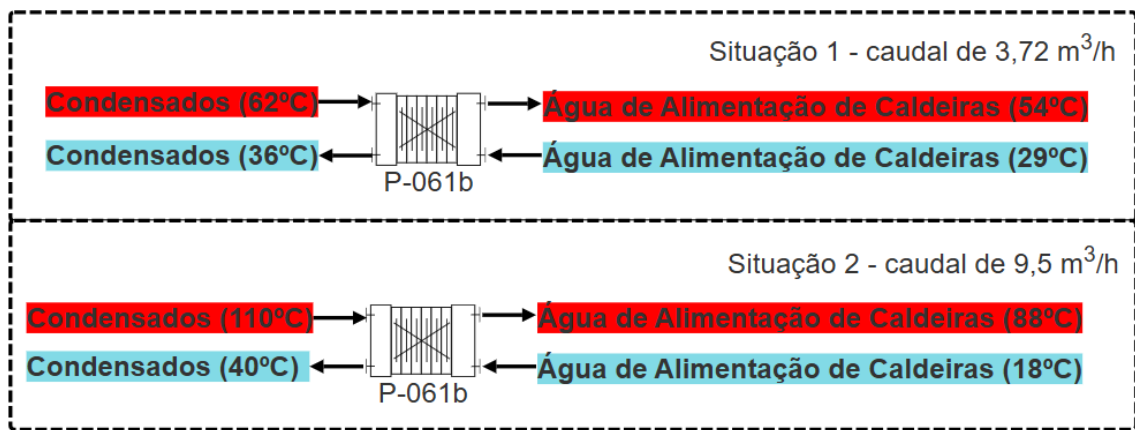


Figura 29 – Comparação antes e depois da alteração

Com base nos valores de consumo energético (em kWh) e nos preços mensais praticados pela ADP para o gás natural, os quais variam em função da composição do gás e da atividade das unidades, procedeu-se ao cálculo da média de ambos os parâmetros. Para tal, foram analisadas as faturas de gás natural disponíveis entre janeiro e maio de 2025, e obtiveram-se os seguintes valores médios:

Tabela 14 - Valores médios para o consumo e preço de gás natural

Consumo (kWh)	Preço (€)
2222915	115888

Na situação 1, com um caudal de 3,72 m³/h (aproximadamente 3 700 kg/h), o gradiente térmico médio (LMTD) é de 7,5 °C, resultando numa transferência de calor de 116 kW. Já na situação 2, com um caudal de 9,5 m³/h (cerca de 9 500 kg/h) em cada uma das duas correntes do permutador P-061b, o LMTD aumenta para 22 °C, permitindo a transferência de 803 kW de energia térmica. Este acréscimo de gradiente térmico e de caudal, no mesmo equipamento, traduz-se num ganho de 687 kW em relação à situação anterior. Essa energia adicional, agora aproveitada através da permuta térmica, representa uma poupança direta no consumo de gás natural utilizado para o aquecimento da água de alimentação das caldeiras.

Considerando o custo médio do gás natural indicado na Tabela 14, estima-se uma poupança de 35,70 €/hora. Este valor corresponde a cerca de 25 704 € por mês e aproximadamente 286 176,50 € por ano.

- Eficiência Comprometida nas Torres de Ácido Nítrico:

Com a recente adaptação que permite o aproveitamento dos condensados da unidade UN-270 nas torres de absorção de ácido nítrico, surgiu uma nova limitação relacionada com a temperatura da água de processo. Anteriormente, quando a unidade UN-060 utilizava os condensados provenientes do tanque A-060b, estes eram arrefecidos no permutador até temperaturas na ordem dos 30–35 °C. No entanto, os condensados da UN-270 apresentam temperaturas significativamente mais elevadas, entre 55 °C e 60 °C.

Este aumento térmico compromete a eficiência das torres de absorção, uma vez que a solubilidade dos óxidos de azoto na água diminui com o aumento da temperatura. Consequentemente, a capacidade de absorção é reduzida, o que resulta em maior emissão de gases residuais e menor rendimento do processo, afetando também o controlo ambiental [citar Ullmans e revista de ciência elementar]. Face a esta limitação, recomenda-se à ADP a aquisição de um novo permutador de calor, com capacidade adequada para garantir o arrefecimento dos condensados até níveis compatíveis com a eficiência exigida nas torres de absorção.

- Reintegração dos Condensados na UN-060:

Como já referido, a unidade de ácido nítrico (UN-060) poderá voltar a necessitar dos condensados provenientes do tanque A-060b, caso se verifique escassez na unidade UN-270, atualmente em utilização, ou em caso de paragem temporária desta última. Nessa eventualidade, a reintegração dos condensados do tanque A-060b deverá seguir uma sequência técnica rigorosa, garantindo tanto a eficiência térmica como a segurança operacional do sistema. Numa primeira etapa, os condensados devem ser bombeados integralmente pela bomba B-060e até ao permutador P-061b, assegurando a máxima troca térmica para o pré-aquecimento da água de alimentação das caldeiras.

Em seguida, a água deve ser encaminhada para o tanque auxiliar A-060a e, posteriormente, bombeada para o permutador P-061a, onde se realiza uma redução térmica adicional antes de seguir para a unidade de ácido nítrico. Importa considerar que o caudal atual de condensados (9,5 m³/h) é significativamente superior ao anteriormente utilizado (3,72 m³/h). Por esse motivo, será necessário avaliar o aumento da capacidade do tanque auxiliar A-060a, bem como a adequação das bombas B-060a/b, cuja capacidade nominal é de 6 m³/h, para garantir que os equipamentos conseguem suportar esta alteração. A Figura 30 apresenta o percurso completo dos condensados, com os equipamentos atualmente em operação.

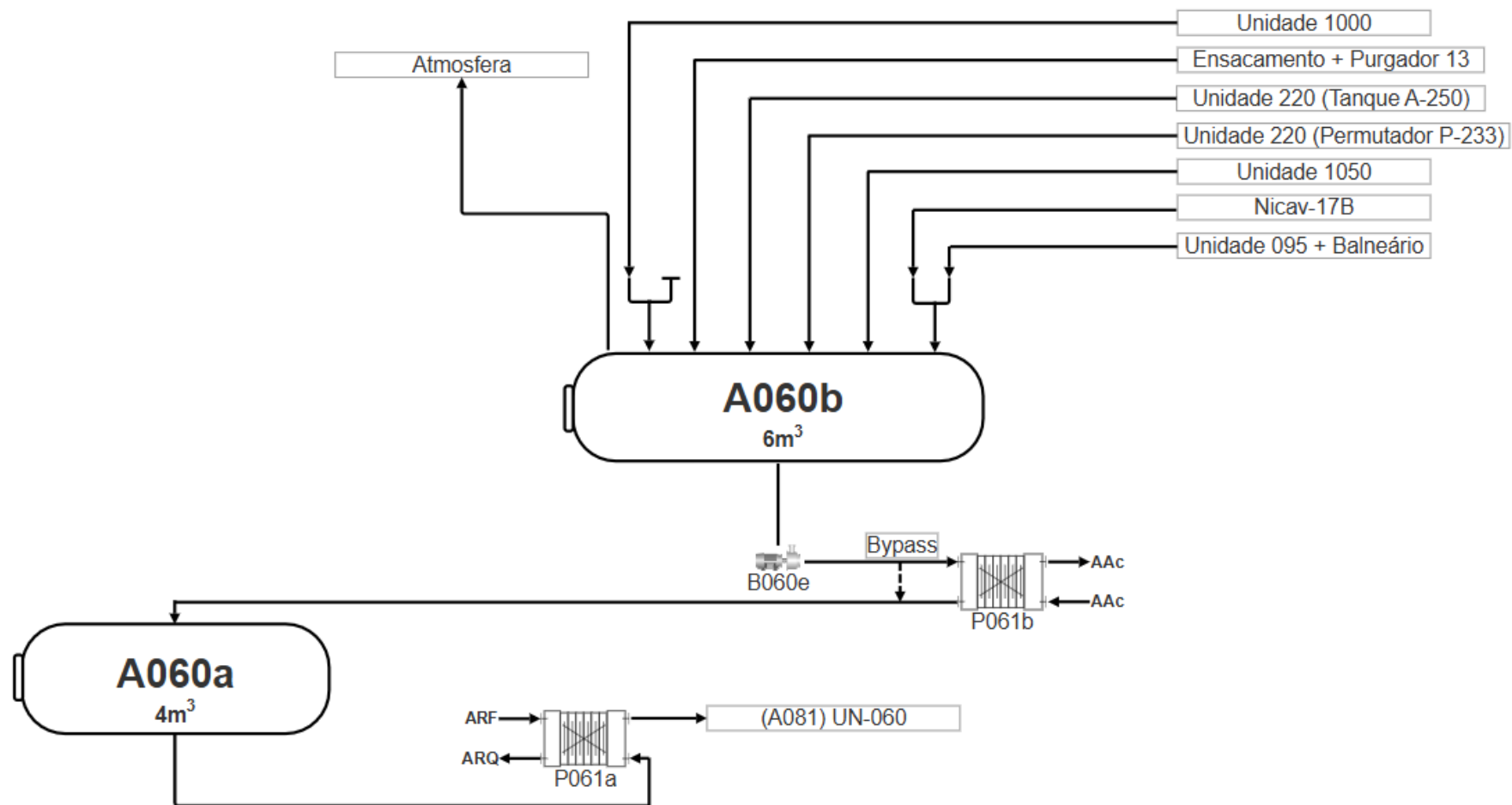


Figura 30 - Fluxo de condensados para reintegração na unidade de ácido nítrico

Referências bibliográficas

- [1] H. Favez, «Global Fertilizer Markets and Policies: A Joint FAO/WTO Mapping Exercise».
- [2] OECD e Food and Agriculture Organization of the United Nations, *OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034*. em OECD-FAO Agricultural Outlook. OECD Publishing, 2025. doi: 10.1787/601276cd-en.
- [3] M. Ishfaq, «Improvement of nutritional quality of food crops with fertilizer: a global meta-analysis».
- [4] «202109-AGROGES-ArtigoTecnico-01.pdf». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.agroges.pt/wp-content/uploads/2021/09/202109-AGROGES-ArtigoTecnico-01.pdf>
- [5] «202312-Agroges-Anpifert.pdf». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://anpifert.pt/wp-content/uploads/2025/01/202312-Agroges-Anpifert.pdf>
- [6] T. R. Tenreiro, M. V. Lopes, e G. Vale, «O IMPACTO DO NOVO PACTO ECOLÓGICO EUROPEU E DA ESTRATÉGIA “FARM TO FORK” NO MERCADO DE FERTILIZANTES EM PORTUGAL E AS SUAS IMPLICAÇÕES PARA O CONJUNTO DA ECONOMIA NACIONAL», 2022.
- [7] «Do prado ao prato», Consilium. Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/from-farm-to-fork/>
- [8] «Guia_PEPAC_090922_Total_v12.pdf». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.gpp.pt/images/PEPAC/GuiasPEPAC/Guia_PEPAC_090922_Total_v12.pdf
- [9] A. Fertilizantes, «Informações dadas pela ADP».
- [10] «ADP Fertilizantes», Fertiberia. Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.fertiberia.com/pt-pt/adp-fertilizantes/>
- [11] D. Ribeiro, «Processo de Ostwald», *Rev. Ciênc. Elem.*, vol. 3, n.º 2, 2015, doi: 10.24927/rce2015.143.
- [12] «LVIC-AAF.pdf». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-03/LVIC-AAF.pdf>
- [13] «Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 3rd Edition | Wiley», Wiley.com. Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Atmospheric+Chemistry+and+Physics%3A+From+Air+Pollution+to+Climate+Change%2C+3rd+Edition-p-9781118947401>
- [14] «Emissões industriais», Consilium. Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/industrial-emissions/>
- [15] «Decreto de lei 127/2013». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2013/08/16700/0532405389.pdf>
- [16] *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry: fifth, completely revised edition. Index to volumes A1 to A16, B1 to B3 (Abrasives to mutagenic agents,*

- fundamentals of chemical engineering, unit operations I and II*). Weinheim ; Cambridge : VCH, 1991. Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: http://archive.org/details/ullmannsencyclo0000unse_x4k7
- [17] «Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management - PubMed». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9525856/>
- [18] «Eutrophication of aquatic ecosystems: Bistability and soil phosphorus». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0503959102>
- [19] «CASO DE ESTUDO». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2013/10/2013-CS-CUF-Fabrica-Acido-Nitrico.pdf>
- [20] «Global Energy Review 2025», 2025.
- [21] «Objetivos para 2030 - Comissão Europeia». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/overall-targets-and-reporting/2030-targets_pt
- [22] «eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52025DC0085». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52025DC0085>
- [23] «Descarbonização da Indústria». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://recuperarportugal.gov.pt/wp-content/uploads/2024/06/11_Componente-Descarbonizac%CC%A7a%CC%83oda-Indu%CC%81stria.pdf
- [24] J. B. Kitto, Ed., *Steam: its generation and use*, 41. ed., 1. print. Barberton, Ohio: Babcock & Wilcox, 2005.
- [25] «Manual Boas Praticas Sistemas Vapor». Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://casa.galp.pt/sites/default/files/Manual%20Boas%20Praticas%20Sistemas%20Vapor.pdf>
- [26] McCallion John, *The Nalco Water Handbook*. Mcgraw Hill Book Company New York, 1979. Acedido: 10 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <http://archive.org/details/dli.ernet.25165>
- [27] Nielsson, *Manual of Fertilizer Processing*. CRC Press, 1986.
- [28] D. E. Noll e H. M. Rivers, «Re-use of Steam Condensate as Boiler Feedwater».
- [29] G. R. Khamidullina, «Technical and economic analysis of the decisions efficiency of system of water vapor condensate collecting and reusing organization in the industrial firm practice».
- [30] R. V. Filoski, A. M. Lazarevska, D. Mladenovska, e D. Kitanovski, «STEAM SYSTEM OPTIMIZATION OF AN INDUSTRIAL HEAT AND POWER PLANT».
- [31] F. Goodarzvand-Chegini, L. Samiee, e N. Rahmanian, «Energy savings from flash steam recovery: An industrial case study».
- [32] «Água - Memória Descritiva ADP». 2022.
- [33] :: «DL n.º 226-A/2007, de 31 de Maio». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.pgdlisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?nid=1379&tabela=leis&so_miolo=
- [34] T. I. U. of P. and A. Chemistry (IUPAC), «IUPAC - pH (P04524)». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://goldbook.iupac.org/terms/view/P04524>
- [35] O. US EPA, «Indicators: Conductivity». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-conductivity>
- [36] «EPAL -dureza». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.epal.pt/EPAL/docs/default-source/agua/ficha-dureza.pdf?sfvrsn=2>
- [37] «Twort's Water Supply - Chemistry, Microbiology and Biology of Water». [Online]. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100025-0.00007-7>

- [38] M. H. Ward *et al.*, «Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review», *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, n.º 7, p. 1557, jul. 2018, doi: 10.3390/ijerph15071557.
- [39] A. Committee, *Consensus on Operating Practices for the Control of Feedwater and Boiler Water Chemistry in Industrial and Institutional Boilers*. ASME Press, 2022. doi: 10.1115/1.885093.
- [40] C. Frayne, *Boiler Water Treatment: Principles and Practice*. Chemical Publishing Company, 2002.
- [41] F. Ismail, K. C. Khulbe, e T. Matsuura, *Reverse Osmosis*. Elsevier, 2018.
- [42] M. Abedi, S. Hashemi, e M. Fazeli, «Feasibility of Increasing Water Recovery of Inland Reverse Osmosis Systems and the Use of Reject Brine». [Online]. Disponível em: 10.1007/s13369-021-06451-4
- [43] H. Abyar, M. Nowrouzi, e H. Rezaei, «Comparative assessment of ion-exchange/reverse osmosis and ultrafiltration/reverse osmosis for seawater desalination: environmental, economic, and operational perspectives», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, n.º 57, pp. 65220–65232, dez. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-35447-4.
- [44] S. A. Mahir, *Boilers: A Comprehensive Guide to Boiler Systems*. Saad Abdulqader Mahir, 2023.
- [45] C. Leighton, *Boiler Operator Handbook: A Comprehensive Guide To Boiler Operations And Maintenance*. Amazon Digital Services LLC - Kdp, 2023.
- [46] D. Aguilar Vizcarra, D. Esenarro, e C. Rodriguez, «Three Steps Mixed (Fire Tube–Water Tube) Vertical Boiler to Optimize Thermal Performance», *Fluids*, vol. 6, n.º 3, p. 93, mar. 2021, doi: 10.3390/fluids6030093.
- [47] *Shell boilers Requirements for feedwater and boiler water quality*, Revision Underway. 2003.
- [48] «A Pratical Guide to steam and Condensate Engineering». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://bermo.com.br/arquivos/filemanager/downloads/informativos/A-Practical-Guide-to-Steam-and-Condensate-Enginnering_Bermo_Ari-Armaturen.pdf
- [49] I. Omran, «Importance of Condensate Recovery in Industrial Operations “AMOC CASE”», *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol. IJISRT*, pp. 2618–2628, out. 2024, doi: 10.38124/ijisrt/IJISRT24SEP1287.
- [50] C. N. Sawyer, *Chemistry for environmental engineering*. New York : McGraw-Hill, 1994. Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: http://archive.org/details/chemistryforenvi0000sawy_r9f0
- [51] D. V. Chapman, *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments, and Water in Environmental Monitoring*. E & FN Spon, 1996.
- [52] A. P. H. Association, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, 2017.
- [53] «Amine buffers for pH control», *ResearchGate*, ago. 2025, Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/250939640_Amine_buffers_for_pH_control
- [54] S. Permech, K. Lau, M. Duncan, e R. Simmons, «Initiation of localized steel corrosion in alkaline sulfate solution», *Mater. Struct.*, vol. 54, n.º 4, p. 143, jun. 2021, doi: 10.1617/s11527-021-01740-8.
- [55] G. Cano e P. Moulin, «Treatment of Boiler Condensate by Ultrafiltration for Reuse», *Membranes*, vol. 12, n.º 12, p. 1285, dez. 2022, doi: 10.3390/membranes12121285.
- [56] J. S. Gill, «The Role of Calcium Phosphate in Internal Boiler Water Treatment», em *Calcium Phosphates in Biological and Industrial Systems*, Z. Amjad, Ed., Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 417–436. doi: 10.1007/978-1-4615-5517-9_18.
- [57] «2100N Turbidímetro de laboratório, EPA 180.1, 230 V | Hach Portugal - Descrição geral - Obsoleto | Hach». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://pt.hach.com/2100n-turbidimetro-de-laboratorio-epa-180-1-230-v/product?id=24929826826>

- [58] «2100ntitle.book». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://sitefiles.camlab.co.uk/Hach_manuals/2100Nmanual.pdf
- [59] «CONTIMETRA - SISTIMETRA». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.contimetra.com/>
- [60] M. Stéphane, «Medidor de caudal Doppler vs medidor de caudal de tempo de trânsito: comparação de medidores de caudal ultra-sónicos para um desempenho ótimo», Fuji Electric. Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.fujielectric.fr/pt/blogue/medidor-de-caudal-doppler-vs-medidor-de-caudal-de-tempo-de-transito-comparacao-de-medidores-de-caudal-ultra-sonicos-para-um-desempenho-otimo/>
- [61] «Dynasonics DXN Portable Hybrid Ultrasonic Flow Meter», Instruments Direct. Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.instrumentsdirect.com/dynasonics-dxn-portable-hybrid-ultrasonic-flow-meter/>
- [62] M. Toghraei, *Piping and Instrumentation Diagram Development*. John Wiley & Sons, 2019.
- [63] B. G. Liptak, *Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis*. CRC Press, 2003.
- [64] D. W. Green e R. H. Perry, *Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition*. McGraw Hill Professional, 2007.
- [65] «VDI Heat Atlas - Google Books». Acedido: 11 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.google.pt/books/edition/VDI_Heat_Atlas/0t-HrUf1aHEC?hl=pt-PT&gbpv=0