



# Otimização da energia térmica da Cogeração da Recauchutagem Nortenha

**ABÍLIO ALVES BARBOSA**

novembro de 2018

# OTIMIZAÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA DA COGERAÇÃO DA RECAUCHUTAGEM NORTENHA

Abílio Alves Barbosa  
Aluno nº 1121298

**2º ANO**  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



# OTIMIZAÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA DA COGERAÇÃO DA RECAUCHUTAGEM NORTENHA

Abílio Alves Barbosa  
Aluno nº 1121298

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Engenheiro Leonardo Silva Ribeiro.

## **2º ANO**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica

## JÚRI

**Presidente**

Doutora Isabel Maria Garcia Sarmiento Pereira  
Professor Adjunto, ISEP

**Orientador**

Doutor Leonardo Silva Ribeiro  
Professor Adjunto, ISEP

**Arguente**

Doutor Adélio Manuel de Sousa Cavadas  
Professor Auxiliar Convidado, FEUP

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor, Doutor Leonardo Silva Ribeiro, que amavelmente e com uma paciência admirável aceitou a coordenação deste trabalho.

Evidentemente agradecer às pessoas que aceitaram que este trabalho se desenvolvesse nas suas Instalações e que de uma forma completamente aberta e com total apoio e suporte, que excedeu largamente o que se poderia esperar. Assim, quero agradecer aos Exmos. Senhores:

Sr. José Gomes, CEO do Grupo Nortenha.

Eng. Armando Quirino, diretor da UVEP da Nortenha

Também não posso deixar de agradecer à minha filha Mariana e à minha mulher Teresa, pelo apoio e pela paciência.



## **PALAVRAS CHAVE**

Ambiente, cogeração, energia, incineração, pneus usados, reciclagem, resíduos.

## **RESUMO**

Segundo a Agência Europeia do Ambiente (AEA), as atividades de gestão de resíduos contribuem para a “Economia Verde” por potenciarem uma gestão mais eficiente dos recursos naturais, reduzindo os impactos ambientais da extração de novos recursos e assegurando a disponibilidade de materiais essenciais à nossa subsistência [1]. Neste sentido, os sistemas de gestão de resíduos assumem uma contribuição cada vez mais relevante. Nestes sistemas de gestão, os tratamentos térmicos apresentam especial importância em que a incineração é considerada como tratamento de solução final para os resíduos não recicláveis. Ou seja, depois da reciclagem, será a solução para se obter um resíduo menos nocivo, com menor volume e valorização energética com limites bem definidos de emissões. Em particular, e em relação aos pneus usados a Valorpneu, que gere o Sistema de Gestão de Pneus Usados (SGPU) em Portugal, contribuiu para, em 10 anos de funcionamento do SGPU, considerando uma média anual de emissões de gases de efeito estufa (GEE) de 139 kt CO<sub>2</sub>-eq, evitar emissões de GEE que teriam ascendido a cerca de 1,4 Mt CO<sub>2</sub>-eq.

Neste contexto, o empreendedorismo típico da Recauchutagem Nortenha resultou na obtenção de uma Licença inicial de Incineração de PU para valorização Energética da Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Posteriormente, alargou a licença também para outros resíduos industriais. Apresenta-se como a única Cogeração com este tipo de valorização energética em Portugal. As condicionantes da licença ambiental embora muito apertadas, nomeadamente nos valores limite de emissões (VLE), são confortavelmente cumpridas como se pode constatar ao longo desta publicação.

Este estudo tinha como um dos objetivos perceber o enquadramento da empresa neste tema, perceber a sua organização e contribuir com algumas soluções no sentido de otimizar a energia térmica e se possível incrementar a energia elétrica a produzir.

Um dos grandes desafios encontrados foi a informação disponível sobre o poder calorífico inferior (PCI) ser pouco consistente. Com efeito, mesmo a Legislação Nacional aponta valores numa gama alargada de 7, 4 a 10,7 MJ/kg para os resíduos industriais,

quando as variantes do conteúdo do resíduo são inúmeras. Foi adotada, para cálculos posteriores, a fórmula preconizada pelas melhores técnicas disponíveis (MTD) da Comissão Europeia relativamente à incineração de resíduos e que entra em conta com as massas de resíduos queimados e vapor produzido. Obteve-se um valor de 10,4 MJ/Kg e que foi utilizado nos cálculos consequentes.

As situações abordadas de otimização energética foram: redução da humidade superficial do combustível, promover o estudo da possibilidade da produção de vapor a 0,9 MPa com permutador a instalar na saída de gases ainda a 250°C, recuperação do vapor de reevaporação das purgas da turbina por um permutador de pré-aquecimento da água de reposição ao desgaseificador, reparação dos purgadores de condensado de vapor da fábrica e recuperação do vapor de reevaporação do tanque de condensados da fábrica.

A instalação do permutador para produção de vapor a 0,9 MPa, permite incrementar o vapor disponível para a turbina em mais de 20%. Esta é uma solução interessante, mas merece estudo financeiro mais profundo pois aparentemente o período de recuperação do investimento será de cerca de dois anos. As outras soluções são perfeitamente viáveis e com retorno superior a 225 MWh de energia.

No futuro, recomenda-se a análise do interior das caldeiras e a avaliação do estado dos tubulares, desenho, incrustações e isolamentos. Há também a necessidade de se trabalhar no conhecimento mais profundo do vapor real do PCI e de se adquirir instrumentação para avaliação mais fiável do caudal de gases e revisão às sondas de temperatura se possível com calibração.

## KEYWORDS

Environment, Combined heat and power, energy, incinerators, used tyres, recycling, waste.

## ABSTRACT

According to the European Environment Agency (EEA), waste management activities contribute to the "Green Economy" by promoting more efficient management of natural resources, reducing the environmental impacts of extracting new resources and ensuring the availability of our subsistence [1]. In this context, waste management systems make a significant contribution. In these management systems, thermal treatments are of main importance, where incineration is considered as a final solution treatment for non-recyclable waste. In other words, after recycling, incineration is the answer to obtain a less harmful waste with less volume and energy recovery with tight defined emission limits. Related to Tyres Waste, Valorpneu, which manages the Used Tyre Management System (SGPU) in Portugal, has contributed with SGPU's 10 years of operation and considering an annual average greenhouse gas emissions (GGE) of 139 kt CO<sub>2</sub>-eq to avoid emissions which would have amounted to about 1.4 Mt CO<sub>2</sub>-eq.

In this context, the typical entrepreneurship of Recauchutagem Nortenha resulted in an Initial Incineration License of used tyres (PU) for Energetic valorisation from Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Subsequently, this license was extended to other industrial waste. It is the only combined heat and power (CHP) with this type of energy recovery in Portugal. The conditions of the Environmental License, although very tight, namely in the emission limit values (ELV), are comfortably fulfilled, as can be seen throughout this publication.

One of the objectives of this study was to understand the organization of the company in this theme, to perceive its organization and to contribute with some solutions to optimize the thermal energy and if possible to increase the production of electric energy.

One of the great challenges that came up was the inconsistent information available about the lower heating value (LHV). Indeed, even national legislation specifies values ranging from 7.4 to 10.7 MJ/kg for industrial waste, when variants of the waste content

are numerous. We have adopted the formula proposed by the European Commission for best available techniques (BAT) for waste incineration, which at considers the masses of burned waste and steam produced. A value of 10.4 MJ/kg was obtained and adopted in the consequent calculations.

The situations of energy optimization were: reduction of the surface moisture of the fuel to promote the study of the possibility of steam production at 0.9 MPa with exchanger to be installed at the exhaust gas still at 250 °C, recovery of flash steam from turbine steam traps by a pre-heating water exchanger to the degasser, repair of the factory condensate steam traps and recovery of the flash steam from the factory condensate tank.

The installation of the 0.9 MPa steam production exchanger allows the increasing of the available steam to the turbine by more than 20%. It is a perfectly viable solution, but it deserves deeper financial study because apparently the payback period will be about two years. The other solutions are also viable and with a return of more than 225 MWh of energy.

In the future it is recommended to analyse the interior of the boiler and evaluate the state of the tubular, drawing, fouling and insulation. There is also a need to improve knowledge on real waste LHV, acquire instrumentation for more reliable evaluation of the gas flow rate and revision to the temperature probes if possible with calibration.

## NOMENCLATURA

Variável	Descrição	Unidades
$C$	Rácio eletricidade/calor	
$C_{stx}$	Entalpia de vapor sem entalpia da água de	GJ/ton
$CHP E\eta$	Eficiência elétrica	
$CHP H\eta$	Eficiência térmica do processo	
$C_p$	Calor específico a pressão constante	J/(kg.K)
$CV_{t,y}$	Coefficiente de caudal do purgador $t$ no período $y$	
$d$	Diâmetro do orifício	mm
$E_{CHP}$	Quantidade de eletricidade produzida na Cogeração	MWh
$E_{perdashumsup}$	Perdas associadas à humidade superficial no	kJ
$FE$	Fator de emissão	kgCO <sub>2</sub> e/GJ
$FS_{t,y}$	Fator de carga do purgador $t$ no período $y$	
$FT_{t,y}$	Fator de operação do purgador $t$ no período $y$	
$g$	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$h_f$	Entalpia do líquido saturado	J/kg
$h_1, h_2...h_7$	Entalpias nos vários pontos do ciclo termodinâmico	kJ/kg
$h$	Entalpia de vapor sobreaquecido	J/kg
$h_{fg}$	Entalpia de evaporação	J/kg
$h_g$	Entalpia de vapor saturado	J/kg
$h_{t,y}$	Número de horas de operação do purgador $t$ no	h
$H_{CHP}$	Quantidade de calor útil produzido na cogeração	MJ
$I$	Intensidade de corrente absorvida	A
$L_{t,y}$	Quantidade de vapor que o purgador $t$ perde no	t
$m_c$	Massa de resíduos incinerados	ton/h
$\dot{m}_{vapor}$	Caudal mássico de vapor	kg/h
$m_{humsup}$	Massa de humidade superficial	kg/h
$m_{stw}$	Quantidade de vapor produzido de resíduos no	ton/ ano
$m_{stx}$	Quantidade total de vapor produzido no período	ton/ ano
$m_f$	Quantidade de vapor de combustível fóssil no período	ton/ ano
$P_a$	Potência elétrica absorvida	kW
$P_1$	Pressão a montante	bar absolutos
$P_2$	Pressão a jusante	bar absolutos
$PCI$	Poder calorífico inferior	J/kg
$PCS$	Poder calorífico superior	J/kg
$Pe_1$	Potência elétrica 1	W
$Pe_2$	Potência elétrica 2	W
$P_{1,t}$	Pressão a montante do purgador $t$	bar
$P_m$	Pressão absoluta do vapor motriz	bar abs
$P_{2,t}$	Pressão a jusante do purgador $t$	bar
$\dot{Q}_v$	Energia contida no vapor	kJ/h
$Q$	Quantidade de calor no vapor	J
$Q_{ag}$	Energia contida na água de alimentação	kJ/h
$Q_{entrada}$	Energia que entra	kJ/kg
$Q_{saida}$	Energia que sai	kJ/kg
$R$	Raio de abertura	cm

$Ref H_\eta$	Valor de ref. da efic. na produção separada de calor	
$Ref E_\eta$	Valor de ref. da eficiência na produção de eletricidade	
$S$	Entropia	kJ/kg.K
$t_r$	Temperatura de referência	°C
$T_{aa}$	Temperatura da água de alimentação	°C
$T_g$	Temperatura dos gases de combustão à saída da	°C
$T_{H_2O}$	Temperatura da água de alimentação à caldeira (ou à	°C
$U$	Tensão trifásica	V
$\dot{V}$	Caudal volumétrico	m <sup>3</sup> /s
$v_g$	Volume específico do vapor	m <sup>3</sup> /kg
$W$	Percentagem de O <sub>2</sub>	%
$y$	Fração mássica de vapor extraída da turbina	%

### Caracteres Gregos

$\eta_b$	Eficiência da caldeira	%
$\eta_m$	Rendimento do motor	%
$\eta_t$	Eficiência da turbina	%
$\Delta p$	Diferencial de pressão	mm H <sub>2</sub> O
$\Delta T$	Diferença de temperaturas	°C
$\rho$	Massa volúmica	Kg/ m <sup>3</sup>

### Símbolos químicos

$C$	Carbono
$Cd$	Cádmio
$Co$	Cobalto
$Cr$	Crómio
$Cu$	Cobre
$H$	Hidrogénio
$HCl$	Cloreto de hidrogénio
$HF$	Fluoreto de hidrogénio
$Hg$	Mercúrio
$Mn$	Manganês
$Ni$	Níquel
$O$	Oxigénio
$Pb$	Chumbo
$S$	Enxofre
$Sb$	Antimónio
$SO_2$	Dióxido de enxofre
$V$	Vanádio
$Zn$	Zinco

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

---

<b>ABC</b>	Sistema <i>Activity Based Cost</i>
<b>COT</b>	Carbono Orgânico Total
<b>D.L.</b>	Decreto Lei
<b>ELT</b>	<i>End of life tyres</i>
<b>GEE</b>	Gases com efeito de estufa
<b>ICPME</b>	Programa operacional de iniciativa comunitária das
<b>LER</b>	Lista Europeia de Resíduos
<b>MTD</b>	Melhores técnicas disponíveis
<b>NP</b>	Norma Portuguesa
<b>OTR</b>	<i>Off the road</i>
<b>PFV</b>	Pneus em fim de vida
<b>PME</b>	Pequenas e médias empresas
<b>PR</b>	Pneus recauchutados
<b>PU</b>	Pneus usados
<b>PUNR</b>	Pneus usados não recauchutáveis
<b>PUR</b>	Pneus usados recauchutáveis
<b>PURC</b>	Pneus usados recolhidos
<b>RSU</b>	Resíduos sólidos urbanos
<b>SGCIE</b>	Sistema de gestão dos consumidores intensivos de
<b>SGPU</b>	Sistema integrado de gestão de pneus usados
<b>TSP</b>	Partículas totais em suspensão
<b>UFU</b>	Unidade fabril de Urrô
<b>UVEP</b>	Unidade de valorização energética de pneus
<b>VFV</b>	Veículos em fim de vida
<b>VLE</b>	Valores limite de emissões

## ABREVIATURAS

---

<b>3 DRIVERS</b>	<i>3 Drivers</i> – Engenharia, Inovação, Ambiente
<b>ANIRP</b>	Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneus
<b>ACAP</b>	Associação Automóvel de Portugal
<b>APA</b>	Agência Portuguesa do Ambiente
<b>APIB</b>	Associação Portuguesa dos Industriais de Borracha
<b>BVC</b>	<i>Bureau Veritas Certification</i>
<b>BVQI</b>	<i>Bureau Veritas Quality International</i>
<b>EEA</b>	<i>European Environmentn Agency</i>
<b>ETRA</b>	<i>European Tyre Recycling Association</i>
<b>ETRMA</b>	<i>European Tyre &amp; Rubber Manufacturies Association</i>
<b>IAPWS</b>	<i>International Association for the Properties os Water and Steam</i>
<b>JCR-IPTS</b>	<i>Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> LOJA DA RECAUCHUTAGEM NORTENHA EM PENAFIEL (ARQUIVO DA EMPRESA).....	1
<b>FIGURA 2</b> VISTA GERAL DO PARQUE DE PRENSAS DA FÁBRICA (ARQUIVO DA EMPRESA).....	2
<b>FIGURA 3</b> NOVA IMAGEM CORPORATIVA DA RECAUCHUTAGEM NORTENHA (ARQUIVO DA EMPRESA)...	4
<b>FIGURA 4</b> INCINERAÇÃO TERAMB, ILHA TERCEIRA (ARQUIVO DO AUTOR).....	8
<b>FIGURA 5</b> TRATAMENTO DOS PU NA UNIÃO EUROPEIA [7]. .....	13
<b>FIGURA 6</b> PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM PNEU [9]. .....	14
<b>FIGURA 7</b> EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO DE PNEUS EM FIM DE VIDA NA EU [11].....	16
<b>FIGURA 8</b> EVOLUÇÃO DA CAPITAÇÃO DE PNEUS EM FIM DE VIDA NA EU [11 ,12]. .....	16
<b>FIGURA 9</b> CICLO DE VIDA DO PNEU [14]. .....	17
<b>FIGURA 10</b> VOLUME MUNDIAL DE RESÍDUOS DE PNEUS EM 2013. ....	18
<b>FIGURA 11</b> CICLO DE VIDA DO PNEU.....	20
<b>FIGURA 12</b> SISTEMAS DE GESTÃO DE PU NA EUROPA [18].....	22
<b>FIGURA 13</b> ESQUEMA DO MODELO DE RESPONSABILIDADE ALARGADA DO PRODUTOR [18]. .....	23
<b>FIGURA 14</b> FLUXOS DOS PU CONFORME DESTINOS PRETENDIDOS. ....	25
<b>FIGURA 15</b> REDUÇÃO DE GEE COM O SGPU. ....	31
<b>FIGURA 16</b> REDUÇÃO DE ENERGIA COM O SGPU. ....	32
<b>FIGURA 17</b> VISTA AÉREA DA RECAUCHUTAGEM NORTENHA. ....	35
<b>FIGURA 18</b> DIAGRAMA SIMPLIFICADO DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO DA UVEP [22]. .....	36
<b>FIGURA 19</b> UNIDADE DE COMBUSTÃO PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DA NORTENHA PORTUGAL (ARQUIVO DA EMPRESA).....	37
<b>FIGURA 20</b> FORNO ROTATIVO [24]. .....	38
<b>FIGURA 21</b> FORNO ROTATIVO – AQUECIMENTO INDIRETO [24]. .....	39
<b>FIGURA 22</b> INSTALAÇÃO DA CALDEIRA (ARQUIVO DA EMPRESA). .....	40
<b>FIGURA 23</b> TUBULARES DA CALDEIRA (ARQUIVO DA EMPRESA). EM ANEXO ENCONTRA-SE A FIGURA AMPLIADA.....	41
<b>FIGURA 24</b> PORMENOR DOS TUBULARES DA CALDEIRA (ARQUIVO DA EMPRESA). EM ANEXO ENCONTRA-SE A FIGURA AMPLIADA. ....	42
<b>FIGURA 25</b> BARRILETES DA CALDEIRA (ARQUIVO DA EMPRESA).....	43
<b>FIGURA 26</b> PORMENOR DO INTERIOR DO BARRILETE SUPERIOR [25]. .....	44
<b>FIGURA 27</b> PORMENOR DO SOBREAQUECEDOR (ARQUIVO DA EMPRESA).....	45
<b>FIGURA 28</b> PRODUÇÃO DE VAPOR 9 BAR, ECONOMIZADOR E DESGASEIFICADOR. EM ANEXO ENCONTRA-SE A FIGURA AMPLIADA.....	46
<b>FIGURA 29</b> GRUPO TURBOGERADOR (ARQUIVO DA EMPRESA). .....	47
<b>FIGURA 30</b> CONDICIONADOR DE PARTÍCULAS [23]. .....	48
<b>FIGURA 31</b> CICLONE E FILTROS MANGA (ARQUIVO DA EMPRESA).....	49
<b>FIGURA 32</b> FLUXO DE GASES E VARIAÇÃO DE TEMPERATURA. EM ANEXO ENCONTRA-SE A FIGURA AMPLIADA.....	53
<b>FIGURA 33</b> SISTEMA DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO À CALDEIRA E DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR SOBREAQUECIDO. EM ANEXO ENCONTRA-SE A FIGURA AMPLIADA. ....	55
<b>FIGURA 34</b> ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SOPRADOR.....	56

<b>FIGURA 35</b> FLUXOS DE VAPOR SATURADO. EM ANEXO ENCONTRA-SE UMA AMPLIAÇÃO DA FIGURA. ....	57
<b>FIGURA 36</b> VEDAÇÃO DO VEIO DA TURBINA COM VAPOR [27]. .....	58
<b>FIGURA 37</b> ÁGUA DE ARREFECIMENTO E CONDENSADO DA TURBINA. ....	59
<b>FIGURA 38</b> OBJETIVO DE UM AEROARREFECEDOR [28]. .....	59
<b>FIGURA 39</b> TIPO DE AEROARREFECEDORES INSTALADOS (POWERCIAT). .....	60
<b>FIGURA 40</b> - CONTADOR DE VAPOR SATURADO PARA A FÁBRICA .....	66
<b>FIGURA 41</b> PORMENOR DAS TOMADAS DE PRESSÃO DO TUBO <i>PITOT</i> DO CONTADOR DE VAPOR A 4,0 MPA .....	67
<b>FIGURA 42</b> MONITOR DE PARTÍCULAS <i>DURAG D-R 800</i> . .....	68
<b>FIGURA 43</b> SALA COM MEDIDORES DE GASES E BOTIJAS DE CALIBRAÇÃO. ....	69
<b>FIGURA 44</b> ZONA DE INSTALAÇÃO DE SENSORES NA CHAMINÉ. ....	69
<b>FIGURA 45</b> CONTADOR DE ENERGIA ELÉTRICA VENDIDA E/OU COMPRADA À EDP. ....	70
<b>FIGURA 46</b> CONTADOR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA A FÁBRICA (FOTO DA INSTALAÇÃO E IMAGEM DE CATÁLOGO). .....	70
<b>FIGURA 47</b> CONTADOR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA A UVEP (FOTO DA INSTALAÇÃO E IMAGEM DE CATÁLOGO). .....	71
<b>FIGURA 48</b> FLUXO DE GASES NA ZONA DOS FILTROS E VENTILADORES. ....	74
<b>FIGURA 49</b> DIAGRAMA PRESSÃO TEMPERATURA E CURVAS CARACTERÍSTICAS [35]. .....	88
<b>FIGURA 50</b> CICLO DE <i>RANKINE</i> REGENERATIVO COM AQUECIMENTO DIRETO [35]. .....	89
<b>FIGURA 51</b> CONDIÇÕES DE SERVIÇO DO PERMUTADOR DE VAPOR. ....	98
<b>FIGURA 52</b> CORRELAÇÕES DE PONTOS DE ORVALHO. ....	99
<b>FIGURA 53</b> TUBO DE CALOR E CICLO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR. ....	100
<b>FIGURA 54</b> PERMUTADOR DE TUBOS DE CALOR. ....	101
<b>FIGURA 55</b> PERMUTADOR DE CONDENSAÇÃO DE VAPOR DE REEVAPORAÇÃO [40]. ....	103
<b>FIGURA 56</b> ASPETO DE UM TERMOCOMPRESSOR [42]. .....	110
<b>FIGURA 57</b> TERMOCOMPRESSOR, FUNCIONAMENTO INTERNO [42]. .....	110
<b>FIGURA 58</b> TERMOCOMPRESSOR, DETALHE DE INSTALAÇÃO [42]. .....	110

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> PRODUTORES EM REGIME ORDINÁRIO LIGADOS À REDE NACIONAL DE TRANSPORTE – CENTRAIS TERMOELÉTRICAS [4].	6
<b>TABELA 2</b> CENTRAIS A BIOMASSA EM PORTUGAL DADOS DE 2014 [5].	7
<b>TABELA 3</b> COMPOSIÇÃO MATERIAL (%) DE PNEUS NOVOS E PNEUS USADOS [10].	15
<b>TABELA 4</b> RISCOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS A UMA GESTÃO DANOSA DE PNEUS USADOS [16].	19
<b>TABELA 5</b> PODER CALORIFICO DOS PNEUS E OUTROS COMBUSTÍVEIS [21].	27
<b>TABELA 6</b> PESO MÉDIO POR CATEGORIA DE PNEUS COLOCADOS NO MERCADO.	29
<b>TABELA 7</b> RESULTADOS DESDE O INÍCIO EM 2003 [20].	30
<b>TABELA 8</b> RESULTADOS ATINGIDOS.	31
<b>TABELA 9</b> LISTA DE RESÍDUOS DESTINADOS A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA.	62
<b>TABELA 10</b> PARÂMETROS OPERACIONAIS.	64
<b>TABELA 11</b> VALORE MÉDIOS DIÁRIOS.	64
<b>TABELA 12</b> VALORES MÉDIOS A INTERVALOS DE 30 MINUTOS.	65
<b>TABELA 13</b> VLE PARA O POLUENTE MONÓXIDO DE CARBONO (CO).	65
<b>TABELA 14</b> VLE PARA OS POLUENTES METAIS PESADOS, DIOXINAS E FURANOS.	65
<b>TABELA 15</b> HORAS DE FUNCIONAMENTO.	71
<b>TABELA 16</b> TEMPERATURAS DOS GASES, CAUDAIS DE VAPOR E ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA NO PERÍODO EM ESTUDO.	72
<b>TABELA 17</b> ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA MEDIDA PELOS CONTADORES.	72
<b>TABELA 18</b> VAPOR FORNECIDO À FÁBRICA NO PERÍODO EM ESTUDO.	73
<b>TABELA 19</b> RESÍDUOS PROCESSADOS NO MESMO PERÍODO.	73
<b>TABELA 20</b> CAUDAL DE GASES.	73
<b>TABELA 21</b> RESULTADOS DO AUTOCONTROLO DE EMISSÕES DE CO E NO <sub>x</sub> .	76
<b>TABELA 22</b> RESULTADOS DO AUTOCONTROLO DE EMISSÕES DE COT E PARTÍCULAS.	76
<b>TABELA 23</b> RESULTADOS DO AUTOCONTROLO DE EMISSÕES DE HCL E HF.	77
<b>TABELA 24</b> RESULTADOS DO AUTOCONTROLO DE EMISSÕES DE SO <sub>2</sub> .	77
<b>TABELA 25</b> ANÁLISE FINAL E VALORES DE PCS (COMPONENTES EM %) [32].	82
<b>TABELA 26</b> PCI E FE DE COMBUSTÍVEIS [33].	84
<b>TABELA 27</b> VALORES DE PCI CALCULADOS EM 50 INCINERADORAS EUROPEIAS.	85
<b>TABELA 28</b> PROPRIEDADES DOS PONTOS NO CICLO.	90
<b>TABELA 29</b> RÁCIO IMPLÍCITO ELETRICIDADE/CALOR, C.	92
<b>TABELA 30</b> CAUDAIS DE VAPOR EM PURGADORES COM FUGA [41].	104
<b>TABELA 31</b> POSSÍVEIS ESTADOS DE FUNCIONAMENTO DE UM PURGADOR [1].	105
<b>TABELA 32</b> FATORES DE OPERAÇÃO PARA AS PERDAS DE VAPOR DE UM PURGADOR [1].	106
<b>TABELA 33</b> FATORES DE CARGA PARA AS PERDAS DE VAPOR [1].	106

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 História da empresa.....	1
1.2 Objetivos deste estudo.....	5
1.3 Organização desta dissertação .....	9
<b>2. ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>13</b>
2.1 Introdução .....	13
2.2 Aspetos ambientais .....	14
2.2.1 Componentes do pneu .....	14
2.2.2 Pneus usados .....	15
2.2.3 Problemas ambientais .....	17
2.3 Gestão dos pneus usados .....	21
2.3.1 Política europeia na gestão dos pneus usados.....	21
2.3.2 Política de gestão dos pneus usados em Portugal .....	23
<b>3. LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO .....</b>	<b>35</b>
3.1 Descrição geral .....	35
3.2 Descrição por equipamento .....	36
3.2.1 Câmaras de combustão primária e secundária .....	36
3.2.2 Caldeira e sobreaquecedor .....	39
3.2.3 Produção vapor 0,9 MPa, economizador e desgaseificador .....	45
3.2.4 Turbina.....	46
3.2.5 Tratamento dos fumos .....	47
<b>4. RECOLHA DE DADOS, MEDIÇÕES .....</b>	<b>53</b>
4.1 Fluxos.....	53
4.1.1 Gases.....	53
4.1.2 Água de alimentação à caldeira e vapor sobreaquecido .....	54

4.1.3	Vapor de alta pressão saturado .....	56
4.1.4	Circuito de água de arrefecimento e condensados da turbina.....	58
4.2	Dados e medições.....	60
4.2.1	Licença ambiental.....	60
4.2.2	Medições .....	66
<b>5.</b>	<b>DETERMINAÇÃO DE EFICIÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>
5.1	Poder calorífico inferior do combustível .....	81
5.2	Rendimento da caldeira .....	87
5.3	Eficiência da turbina .....	88
5.4	Eficiência da cogeração .....	91
<b>6.</b>	<b>AVALIAÇÃO DAS SITUAÇÕES COM POTENCIAL DE OTIMIZAÇÃO.....</b>	<b>97</b>
6.1	Humidade superficial do combustível .....	97
6.2	Produção de vapor de 0,9 MPa para a fábrica .....	98
6.3	Vapor de reevaporação dos purgadores de alta .....	101
6.4	Manutenção dos purgadores da fábrica .....	103
6.5	Vapor de reevaporação da fábrica .....	108
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>113</b>
7.1	Conclusões.....	113
7.2	Trabalhos futuros .....	115
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>119</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>125</b>





# 1. INTRODUÇÃO

1.1 História da empresa

1.2 Objetivos deste estudo

1.3 Organização da dissertação



## 1. INTRODUÇÃO

Este estudo insere-se no Mestrado de Engenharia Mecânica, ramo Energia, do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Pretendeu-se aplicar conhecimentos adquiridos de várias Unidades Curriculares, particularmente: Combustão, Climatização, Utilização Racional de Energia e Equipamentos Térmicos e Hidráulicos.

A empresa, Recauchutagem Nortenha, dentro dos seus recursos de valorização energética, foi sensível ao pedido de se proceder a um estudo sobre a otimização da energia térmica da sua cogeração.

### 1.1 História da empresa

António da Silva Gomes, desde o início da década de 1960, exercia a sua atividade profissional em nome individual na área da recauchutagem e comércio de pneus. Em 1976, com a sua esposa Maria da Conceição Fernandes da Silva, funda, em sociedade, a Recauchutagem Nortenha. Entre 1984 e 1988, coincidindo com a entrada para a gestão da empresa dos filhos dos fundadores, deu-se início a um período de investimentos importantes onde se destacam a construção de uma nova loja em Penafiel (Figura 1), a aquisição de novo equipamento produtivo para a recauchutagem e a abertura de lojas em Paredes, Lousada, Amarante e Lixa [2].



**Figura 1** Loja da Recauchutagem Nortenha em Penafiel (arquivo da empresa).

A continuidade de investimentos que teve lugar na área industrial implicou a mudança de instalações (Figura 2). Daqui resultou a possibilidade, de com a capacidade instalada,

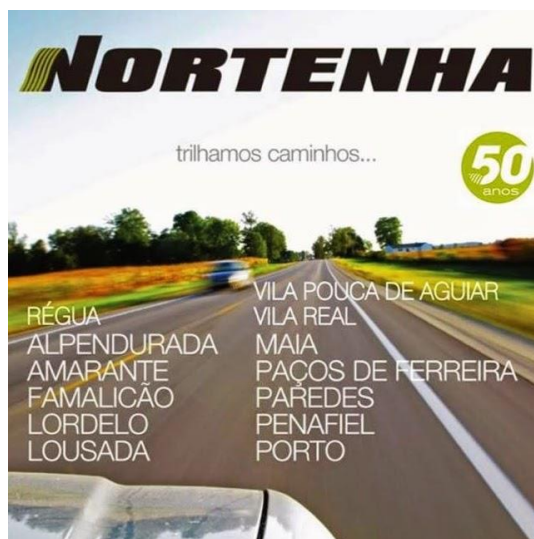
do alargamento de cobertura geográfica da sua distribuição que, até esta altura se encontrava essencialmente baseada na zona Norte, passou a abranger todo o país. Paralelamente a esta expansão concretizaram a abertura de mais lojas (Lordelo e Alpendurada).



**Figura 2** Vista geral do parque de prensas da fábrica (arquivo da empresa).

A gestão eficiente e ambição de crescimento conduziram, em 1995, a um novo ciclo de investimentos com a construção da Unidade Fabril de Urrô (UFU). Esta nova unidade fabril consiste numa Unidade de Recauchutagem e numa Unidade de Valorização Energética de Pneus (UVEP), que permite a produção de energia elétrica a partir de pneus usados que não podem ser recauchutados e de outros resíduos de borracha. O arranque desta Unidade Fabril verifica-se em 1996. A nova unidade de recauchutagem foi concebida com base numa organização otimizada, com linhas de produção independentes e mais racionais, permitindo uma melhoria da produtividade, dos prazos de resposta às solicitações dos clientes e possibilitando uma maior capacidade de produção. Em 1999, a empresa introduziu um inovador serviço móvel, destinado ao segmento de frotas, que permite realizar os serviços de montagem e desmontagem, equilibragem e alinhamentos nas instalações dos próprios clientes. Com a preocupação constante de melhoria e especialização, a empresa investiu, em 1999/2000, num laboratório de ensaio de pneus e em novos equipamentos para controlo da qualidade dos compostos de borracha, num projeto apoiado pelo “Programa Operacional de Iniciativa Comunitária das Pequenas e Médias Empresas” (ICPME). Em dezembro do ano

2000, o Sistema *Aqual* implementado na UFU e aplicável à produção de pneus recauchutados, serviços de recauchutagem, reparação de pneus e misturação de borracha, foi certificado segundo a NP EN ISO 9002:1995 pelo “*Bureau Veritas Quality International*” (BVQ) Portugal. Em 2001, as atividades logísticas de armazenamento e distribuição de pneus recauchutados, pneus novos e outras mercadorias foram integradas na Unidade de Urrô que passou a dispor de um Centro Logístico onde estas foram concentradas. Em 2003, o Sistema *Aqual* foi adaptado aos requisitos da NP EN ISO 9001:2000, alargando o seu âmbito à conceção e desenvolvimento de pneus recauchutados, tendo obtido novamente a certificação pelo “*Bureau Veritas Certification*” (BVC) Portugal. Em janeiro de 2004, a Recauchutagem Nortenha obteve a homologação da sua unidade fabril para a produção de “Pneus recauchutados a utilizar nos automóveis ligeiros de passageiros e seus reboques” (108R020004) e “Pneus recauchutados a utilizar nos automóveis de mercadorias, pesados de passageiros e respetivos reboques” (109R020005), no âmbito dos Regulamentos n.º 108 e n.º 109 da Comissão Económica para a Europa das Nações Unidas, respetivamente. Em meados do mês de fevereiro de 2004, a Unidade de Valorização Energética de Pneus obteve, por parte do Instituto dos Resíduos, autorização prévia para a operação de valorização energética de pneus usados e outros resíduos de borracha. Ainda durante o ano 2004 foram celebrados com a Valorpneu - Sociedade de Gestão de Pneus Usados, os contratos “Produtor”, “Recauchutador” e “Valorizador”, preconizados no D.L. 111/2001 de 6 de abril, que estabelece os princípios e as normas aplicáveis à gestão de pneus e pneus usados. Na vertente comercial, em finais de 2005, a empresa aposta no alargamento da rede de retalho com a abertura de uma nova loja na Zona Industrial I da Maia, cobrindo uma zona geográfica de elevado potencial. Em fevereiro de 2006, foi concedida à Unidade de Valorização Energética a Licença de Exploração n.º 2/2006/INR. Ainda no início de 2006, a empresa introduz uma nova atividade produtiva nas suas instalações fabris, nomeadamente a produção de pavimentos antichoque, destinados essencialmente a aplicações em parques infantis. Estes pavimentos são fabricados com recurso a granulado de borracha resultante de processos de reciclagem de pneus em fim de vida. Em 2006 a empresa adota uma nova imagem corporativa, modernizando-a e tornando-a mais coerente com as suas orientações estratégicas (Figura 3).



**Figura 3** Nova imagem corporativa da Recauchutagem Nortenha (arquivo da empresa).

Na perspetiva de promover a melhoria dos seus produtos, introduz novos equipamentos produtivos na linha de fabrico de pneus pesados. Ainda durante o ano 2006, a Nortenha implementou o Sistema *Activity Based Cost* (ABC), uma ferramenta de gestão que tem por base a melhoria do processo de gestão e o apuramento dos custos na ótica da contribuição, com o objetivo último, o acompanhamento do desempenho financeiro e não financeiro dos diferentes sectores de negócio da empresa. Com o objetivo da sensibilização para o consumo de produtos de marcas nacionais, a Nortenha aderiu à campanha nacional “Compro o que é nosso” valorizando a produção nacional, a criatividade e empreendedorismo dos empresários portugueses. Durante o ano 2007 deu-se início a uma série de investimentos relevantes para a unidade de recauchutagem, que incidem particularmente na aquisição de novos equipamentos produtivos destinados à linha de pneus “*Off the Road*” (OTR), que são pneus “fora de estrada”, feitos especificamente para atuar em terrenos anormais e duros. Ainda em 2007, deu-se continuidade ao alargamento da rede de retalho com a abertura de uma nova loja na Zona Industrial do Porto, reforçando a cobertura da área metropolitana do Porto. Em 2008, a Nortenha dotou-se da capacidade de recauchutar os maiores pneus existentes no mercado, com a aquisição de um novo equipamento de tecnologia de ponta de grossagem de pneus (operação que tem por fim remover o piso ainda existente, original ou da recauchutagem anterior), capaz de processar pneus até jante 63". Ainda em 2008, a Recauchutagem Nortenha colaborou no projeto “Caça ao Crocodilo” (“Crocodilo” é o

nome pelo qual são vulgarmente designados os restos de pneus encontrados nas estradas), promovido pela “Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneus” (ANIRP) e Universidade do Minho, com o patrocínio da “Valorpneu”, com o objetivo de identificar as causas das falhas dos pneus e contribuir para uma maior segurança rodoviária. No fim do ano de 2008, a Unidade de Valorização Energética obteve o averbamento à sua Licença de Exploração, autorizando-a à valorização energética de novas tipologias de resíduos não perigosos: resíduos têxteis, resíduos de plástico, combustíveis derivados de resíduos (CDR) de plásticos, têxteis e madeira e *fluff*, ou seja, resíduos leves resultantes da fragmentação de “Veículos em Fim de Vida” (VFV). Em 2009, a rede de retalho foi expandida para a região do Vale do Ave, com a abertura da 10ª loja da rede em Vila Nova de Famalicão [2].

Atualmente a empresa possui uma rede de 13 lojas, com cerca de 250 empregados e ultrapassa em faturação 18 milhões de euros/ano [3].

## 1.2 Objetivos deste estudo

Em Portugal, as caldeiras de produção de vapor existentes nas instalações industriais são, na sua grande maioria, equipamentos de média pressão, com timbres essencialmente de 1 MPa. Algumas dezenas de indústrias de cartão canelado utilizam geradores de vapor que não ultrapassam 1,4 MPa. Em todos estes casos trata-se de geradores para produção de vapor saturado.

Os geradores de vapor de pressões mais elevadas, algumas vezes superiores a 20 MPa, encontram-se em número que ronda as 20 unidades e são essencialmente dedicadas à produção de vapor sobreaquecido para posterior aplicação em turbina de produção de eletricidade. Quando estas centrais estão associadas a indústrias de celulose, refinarias e petroquímicas com necessidades de vapor para o processo industrial, normalmente é feita derivação da turbina de pressões intermédias. No caso de a central ser para uso de vapor unicamente para produção de eletricidade, o vapor final de expansão passa por um processo de condensação para de novo alimentar a caldeira. Nas centrais mais atuais, o tipo de combustível utilizado nestas caldeiras de alta pressão é o gás natural (Tabela 1), que veio substituir o carvão utilizado anteriormente.

**Tabela 1** Produtores em regime ordinário ligados à rede nacional de transporte – centrais termoelétricas [4].

<b>Centrais</b>	<b>Localização</b>	<b>Ano entrada em serviço</b>	<b>Potência instalada [MW]</b>	<b>Combustível</b>
Tapada do Outeiro	Gondomar	1998	990	Gás natural
Lares	Figueira da Foz	2009	826	Gás natural
Pego	Abrantes	1993	576	Carvão
Pego C. C.	Abrantes	2010	837	Gás natural
Carregado	Alenquer	1968	710	Fuelóleo/Gás natural
Ribatejo	Alenquer	2003	1176	Gás natural
Setúbal	Setúbal	1979	946	Fuelóleo
Sines	Sines	1985	1180	Carvão
Tunes	Silves	1973	165	Gasóleo
<b>Total</b>			<b>7407</b>	

Como é possível observar na tabela seguinte (Tabela 2) as centrais termoelétricas e cogerações a partir da queima de biomassa florestal têm vindo a ganhar cada vez maior implantação.

**Tabela 2** Centrais a biomassa em Portugal dados de 2014 [5].

Nome	Distrito	Potência instalada [MW]	Consumo de biomassa (t/ano)	Ano de entrada em funcionamento
<b>Centrais de cogeração</b>				
Amorim	Aveiro	1,1	n.d.	2004
Caima	Santarém	9	54 600	2001
CELBI	Coimbra	70	n.d.	1987
CELTEJO	Castelo Branco	30	n.d.	1992
Figueira da Foz (Lavos)	Coimbra	95	219 960	2004
Cacia	Aveiro	35,1	110 370	2005
Setúbal	Setúbal	53,9	168 480	2004
EUROPA&C Energia Viana	Viana do Castelo	38,8	n.d.	2002
SIAF	Viseu	4	n.d.	1996
COSTA IBÉRICA	Viseu	0,3	n.d.	2011
<b>Centrais termoelétricas</b>				
Centroliva	Castelo Branco	6	60 748	1998
Figueira da Foz	Coimbra	34,3	400 000	2009
PALSER	Castelo Branco	3	36 500	2010
Belmonte	Castelo Branco	2	24 300	2010
Constância	Santarém	13,7	140 000	2009
Mortágua	Viseu	9	115 000	1999
Ródão	Castelo Branco	13	140 000	2007
Cacia	Aveiro	12,5	146 000	2009
Setúbal	Setúbal	12,5	146 000	2009
Terras de Sta. Maria	Aveiro	10	121 500	2008

A queima de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para a produção de vapor e posterior produção de eletricidade, tem sido encarada com interesse na valorização energética. Em Portugal, existem quatro centrais termoelétricas deste tipo (incinerações): Lipor a

Norte (Porto), Valorsul em Lisboa, Valorambiente na Madeira e mais recentemente a Teramb (Figura 4) na Ilha Terceira (Açores).



**Figura 4** Incineração Teramb, Ilha Terceira (arquivo do autor).

Ainda no campo da valorização energética, a substituição de combustíveis fósseis por resíduos industriais não perigosos, como pneus em fim de vida, têm lugar em cinco cimenteiras: Secil em Maceira, Pataias e Outão e Cimpor em Loulé e Alhambra no uso de fornos e uma outra instalação onde a energia da combustão é utilizada na produção de vapor sobreaquecido para ser usado em turbina na produção de eletricidade [6]. Esta instalação, Recauchutagem Nortenha, é única em Portugal e está situada em Penafiel. Mais à frente, esta instalação irá ser descrita com mais pormenor, no entanto uma situação que se destaca na instalação é o facto da turbina com cerca de 2,8 MW de potência estar neste momento a produzir sensivelmente 50% desta potência.

São então objetivos deste estudo:

- Tomar conhecimento de um tipo de central termoelétrica com queima de resíduos industriais não perigosos;
- Perceber todas as fases do processo, desde a recolha de resíduos até à produção de energia elétrica;

- Investigar os pontos onde possíveis alterações possam conduzir a um aumento da energia elétrica produzida;
- Avaliar a exequibilidade técnica e económica das possíveis soluções preconizadas.

### 1.3 Organização desta dissertação

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- Introdução, que é ainda o atual capítulo, onde se pretendeu caracterizar a empresa e genericamente o tipo de instalação de valorização energética e os objetivos pretendidos com este estudo;
- Segue-se um capítulo de enquadramento nos aspetos: ambientais, sociais e económicos;
- De seguida tenta-se caracterizar a instalação o mais completamente possível e descrever os vários componentes e a sua importância na instalação;
- No capítulo seguinte tenta-se avaliar e destacar as possíveis situações com possibilidade de otimização;
- Nesta fase destacam-se as ações de melhoria a curto e médio prazo;
- Segue-se a avaliação de viabilidade das medidas de maior impacto;
- Indicam-se as referências bibliográficas;
- Anexos – juntam-se mapas e desenhos mais completos em que a sua incorporação a meio dos textos quebraria o ritmo da leitura.



## 2. ENQUADRAMENTO

2.1 Introdução

2.2 Aspetos ambientais

2.3 Gestão dos pneus usados



## 2. ENQUADRAMENTO

### 2.1 Introdução

O desenvolvimento sustentável dos transportes inclui o manuseamento correto dos pneus. Um dos fluxos mais importantes de resíduos resultantes dos transportes são os Pneus Usados (PU). Os resíduos de PU deverão ser, preferencialmente, prevenidos pela sua recauchutagem. A segunda opção deverá passar pela reciclagem para aplicações de construção civil, revestimentos ou pavimentos, por exemplo. Se não for possível qualquer outra aplicação, então deve-se encarar a valorização energética (Figura 5) [7]. A energia usada na reciclagem de materiais de borracha é de cerca de 2% da que foi consumida na produção de borracha com origem em material virgem. Relativamente à recuperação energética, a energia perdida representa três quartos da energia consumida na produção da matéria prima. A deposição em aterro dos PU, representa uma perda total de energia e materiais. Com efeito, desde 2006 esta solução está completamente proibida no espaço da Comunidade Europeia.

O consumo de energia na produção de pneus novos é enorme quando comparada à energia despendida na recauchutagem de pneus. Também o ambiente é poupado de quantidades notáveis de emissões de CO<sub>2</sub>, quer na recauchutagem quer na reciclagem [8].

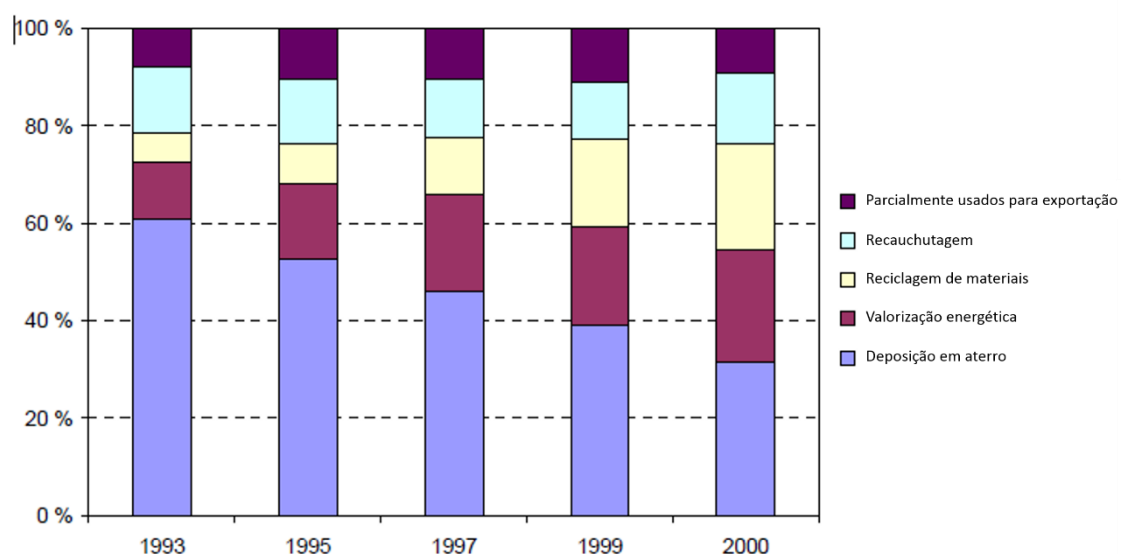


Figura 5 Tratamento dos PU na União Europeia [7].

## 2.2 Aspetos ambientais

### 2.2.1 Componentes do pneu

Para melhor compreensão do desenvolvimento deste ponto interessa ter uma ideia genérica dos principais componentes associados aos PU, que é o resíduo em questão.

Um pneu é tipicamente composto por três tipos de componentes:

- borracha (de origem natural e/ou sintética, com aditivos) que reveste o piso, o interior e as laterais do pneu;
- telas têxteis para reforço e flexibilidade;
- malha de aço que garante o seu reforço estrutural (Figura 6) [9].

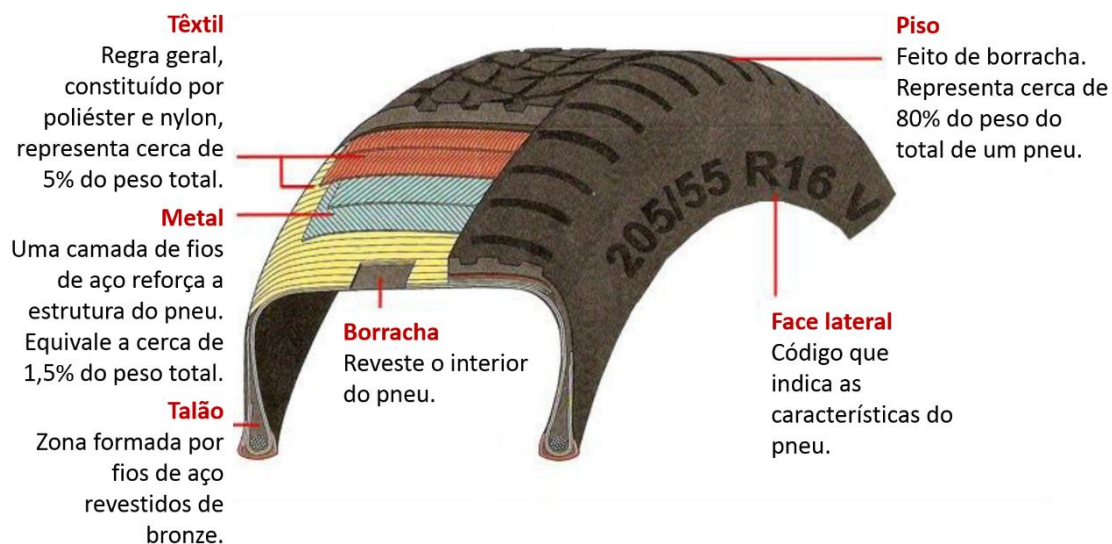


Figura 6 Principais componentes de um pneu [9].

A tabela seguinte (Tabela 3) apresenta a composição típica associada a um pneu novo e a composição estimada de um PU.

**Tabela 3** Composição material (%) de pneus novos e pneus usados [10].

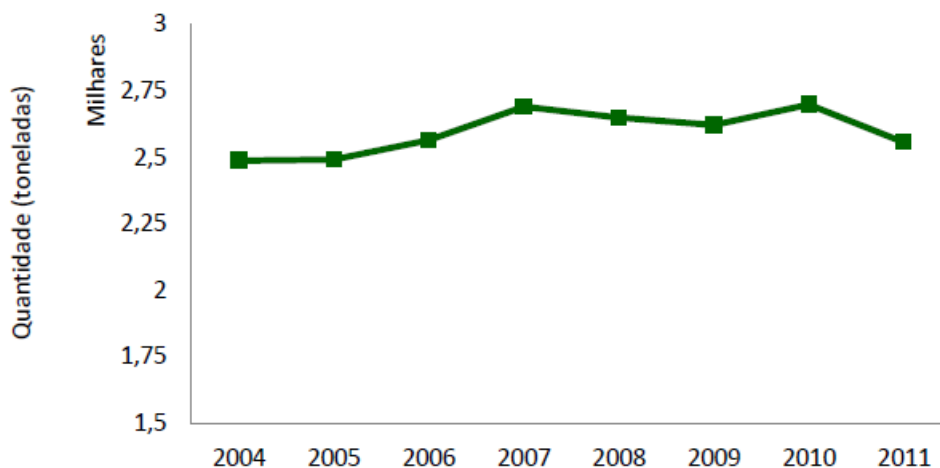
Material	Composição de pneus novos (%)	Composição estimada de PU (%)
Borracha sintética	25	22
Borracha natural	17	15
Negro de fumo	19	15,5
Sílica	10	9
Enxofre	1,3	1,5
Óxido de zinco	1,6	1,2
Óleos aromáticos	6	3,8
Malha de aço	11,4	18
Malhas têxteis	4,7	14
Outros	4	-

### 2.2.2 Pneus usados

Os PU podem ser encaminhados para recauchutagem ou reutilização, após um processo industrial de acordo com as especificações técnicas aplicáveis, com vista à sua reutilização, sendo de novo colocado no mercado. Neste caso, o pneu recauchutado é designado como PR.

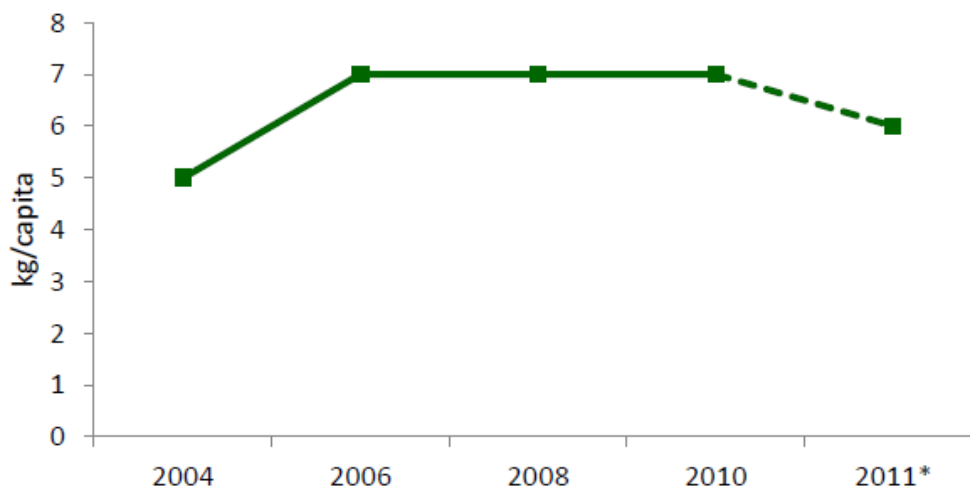
Finalmente, consideram-se pneus em fim de vida (PFV) todos os PU que, não estando aptos para ser reutilizados e/ou recauchutados, são encaminhados para um destino adequado (reciclagem ou valorização energética) [9].

De acordo com a *European Tyre & Rubber Manufacturer's Association* [11], a geração de PU na UE em 2011 foi cerca de 3,1 milhões de toneladas, 19% dos quais foram encaminhados para reutilização, exportação ou recauchutagem, sendo os restantes 81% considerados efetivamente como PFV (Figura 7). Este valor representa cerca de 0,14% do total de resíduos gerados na UE [12], um valor que se mantém relativamente estacionário desde 2006.



**Figura 7** Evolução da geração de pneus em fim de vida na EU [11].

Segundo dados da *European Tyre & Rubber Manufacturer's Association* (ETRMA), em 2011, a capitação média na EU27 de PU rondava os 6,29 kg/(habitantes.ano) e a capitação de PFV rondava os 5,07 kg/(habitantes.ano) (Figura 8) [11]. Considerando os dados fornecidos pelo Eurostat, é possível verificar-se uma tendência de decréscimo, comparativamente a anos anteriores, que pode estar associado ao abrandamento na venda de automóveis em território europeu [11].



**Figura 8** Evolução da capitação de pneus em fim de vida na EU [11 ,12].

No entanto, entre os vários membros da EU a produção de PFV *per capita* varia bastante, desde 10 kg/(habitantes.ano) na Finlândia até aos 3 kg/(habitantes.ano) na Bulgária, Holanda e Roménia. Em Portugal, a produção de PU em 2011 situava-se nas 90.000 toneladas, a de PR em 17.000 toneladas e a de PFV em 72.000 toneladas – o que se traduz na produção de 7 kg/(habitantes.ano) de PFV [11].

### 2.2.3 Problemas ambientais

Estima-se que o crescimento mundial na procura de pneus será de 4,3 % por ano (*World Tyres Industry*) tendo sido atingido o impressionante número de  $2,9 \times 10^9$  de unidades em 2017 [13].

O ciclo de vida do pneu (Figura 9) geralmente consiste em cinco grandes estágios compreendendo: extração da matéria prima, produção, consumo (uso), recolha dos resíduos dos pneus e processamento para reciclagem ou deposição, dependendo das condições locais de cada País ou Região onde os pneus são produzidos ou vendidos [14].

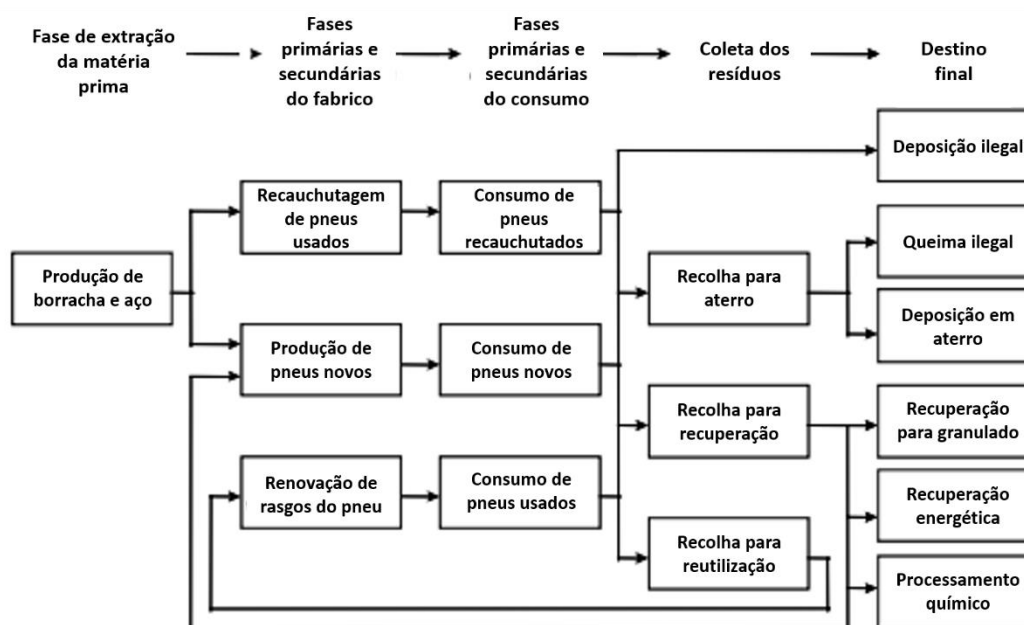
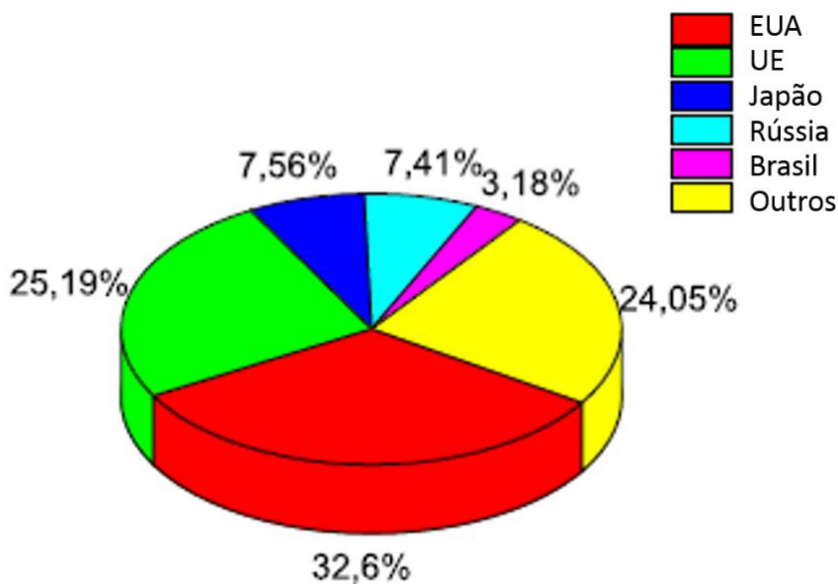


Figura 9 Ciclo de vida do pneu [14].

Em 2013, a produção de resíduos de pneu por região em milhões de toneladas foi: 4,4 nos Estados Unidos, 3,4 na Europa, 1,02 no Japão, 1 milhão na Federação Russa, 0,365 no Brasil e 3,31 no resto do Mundo 3,31. No gráfico apresentado a seguir (Figura 10) encontra-se representada esta distribuição [15].



**Figura 10** Volume Mundial de resíduos de pneus em 2013.

A deposição incorreta de resíduos de pneus pode conduzir à acumulação de água da chuva, criando condições favoráveis à propagação de infecções e doenças. Também é possível a autoignição de grandes camadas de pneus, poluição de águas subterrâneas e do ar. Nas deposições em aterros e durante a decomposição são libertados gases que se vão acumulando do interior do pneu acabando por “flutuarem” à superfície, afetando a integridade do aterro e potencializar os problemas acima referidos. Relembrando o que foi dito anteriormente, na UE, supostamente desde 2006 a deposição de pneus usados em aterro não é permitida [15].

A tabela (Tabela 4) que se segue resume os principais riscos deste tipo de opção.

**Tabela 4** Riscos ambientais associados a uma gestão danosa de pneus usados [16].

Risco	Descrição
Pragas	As pilhas dos pneus são um <i>habitat</i> preferencial para insetos e roedores devido à acumulação de água no seu interior. Esta situação é tanto mais grave em países tropicais, onde estes animais são portadores de doenças graves como o dengue ou encefalite.
Focos de incêndio	Quando grandes quantidades de pneus são depositadas de modo não controlado, existe um risco de incêndio latente. O seu baixo índice de ignição e elevado poder calorífico torna este tipo de fogos difíceis de extinguir. Estes tipos de incêndios geram emissões de grandes quantidades de calor e gases tóxicos, e o lixiviado oleoso resultante é altamente inflamável e pode contaminar águas superficiais, lençóis freáticos e o solo com chumbo, arsénico e outras toxinas. A matéria particulada e outros componentes lançados para a atmosfera causa também sérios riscos ambientais e de saúde, uma vez que estes materiais possuem um elevado tempo de residência, gerando várias complicações a nível pulmonar e de outros órgãos internos, além de alergias graves.
Paisagem	A deposição não controlada de pneus nas imediações de áreas residenciais, estradas, áreas industriais e ambientes naturais geram efeitos adversos ao nível da saúde ambiental e humana, mas também representam um impacto importante na paisagem. Embora esse impacto não gere efeitos diretos na saúde, podem gerar impactes económicos significativos, afastando moradores e indústrias, ou mesmo reduzindo o valor imobiliário.
Lixiviação de toxinas	A presença de pneus em aterros pode levar à acumulação de gases (e.g. metano), que por sua vez podem causar estragos na estrutura e proteção do aterro. Esses estragos podem conduzir à lixiviação de toxinas presentes no material em degradação para fora da barreira do aterro.

A reutilização é, atualmente, na reciclagem de pneus, a melhor opção. Cerca de 40% da borracha do pneu forma o seu piso, ficando ainda 60% em resíduo de pneu, após o piso gasto. A recauchutagem permite, com a adição de um novo piso, a reutilização do pneu. Com este processo reduz-se a borracha para um pneu “novo” e reduz-se os custos de produção.

A reciclagem de pneus na produção de novos produtos é outra opção no aproveitamento de resíduos de pneus. São possíveis exemplos destes produtos: reservatórios de líquidos, base de pavimentos rodoviários, piso de revestimento em parques infantis, campos desportivos, tapetes e muitas outras aplicações semelhantes. Industrialmente, diversas cimenteiras já utilizam em grandes fornos rotativos, o pneu como combustível alternativo. Outras aplicações são o fabrico de granulado e pó de borracha para produtos de borracha, borracha ou asfaltos, a laminação dos resíduos de pneus para solas de sapatos e o revestimento de tubagens. A figura seguinte (Figura 11) representa o ciclo de vida do pneu [15].

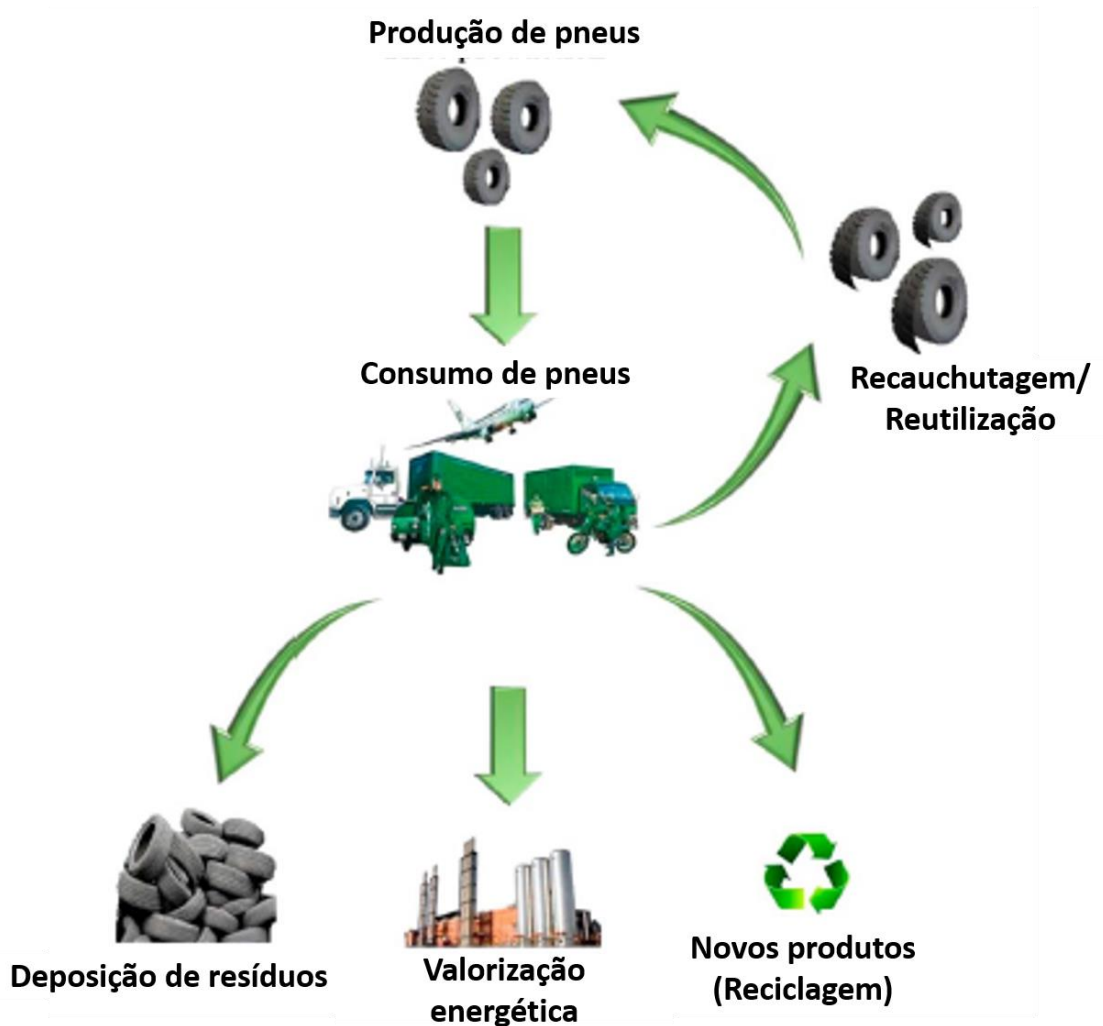


Figura 11 Ciclo de vida do pneu.

A valorização energética embora não seja reciclagem, é uma opção de grande importância económica do uso dos resíduos de pneus, em que a reciclagem já não é viável.

## 2.3 Gestão dos pneus usados

### 2.3.1 Política europeia na gestão dos pneus usados

Segundo a “*European Tyre and Rubber Manufacturers Association*” [11] em 2011 foram produzidos na UE cerca de 3168 milhões de pneus usados. Embora a percentagem relativamente aos resíduos seja de 0,14 %, parecendo pouco significativa como se viu anteriormente, tem impactos manifestamente muito negativos caso não seja dada a devida importância na sua gestão [11]. Esta importância ainda é mais relevante quando uma gestão adequada deste tipo de resíduo pode dar origem a produtos secundários bastante importantes na substituição de recursos primários. Neste sentido, a nível da UE foram introduzidas algumas disposições. Foi estabelecida a proibição da deposição de PU inteiros em aterros desde 2003 e com a Diretiva Aterro (99/31/EC) foi proibida desde 2006 a deposição em aterros para PU fragmentados. Estas restrições induzem cada Estado Membro na procura e desenvolvimento de soluções alternativas à sua deposição em aterros [1]. Estão incluídos neste objetivo também os pneus recuperados de veículos em fim de vida (VFV). A Diretiva 2000/53/EC estabelece a obrigatoriedade de remoção dos pneus de VFV e garantir a reciclagem, recauchutagem ou a valorização energética.

Na Europa ao longo dos anos foram-se desenvolvendo três sistemas de gestão PU [17]:

- Modelo de Responsabilidade Alargada do Produtor;
- Sistema de taxas;
- Mercado livre.

Estes sistemas foram assumidos pelos vários países (Figura 12).

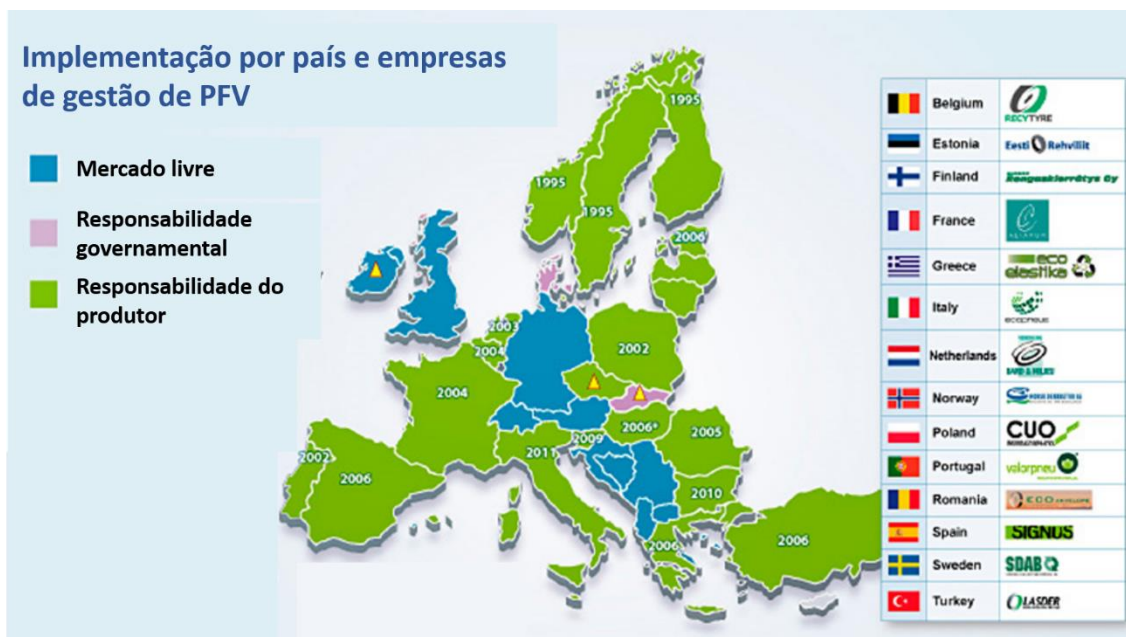
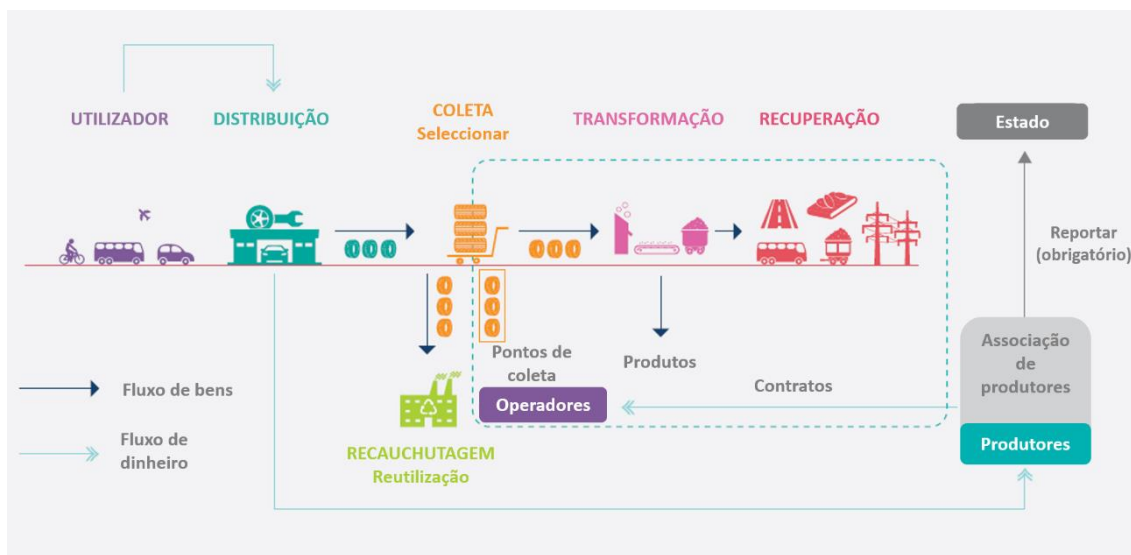


Figura 12 Sistemas de gestão de PU na Europa [18].

Em linhas gerais estes sistemas são tipificados nos seguintes modelos:

- 1) *Modelo de Responsabilidade Alargada do Produtor*, (o mais comum na UE) em que a gestão dos PU é da responsabilidade do produtor e importador de pneus. Este modelo obriga legalmente estas entidades a organizar a recolha de PU e assegurar os níveis de valorização exigidos pelo Estado, segundo o esquema da Figura 13;
- 2) *Sistema de taxas*, em que se impõe aos produtores e vendedores uma taxa de deposição a adicionar ao preço de cada pneu vendido e que é paga ao Estado. A gestão de PU fica assim a cargo de operadores de gestão de resíduos, sendo que essa operação é financiada pelo Estado;
- 3) *Mercado livre*, que assume a rentabilidade da valorização e reciclagem de pneus pelo que as empresas competem ao nível da sua gestão.



**Figura 13** Esquema do Modelo de Responsabilidade Alargada do Produtor [18].

### 2.3.2 Política de gestão dos pneus usados em Portugal

Portugal adotou o *Modelo de Responsabilidade Alargada do Produtor*. Com a publicação do Decreto-Lei n.º 111/2001 de 6 de abril, o Governo Português pretendeu estabelecer uma hierarquia na gestão dos pneus usados. Foi conferida prioridade à prevenção da produção destes resíduos, sem prejuízo da sujeição à legislação em vigor em matéria de segurança e circulação rodoviária, seguindo-se por ordem de preferência a reciclagem e outras formas de valorização, em harmonia com as normas vigentes em matéria de qualidade ambiental. Este diploma proíbe a combustão sem recuperação energética, a deposição em aterro, em conformidade com a diretiva 1999/31/CE. Para o Governo, o cumprimento dos objetivos pretendidos passa pela corresponsabilização dos vários intervenientes no ciclo de vida dos pneus, sendo, neste sentido, necessária a definição das medidas e ações a desenvolver e sua calendarização.

Uma das medidas preconizadas neste diploma corresponde à necessidade da implementação de circuitos de recolha de pneus usados, para assegurar uma correta triagem dos pneus passíveis de recauchutagem e encaminhamento dos restantes para reciclagem ou outras formas de valorização [19].

Na sequência do referido Decreto-Lei, os produtores de pneus organizaram-se, conjuntamente com os industriais dos sectores de recauchutagem de pneus e de borracha e formaram a Valorpneu – Sociedade de Gestão de Pneus, Lda.

---

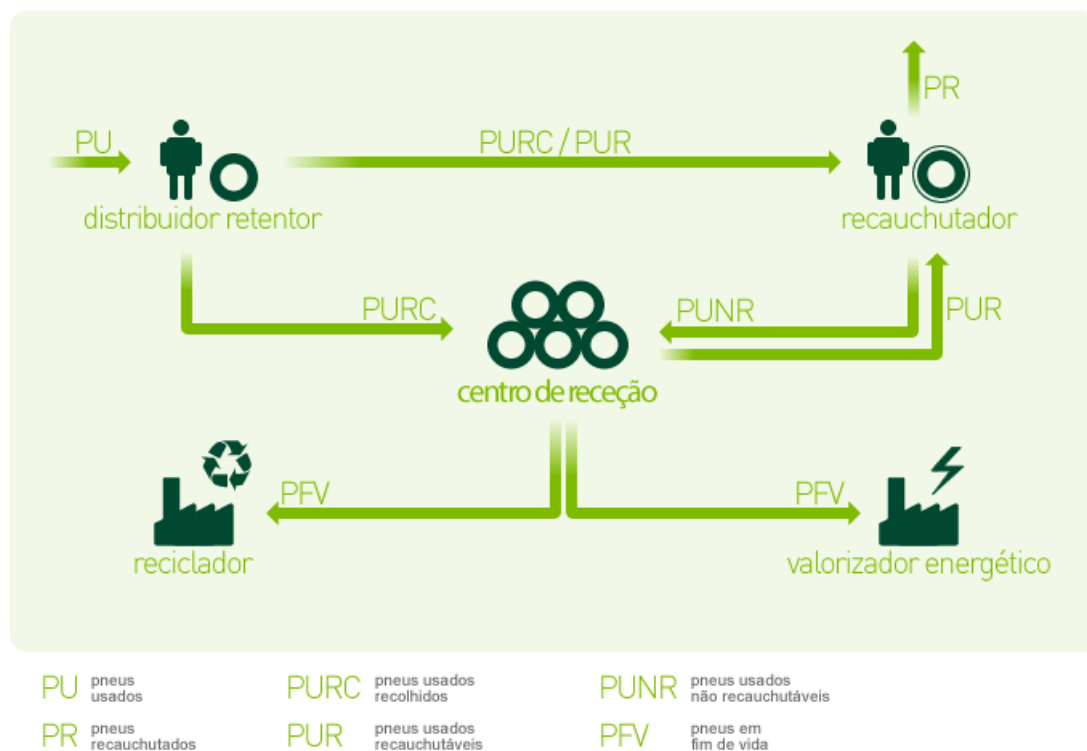
A Valorpneu é uma sociedade por quotas, sem fins lucrativos, constituída no dia 27 de fevereiro de 2002, com o objetivo de organizar e gerir o sistema de recolha e destino final de pneus usados. Foi licenciada, pela primeira vez, em 7 de outubro de 2002 pelos Ministérios da Economia e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, como entidade gestora do Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados (SGPU), sistema este que iniciou o seu funcionamento em 1 de fevereiro de 2003.

O capital social da Valorpneu está dividido em 3 quotas, distribuídas da seguinte forma: Associação Automóvel de Portugal (ACAP), a Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneus (ANIRP) e finalmente a Associação Portuguesa dos Industriais de Borracha (APIB).

O Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados desenvolvido pela Valorpneu começa com a introdução de pneus novos ou usados no mercado nacional. Qualquer empresa que importe pneus novos ou usados tem de celebrar um contrato com a Valorpneu, para que se possa faturar o Ecovalor respetivo dos pneus importados. Cada pneu introduzido no mercado nacional deve pagar uma única vez o Ecovalor. Este Ecovalor, devido aquando da venda de um pneu e cobrado pelos Produtores de pneus, financia o sistema da Valorpneu e que remunera a prestação do seu serviço.

Para os distribuidores (ou quaisquer detentores de pneus usados) entregarem os seus pneus usados encontra-se disponível uma rede de Centros de Receção distribuída pelo território nacional, onde qualquer empresa pode descarregar os seus pneus usados a custo zero (o único custo que as empresas têm é o transporte até ao Centro de Receção mais próximo). Posteriormente, os pneus são encaminhados pela Valorpneu dos Centros de Receção para os Pontos de Destino, sendo processados de acordo com as metas estabelecidas (essencialmente para reciclagem e valorização energética).

A Figura 14 indica os fluxos dos PU na estrutura organizada pela Valorpneu [20].



**Figura 14** Fluxos dos PU conforme destinos pretendidos.

Nesta estrutura privilegia-se o funcionamento dos mecanismos de mercado existentes e que demonstram funcionar e promove-se a viabilidade económica e financeira de atividades/agentes económicos que contribuam para o cumprimento das metas de eficiência ambiental propostas no Decreto-Lei nº 111/2001. Os diversos intervenientes no sistema de gestão dos pneus em fim de vida, os quais apresentam vários direitos e responsabilidades, são os seguintes:

Os **Distribuidores/Detentores** que podem entregar os pneus em fim de vida nos Centros de Receção, livres de encargos. Poderão, igualmente, se assim o entenderem, cedê-los aos recauchutadores. Nesta situação encontram-se quaisquer operadores, empresas ou entidades (oficinas, estações de serviço, lojas especializadas, desmanteladores, grandes frotistas, autarquias, particulares, etc.), que por qualquer motivo detenham pneus usados. Os distribuidores de pneus não poderão recusar-se a aceitar pneus usados contra a venda de pneus do mesmo tipo e na mesma quantidade.

Os **Recauchutadores**, cerca de 23, podem colocar nos Centros de Receção os pneus usados resultantes da triagem de carcaças para recauchutar, sem quaisquer custos. Os

---

recauchutadores, se assim o entenderem, poderão também adquirir carcaças para recauchutar nos Centros de Receção.

Os **Centros de Receção**, num total de 48, são locais de armazenamento temporário de pneus usados, os quais funcionam como um “reservatório” a montante dos valorizadores. Estes operadores são a primeira face visível do SGPU, e aceitam, livres de encargos, qualquer tipo de pneus.

Com os Centros de Receção pretende-se atingir dois objetivos da maior importância:

- controlar e quantificar todos os fluxos de pneus usados encaminhados para valorização e outros destinos;
- disponibilizar uma rede de recolha adequada e distribuída uniformemente por Portugal.

Mediante uma contrapartida financeira e de acordo com as metas legais existentes, os **Recicladores (3)** e **Valorizadores Energéticos (6)** fecham o ciclo do SGPU, recebendo os pneus em fim de vida provenientes dos Centros de Receção, e processando-os em granulado de borracha dando-lhes destino de reciclagem adequado (recicladores), ou energia (valorizadores energéticos).

O transporte dos pneus em fim de vida desde os Centros de Receção até aos Valorizadores é assegurado pelos **Transportadores**, e é controlado e financiado pela Valorpneu.

Detalhando um pouco mais estes fluxos e operações envolvidas, tem-se que os pneus usados expedidos pelos Centros de Receção podem seguir quatro destinos:

**Reutilização:** aproveitamento do pneu, que ainda se encontra em condições, sendo de novo colocado no mercado para continuar a ser utilizado para o mesmo fim (reutilização meio-piso), ou aproveitamento do pneu, sem necessidade de qualquer pré-processamento, para utilização com fim diverso do qual foi concebido (reutilização para outros fins);

**Recauchutagem:** operação pela qual um pneu já utilizado, após cumprir o seu ciclo de vida, é reconstruído de modo a permitir a sua utilização para o mesmo fim para o qual foi projetado;

**Reciclagem:** processamento de pneus usados para qualquer fim, que não o inicial, nomeadamente como matéria-prima a incorporar noutros produtos (por exemplo; Betume Modificado com Borracha para pavimentação de vias rodoviárias, pisos de parques infantis, relva sintética, etc.)

Os Recicladores que operam com a Valorpneu são a Biosafe, localizada em Ovar, a Biogoma, localizada em Tremês, e a Recipneu, localizada em Sines. As duas primeiras operam através de um processo mecânico enquanto que a última possui um processo criogénico;

**Valorização energética:** processamento de pneus usados por combustão para recuperação energética. Os pneus usados podem ser utilizados no processo como combustível complementar ou alternativo para o fabrico de cimento ou para a produção de eletricidade e vapor em unidades de cogeração, devido ao seu elevado poder calorífico [21].

O poder calorífico dos pneus pode variar dependendo da sua tipologia, apresentando valores médios de 26,4 MJ/kg para pneus pesados e cerca de 30,2 MJ/kg para pneus ligeiros (Aliapur, 2009), assim como na forma como são consumidos, onde podemos ter 25 MJ/kg (Boesch, 2009) para pneus inteiros ou cerca de 36 MJ/kg para pneus granulados (Uson, 2013). A Tabela 5 Indica alguns valores do poder calorífico dos pneus e outros combustíveis [21].

**Tabela 5** poder calorífico dos pneus e outros combustíveis [21].

<b>Combustível</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>
Pneus	25-35
Carvão	27
Petcoke	32
Gasóleo	46
Gás natural	39
Madeira	10

A aplicação em cimenteiras permite ainda valorizar materialmente a fração não combustível dos pneus consumidos (cinzas), devido à sua incorporação no produto final (clínquer). Esta percentagem de valorização material varia consoante a tipologia dos

---

pneus, podendo ir de 19,1% no caso de pneus ligeiros até 29,6% no caso de pneus pesados [9].

A utilização de pneus usados como combustível alternativo permite ainda a redução de emissões por combustão da biomassa, face à utilização de combustíveis fósseis, devido à componente de borracha natural existente nos pneus (fonte de carbono renovável).

Como já foi referido, a valorização energética ocorre em seis instalações e que são as seguintes: as três fábricas de cimento do Grupo Secil, localizadas em Maceira, Pataias e Outão, duas fábricas de cimento do Grupo Cimpor, Alhandra e Loulé, **e a instalação de cogeração da empresa Recauchutagem Nortenha, localizada em Penafiel e que é o motivo desta dissertação.**

Para se concluir este capítulo faz-se um breve resumo dos indicadores da Valorpneu dos últimos anos e que refletem os resultados da Política Nacional na Gestão dos Pneus Usados. Como estes indicadores recorrem do peso total dos pneus usados e para se ter uma ideia mais concreta das quantidades envolvidas na Tabela 6 indicam-se as diferentes massas conforme a categoria do pneu [20].

**Tabela 6** Peso médio por categoria de pneus colocados no mercado.

<b>Código</b>	<b>Categoria</b>	<b>Massa média (kg)</b>	<b>Ecovalor (€/pneu)</b>
<b>T</b>	Ligeiro de passageiros/Turismo	8,58	1,05
<b>4x4</b>	4x4 "on/off road"	14,68	1,80
<b>C</b>	Comercial	12,76	1,56
<b>P</b>	Pesado	60,83	7,44
<b>A1</b>	Agrícola (diversos)	22,44	2,75
<b>A2</b>	Agrícola (rodas motoras)	73,98	9,05
<b>E1</b>	Industrial (8" a 15")	12,68	1,55
<b>E2</b>	Maciço ( $\leq 15''$ )	29,23	3,58
<b>G1</b>	Engenharia civil (<24") e maciços (16" a 23")	65,29	7,99
<b>G2</b>	Engenharia civil ( $\geq 24''$ ) e maciços ( $\geq 24''$ )	310,67	38,02
<b>M1</b>	Moto (>50 cc.)	5,35	0,65
<b>M2</b>	Moto (até 50 cc.)	1,67	0,20
<b>F</b>	Aeronaves	8,58	1,05
<b>B</b>	Bicicletas	0,60	0,07

As Tabelas 7 e 8 reúnem os resultados desde o início de 2003. Claramente, a valorização energética representa uma percentagem muito importante atingindo cerca de 25% dos pneus do SGPU. Particularizando a Recauchutagem Nortenha, esta ultrapassa as 6000 ton/ano. Mais adiante será indicado em detalhe o desempenho desta empresa [20].

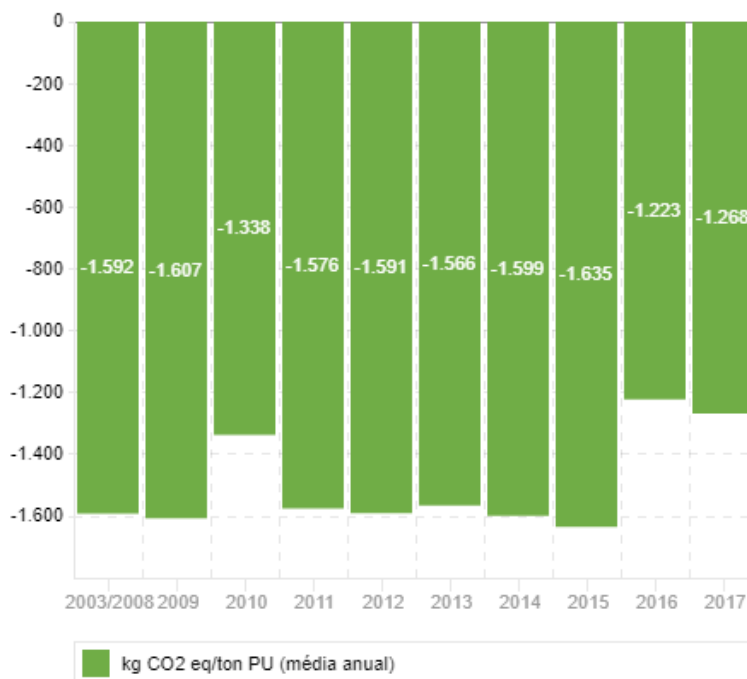
Tabela 7 Resultados desde o início em 2003 [20].

<b>Resultados da Valorpneu (ton)</b>	<b>2017</b>	<b>2016</b>	<b>2015</b>	<b>2014</b>	<b>2013</b>	<b>2012</b>	<b>2011</b>	<b>2010</b>	<b>2009</b>	<b>2003/2008</b>
<b>Pneus colocados no mercado (pagam ecovalor)</b>	88462	89042	82783	79375	70625	62431	72785	83294	78349	453920
<b>Pneus usados gerados</b>	76657	80283	76692	77946	71319	65231	78881	89058	86959	499754
Pneus enviados para recauchutagem	11100	11962	12744	13672	13291	13962	17071	18107	18639	129817
Pneus enviados para reutilização	760	929	1241	609	864	620	563	550	1019	6657
Pneus enviados para reciclagem	48933	47099	46887	43779	38408	39203	47595	49957	48039	237175
Pneus enviados para valorização energética	20499	23479	22842	26621	26132	24483	25144	25759	21878	110201
Pneus enviados para aterro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6842
<b>Pneus usados gerados recolhidos no SGPU</b>	81292	83469	83714	84681	78695	78268	90373	94373	89575	490693
Processamento de existências - val. energética	-	296	411	796	788	846	2094	3643	4190	36952
Processamento de existências - reutilização	-	-	-	-	-	-	900	-	1	54
Processamento de existências - aterro / pneus ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1263
<b>Quantidade total processada pelo SGPU</b>	81292	83765	84125	85477	79483	79114	93367	98016	93766	528962

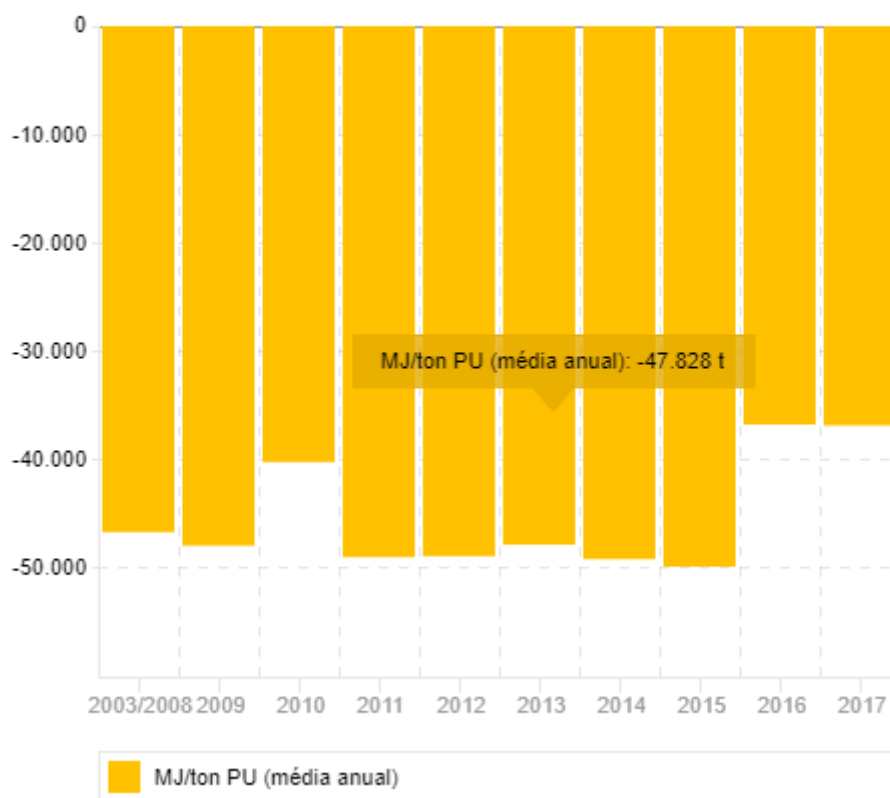
**Tabela 8** Resultados atingidos.

Resultados Atingidos	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2003/2008
Taxa de Recolha no âmbito do SGPU	106%	104%	109,2%	108,6%	110,3%	120%	114,6%	106%	103%	98,2%
Taxa de Prep. p/ Reut. +	15,5%	16,1%	18,2%	18,3%	19,8%	22,4%	22,4%	20,9%	22,6%	27,3%
Recauchutagem										
Taxa de Reciclagem	79,3%	73,4%	78,6%	72,3%	70,7%	81,6%	81,9%	74,7%	75,3%	67,0%

Nas figuras que se seguem (Figuras 15 e 16) estão refletidos os resultados ambientais da gestão de PU, da redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e a diminuição no consumo de energia que também este SGPU permitiu [20].

**Emissões de GEE evitadas pela gestão de pneus usados****Figura 15** Redução de GEE com o SGPU.

### Consumo de energia evitado pela gestão de pneus usados



**Figura 16** Redução de Energia com o SGPU.

# 3. LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO

3.1 Descrição geral

3.2 Descrição por equipamento



### 3. LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO

#### 3.1 Descrição geral

As instalações fabris da Recauchutagem Nortenha (Figura 17) situam-se em Urrô, Penafiel.



**Figura 17** Vista aérea da Recauchutagem Nortenha.

Na vista aérea da Figura 17 é possível identificar:

- 1 – Unidade de Recauchutagem;
- 2 – Unidade de valorização energética;
- 3- Armazenagem de PU e outros resíduos industriais;
- 4 – Central de vapor da Unidade de Recauchutagem;
- 5 – Aeroarrefecedores.

A empresa tem capacidade de produção de eletricidade de cerca 2,8 MWh, ou seja, cerca de 14000 t/ano de pneus usados.

Inicialmente, a queima era exclusivamente de pneus para produção de calor e consequentemente produção de vapor para um turbo gerador, gerando assim eletricidade. O diagrama simplificado seria semelhante ao da Figura 18 [22].

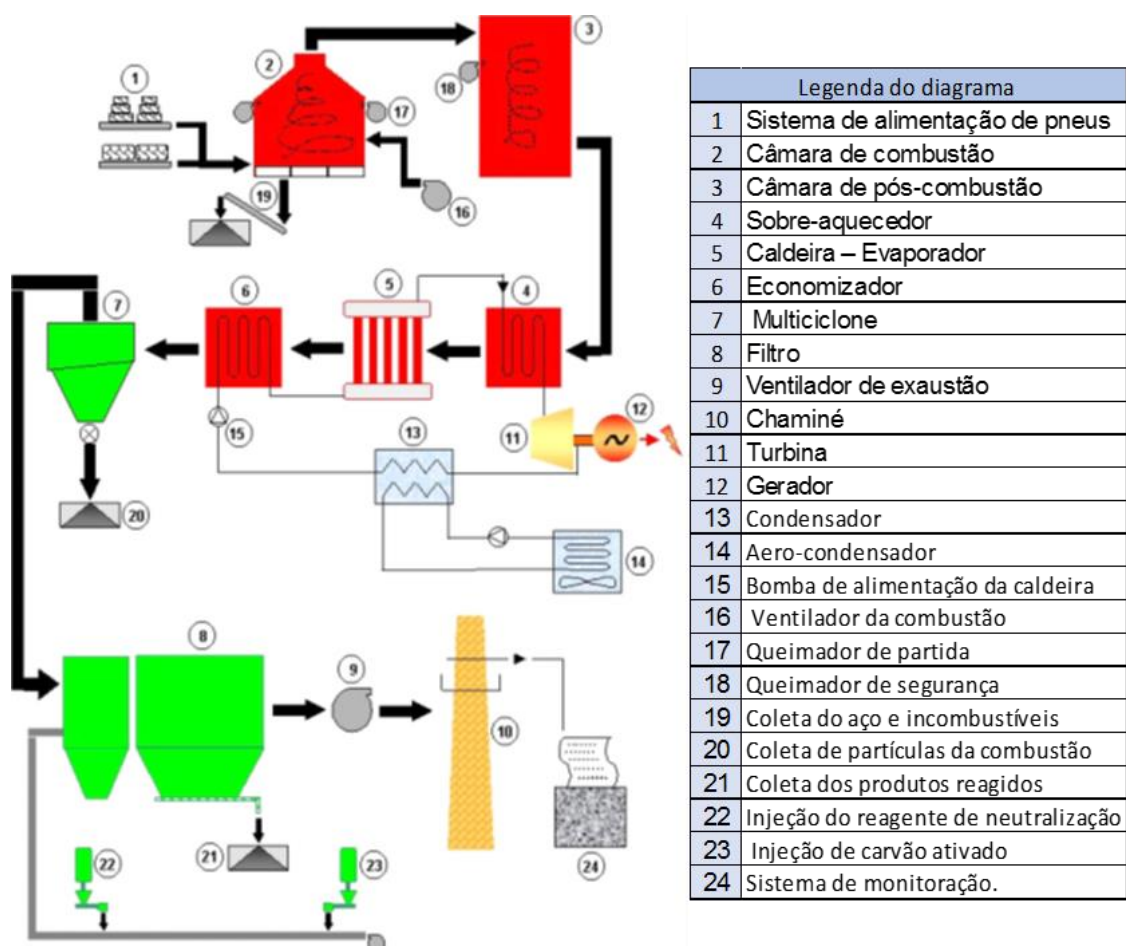


Figura 18 Diagrama simplificado do processo de incineração da UVEP [22].

## 3.2 Descrição por equipamento

### 3.2.1 Câmaras de combustão primária e secundária

O pneu é colocado sobre um transportador de correias que segue até a alimentação do forno de combustão primário, passando por uma balança para verificação da massa dos pneus. A Figura 19 mostra o processo de alimentação do material na lateral do forno, por meio de um sistema de portas duplas alternadas, para evitar perda excessiva de

temperatura. Ao final de uma rotação completa é transferido para uma zona interna intermediária onde descreve mais uma rotação. Terminada esta fase restam apenas escórias que são, então, conduzidas para um poço central. A velocidade de rotação é de quatro rotações por hora, portanto cada pneu terá um tempo de permanência de 30 minutos.



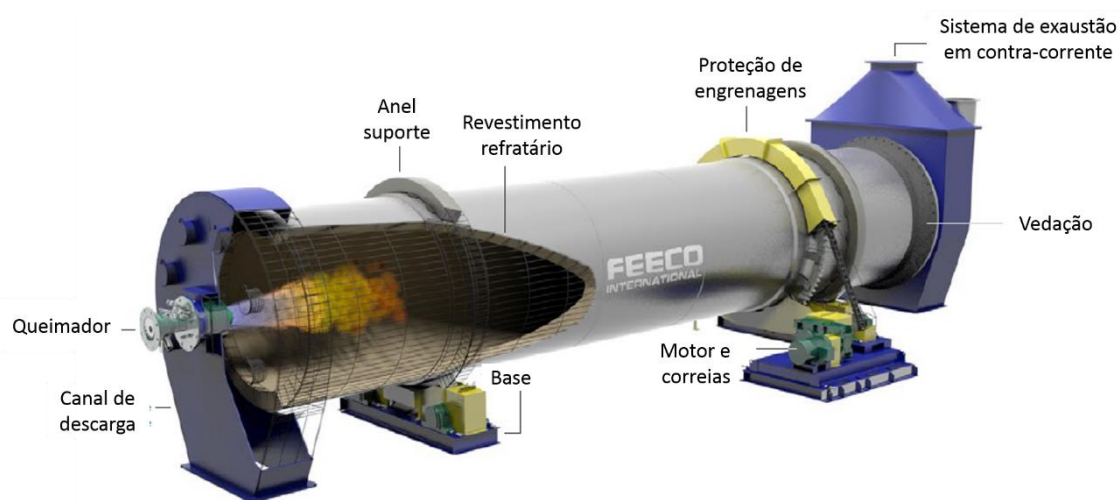
**Figura 19** Unidade de combustão primária e secundária da Nortenha Portugal (arquivo da empresa).

Da câmara de combustão primária, que opera a uma temperatura em torno de 850 °C, os gases seguem para a câmara de combustão secundária, operando a uma temperatura de 1100 °C, garantindo, dessa forma, uma permanência mínima de 2 segundos. Nesta fase é garantida a combustão o mais completa possível de todo o material que compõe os pneus [23].

Este sistema, embora bastante eficiente, obrigava que o material para queima fosse constituído exclusivamente por pneus inteiros, uma vez que todo o mecanismo está concebido para este tipo de carga. Com a evolução, nomeadamente da reciclagem dos PU, não era possível a queima de, por exemplo, pneus triturados e muito menos outro tipo de resíduos industriais não perigosos, tais como plásticos, papel e têxteis em que a Recauchutagem Nortenha possui licença da APA.

A Administração da Recauchutagem Nortenha, atenta a esta limitação, decidiu investir num novo tipo de forno rotativo (*“rotary Kiln”*) que em Portugal apenas se podem

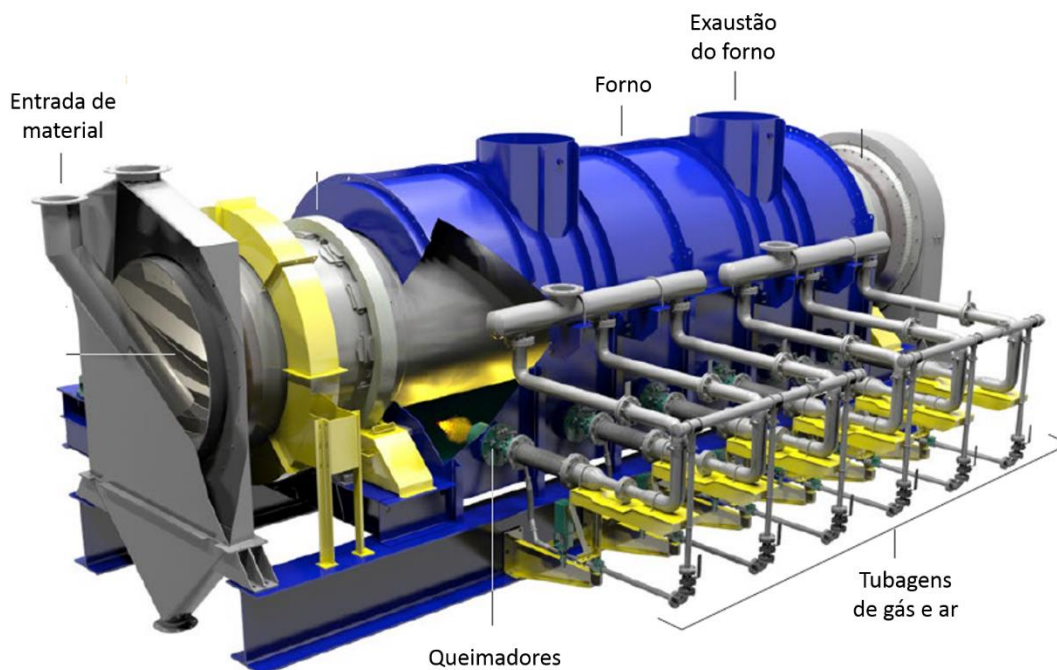
encontrar num limitado número de instalações industriais, como as Cimenteiras e Fábricas de Celulose como a *Navigator*. A Figura 20 dá uma ideia dos componentes de um forno rotativo similar ao da central da Recauchutagem Nortenha.



**Figura 20** Forno rotativo [24].

Destaque para o Queimador, utilizado para a queima de arranque e em que, neste caso, é utilizado o gasóleo, o corpo cilíndrico revestido internamente a refratário, o anel de suporte e o sistema de engrenagem.

Um forno rotativo é usado para o aquecimento de sólidos até a um ponto em que se verifique uma reação química ou mudança física. Durante o seu funcionamento os materiais a serem processados são mantidos a uma temperatura bem definida e durante um período preciso de tempo. As temperaturas e tempos de retenção são determinados através da construção de perfis de temperatura, baseados em exaustivas análises químicas e térmicas do material. O forno rotativo compreende um cilindro rotativo, dimensionado especificamente para a temperatura e tempos de retenção dos materiais. Estes fornos são instalados ligeiramente inclinados de modo a permitir a ação da gravidade dando assim alguma assistência na movimentação dos materiais a ser processados. No diagrama da Figura 18 as posições 2 e 3 foram substituídas pela seguinte sequência: forno rotativo com câmara primária e câmara de pós combustão. Os fornos rotativos também podem ser de queima indireta nos casos em que o material é processado num ambiente inerte e é aquecido pelo contacto com o corpo do cilindro rotativo, que por sua vez é aquecido pelo exterior, como se exemplifica na Figura 21 [24].



**Figura 21** Forno Rotativo – aquecimento indireto [24].

Estes tipos de fornos podem-se encontrar, por exemplo, nos processos de Caustificação.

### 3.2.2 Caldeira e sobreaquecedor

Depois da passagem pela câmara de combustão secundária, os gases seguem diretamente para a caldeira, onde o seu calor será aproveitado para produzir vapor sobreaquecido de alta pressão.

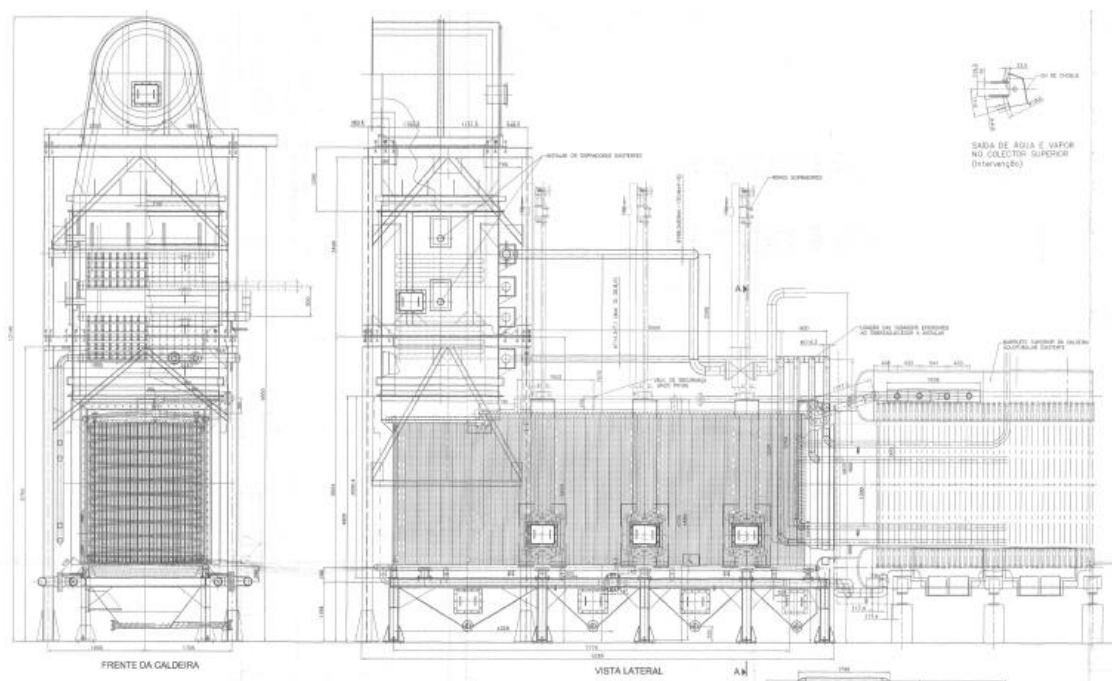
A Figura 22 mostra o aspeto exterior da caldeira de produção de vapor da Recauchutagem Nortenha. A maior parte do vapor será utilizada na produção de eletricidade e para isso passará pelo sobreaquecedor. Há ainda uma parte substancial de vapor (vapor saturado), embora de alta pressão, que não chega a passar pelo sobreaquecedor, e que será conduzido por uma estação de redução de pressão para cerca de 0,9 MPa e que será consumido na fábrica nas prensas de recauchutagem.



**Figura 22** Instalação da caldeira (arquivo da empresa).

Os fumos resultantes da queima de resíduos industriais não perigosos (neste caso resíduos de pneus usados, plásticos e têxteis) são usados no aquecimento do fluido de trabalho, que neste caso é água. O conjunto de tubos que permitem a transferência de calor entre os fumos e o fluido de trabalho designa-se por tubular da caldeira.

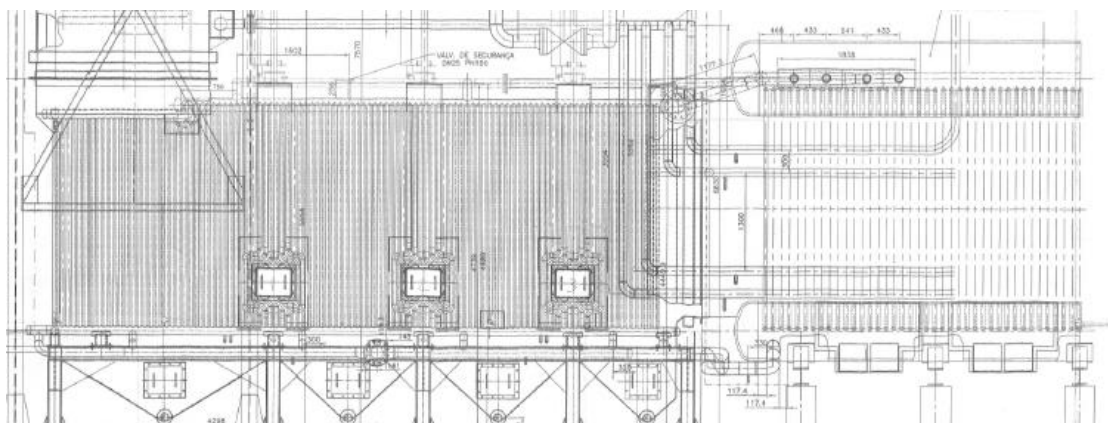
A Figura 23 representa o conjunto destes tubulares, o sobreaquecedor e os barriletes de água e vapor. De seguida faz-se uma descrição mais detalhada de cada um destes componentes [25].



**Figura 23** Tubulares da caldeira (arquivo da empresa). Em anexo encontra-se a figura ampliada.

No caso em estudo, a caldeira designa-se como aquotubular ou tubos de água e o escoamento do fluido de trabalho verifica-se pelo interior dos tubos enquanto os fumos pelo exterior.

Na Figura 24 pode-se identificar duas zonas distintas do tubular. Um tubular no lado direito que se situa entre os barriletes inferior e superior e que corresponde à caldeira original da marca “PHC”. Atendendo à potência da turbina ainda longe da capacidade máxima, a Administração entendeu incrementar a capacidade de produção de vapor com o acréscimo do tubular e que corresponde à zona do lado esquerdo.



**Figura 24** Pormenor dos tubulares da caldeira (arquivo da empresa). Em anexo encontra-se a figura ampliada.

Na entrada desta caldeira a água encontra-se no estado líquido, mas a pressão muito elevada, sendo dentro da mesma que se dá o aquecimento da água até atingir a temperatura de saturação, que está relacionada com a pressão da água. A água à temperatura de saturação entra no barrilete superior. Na Figura 25 pode-se distinguir dois barriletes, o superior e o inferior. O barrilete inferior é um corpo cilíndrico em que do dorso superior partem tubulares soldados que vão ligar ao barrilete superior pelo dorso inferior. A água movida por convecção natural circula entre ambos os barriletes.

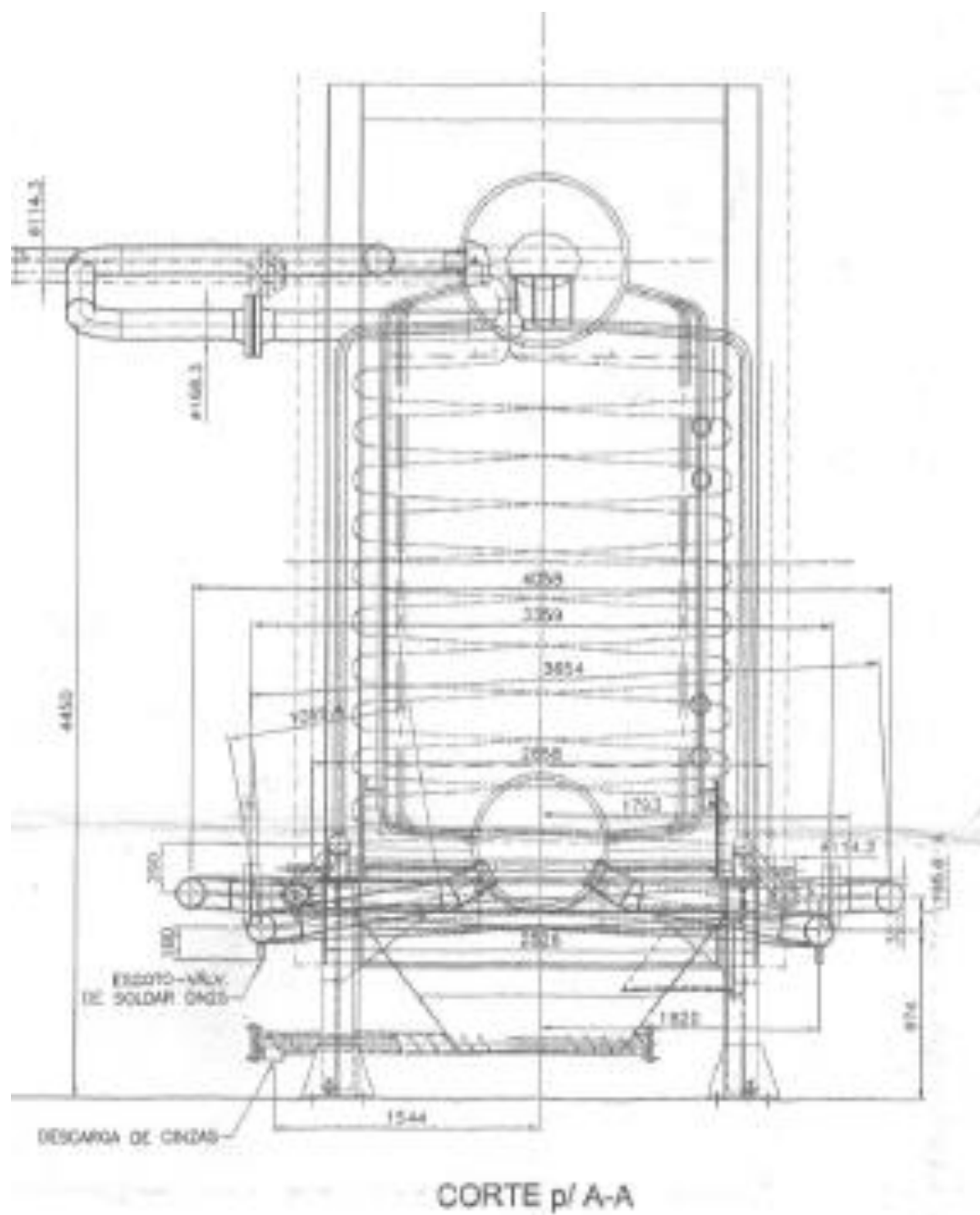
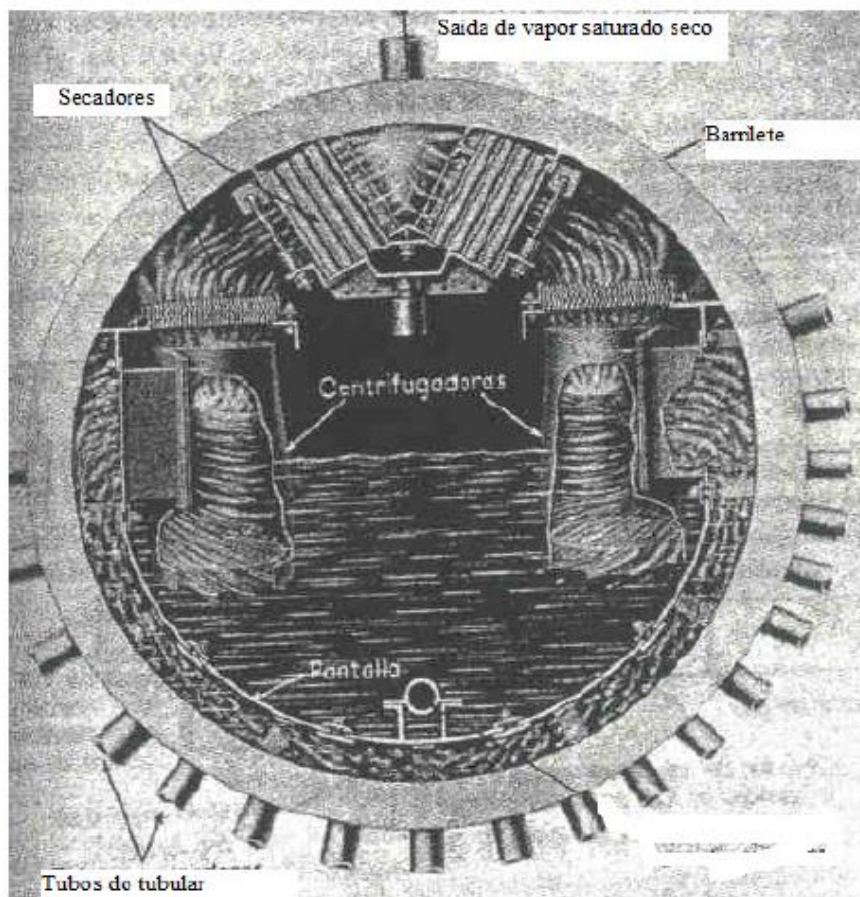


Figura 25 Barriletes da caldeira (arquivo da empresa).

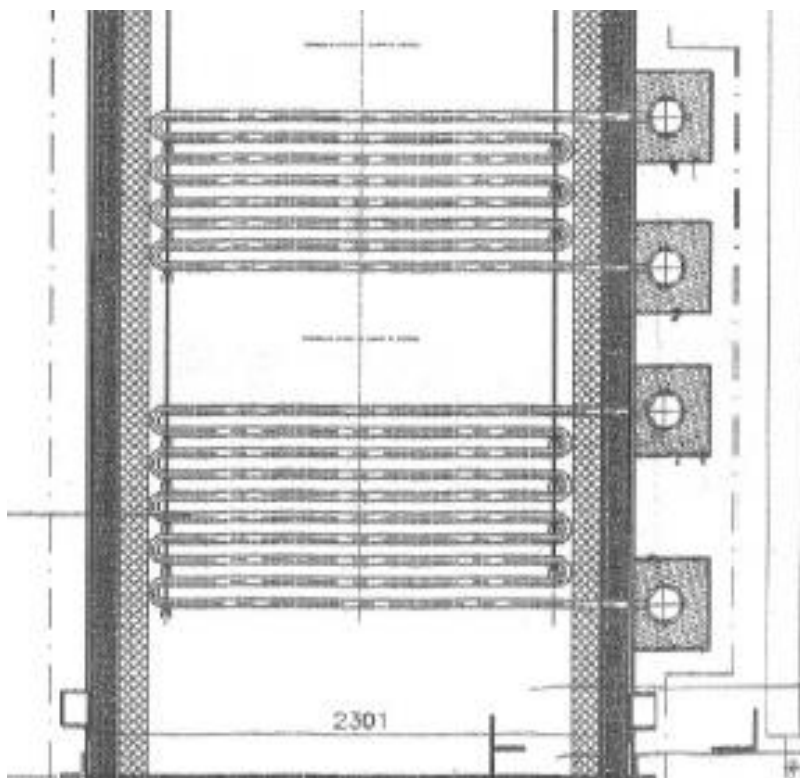
No barrilete superior a água, à temperatura de saturação, separa-se, por gravidade, em líquido saturado e vapor saturado. A configuração interior do barrilete superior é semelhante ao apresentado na Figura 26 [26].



**Figura 26** Pormenor do interior do barrilete superior [25].

Ainda no barrilete superior, o vapor, depois de passar por centrifugadoras e secadores de maneira a libertar-se de gotas de líquido, é dirigido por tubagem até ao sobreaquecedor que se mostra na Figura 27.

Este sobreaquecimento do vapor é fundamental para evitar qualquer dano nas pás da turbina e está instalado na conduta vertical de fumos, logo a seguir à câmara de pós combustão, e antes dos fumos passarem pelos tubulares da caldeira.

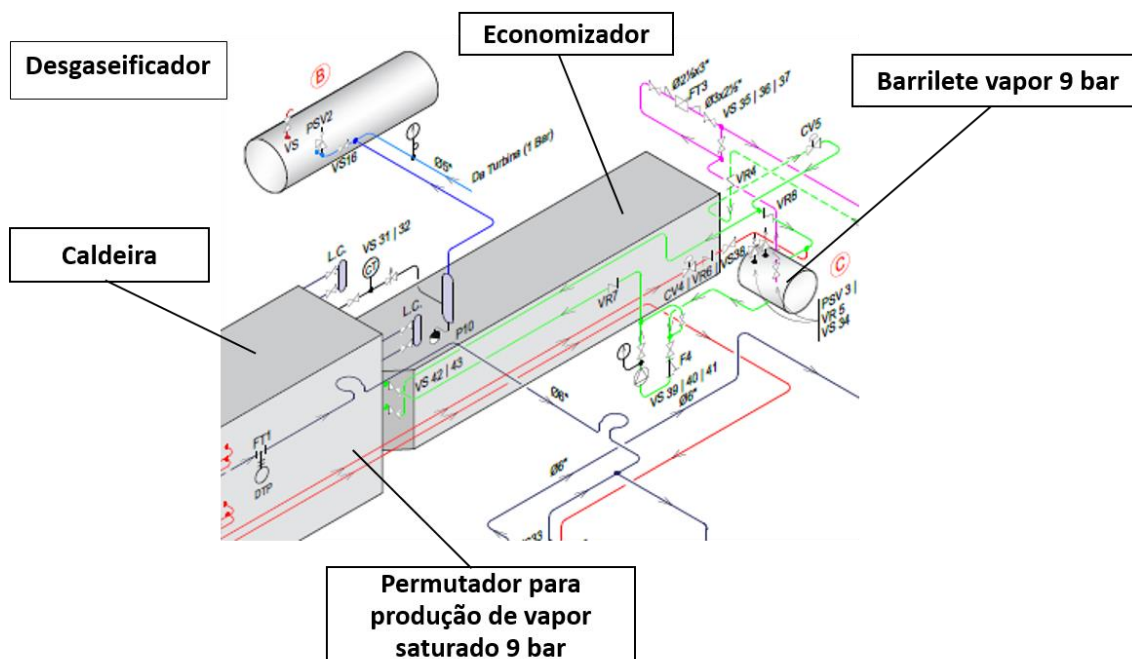


**Figura 27** Pormenor do sobreaquecedor (arquivo da empresa).

### 3.2.3 Produção vapor 0,9 MPa, economizador e desgaseificador

Após deixarem os tubulares da caldeira, os fumos atravessam um permutador para elevação da temperatura do fluxo de água até cerca de 170 °C, que é a temperatura de saturação da água a 0,9 MPa. A separação de vapor saturado verifica-se no barrilete de 9 bar. Posteriormente o aproveitamento do calor dos fumos é aplicado no economizador que tem a função de pré aquecer a água de alimentação à caldeira.

A água de alimentação tem origem no desgaseificador que é o depósito que recebe condensados, água dos Aeroarrefecedores, água de reposição e vapor a baixa pressão, (cerca de 0,1 MPa) proveniente de um estágio de baixa pressão da turbina. O esquema da Figura 28 é elucidativo destes fluxos.

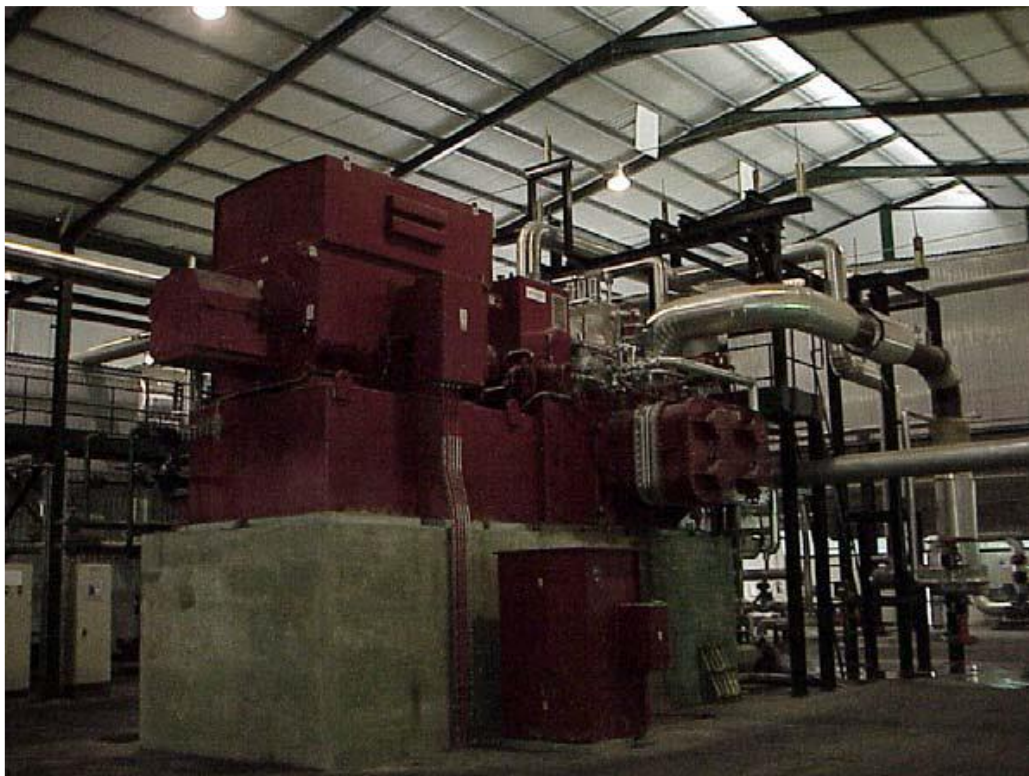


**Figura 28** Produção de vapor 9 bar, economizador e desgaseificador. Em anexo encontra-se a figura ampliada.

### 3.2.4 Turbina

Voltando ao sobreaquecedor, o vapor que sai deste equipamento é dirigido para uma Turbina de vapor de condensação. A turbina da marca “Peter Brotherhood” pode turbinar até 7085 Kg/h de vapor a 4 MPa, sobreaquecido a 480 °C. A potência máxima de produção de eletricidade é de cerca 2,8 MW.

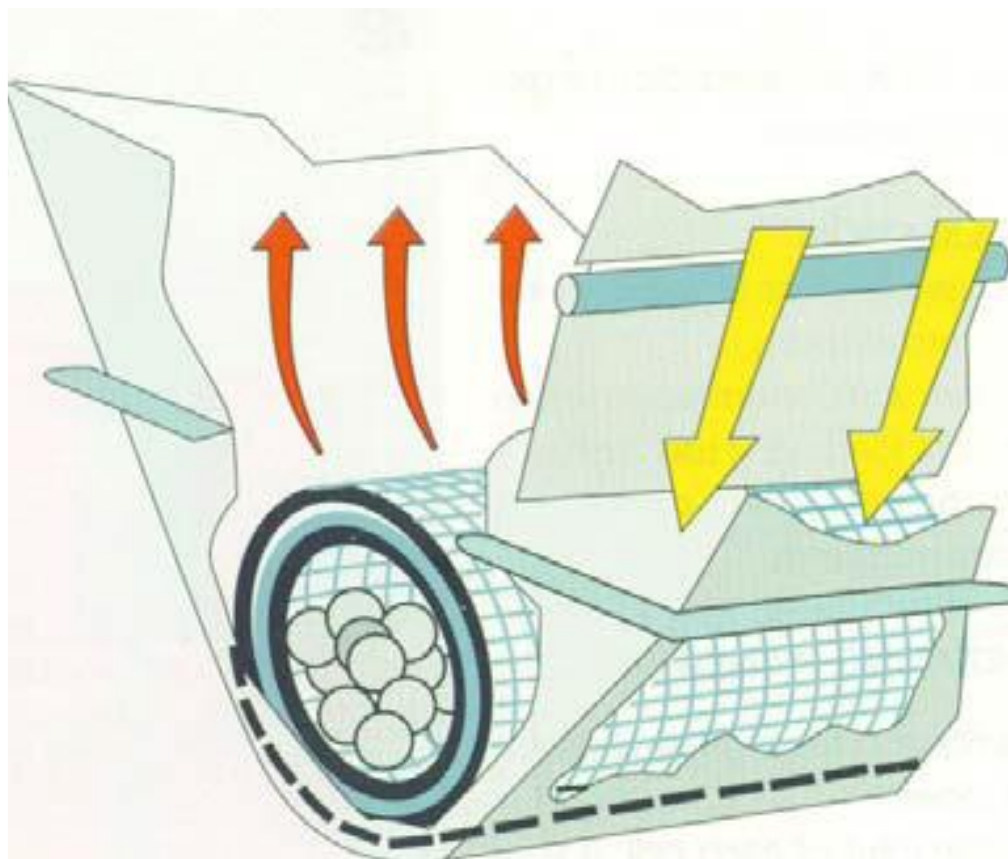
O vapor de saída passa por uma unidade de condensação que se situa por baixo da turbina. O condensado resultante é dirigido para o desgaseificador para de novo entrar na caldeira. A temperatura da água de arrefecimento é reduzida com o auxílio de um conjunto de aeroarrefecedores. Pode-se ver o aspeto do conjunto, turbina e condensador, na Figura 29.



**Figura 29** Grupo turbogerador (arquivo da empresa).

### 3.2.5 Tratamento dos fumos

O Licenciamento pela APA é bastante exigente neste aspeto. Efetivamente, o tratamento dos gases é bastante importante dado que, após a passagem na caldeira, a carga de poeiras e poluentes é elevada. Após o Economizador os gases entram num reator equipado com um tambor rotativo, onde é injetado o reagente químico para efeito da neutralização dos gases ácidos. No caso presente, o método utilizado é a seco, que possui a vantagem da facilidade de operação, além de não gerar efluentes líquidos. Após a passagem no reator, o gás apresenta-se carregado de poeiras contendo, não só as partículas que continha no início, mas também, as partículas de reagente químico (reagidas ou não-reagidas) que necessitam ser removidas. Na saída da caldeira existe um injetor de reagente, bicarbonato de sódio, que será posteriormente removido nas unidades de filtragem. Para homogeneizar o fluxo de gases, carregados com poeiras, estes passam através de um condicionador de partículas, como se exemplifica na Figura 30.



**Figura 30** Condicionador de partículas [23].

As partículas com diâmetros inferiores a  $0,1 \mu\text{m}$ , são aglomeradas, permitindo desta forma a sua coleta nos filtros e as que apresentam maiores dimensões, são partidas, aumentando-se assim a sua área superficial de reação.

A Figura 31, mostra o sistema de ciclone e do filtro de mangas, que são os responsáveis pela retenção das partículas. Saliente-se que o reagente neutralizador irá aderir nas mangas, continuando durante o processo de filtragem a reagir para neutralizar os componentes ácidos em suspensão.



**Figura 31** Ciclone e filtros manga (arquivo da empresa).

A limpeza das mangas é feita por meio de um processo de vibração e o reagente, misturado com cinzas precipitadas, será recolhido por um sistema de parafuso sem-fim e condutas de ar comprimido. Posteriormente, serão armazenados em recipientes próprios. Todo este material tem utilização na construção civil. Na fase final deste processo, dois ventiladores aspiram os gases diretamente para a chaminé, com cerca de 30 m de altura. Neste local estão instalados os sensores de monitorização que indicam os elementos mais importantes na garantia de operações corretas e seguras, como; partículas em suspensão,  $\text{SO}_2$ , HCl, HF, VOCs/TOCs, CO e  $\text{NO}_x$ . Outros poluentes, como as dioxinas e os metais pesados, são monitorizados por amostras periódicas recolhidas periodicamente [24].



# 4. RECOLHA DE DADOS, MEDIÇÕES

4.1 Fluxos

4.2 Recolha de dados e medições



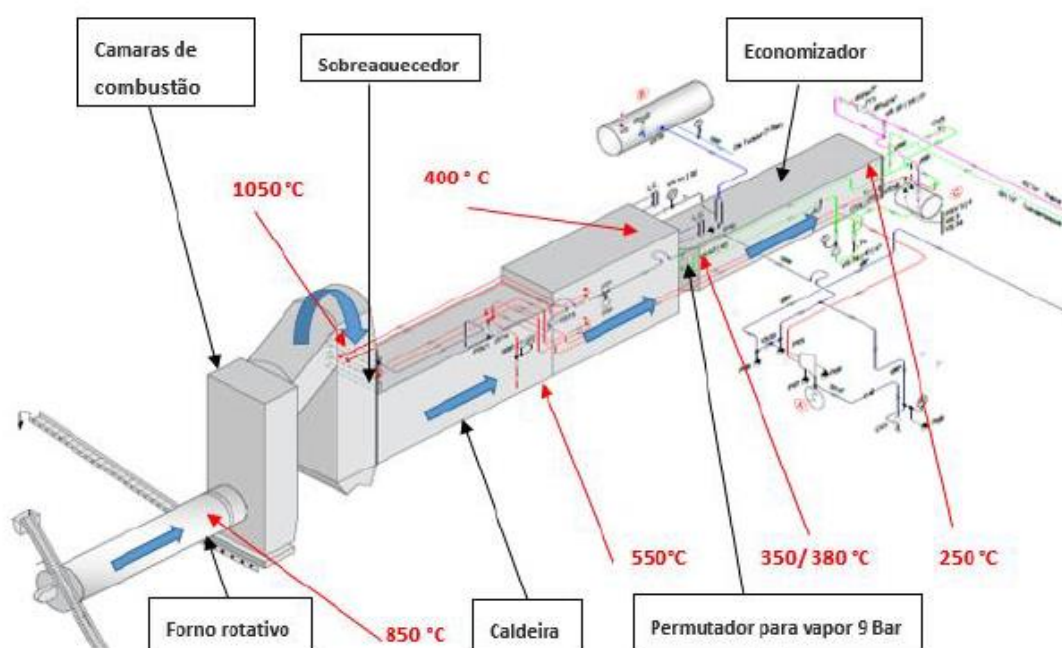
## 4. RECOLHA DE DADOS, MEDIÇÕES

Inicia-se este capítulo com a visualização dos vários fluxos envolvidos no processo: fumos, água de alimentação, água no estado saturado, vapor saturado, vapor sobreaquecido, condensado e água de arrefecimento. De seguida reúnem-se os dados disponíveis e medições possíveis de realizar, tais como, massa de resíduos, humidade superficial, caudal de água de alimentação, caudal de vapor saturado, caudal de vapor sobreaquecido, caudal de fumos, massa de cinzas, eletricidade produzida, temperaturas e análise dos gases.

### 4.1 Fluxos

#### 4.1.1 Gases

Na Figura 32 encontra-se representado o fluxo de gases e as respetivas variações de temperatura. Após a descarga dos resíduos no forno rotativo, inicia-se o processo de combustão atingindo-se cerca de 850 °C.



**Figura 32** Fluxo de gases e variação de temperatura. Em anexo encontra-se a figura ampliada.

A queima vai evoluindo e os gases na câmara de pós-combustão já atingem 1050 °C. Após passagem pelo sobreaquecedor e os tubulares da caldeira (na zona entre tubulares

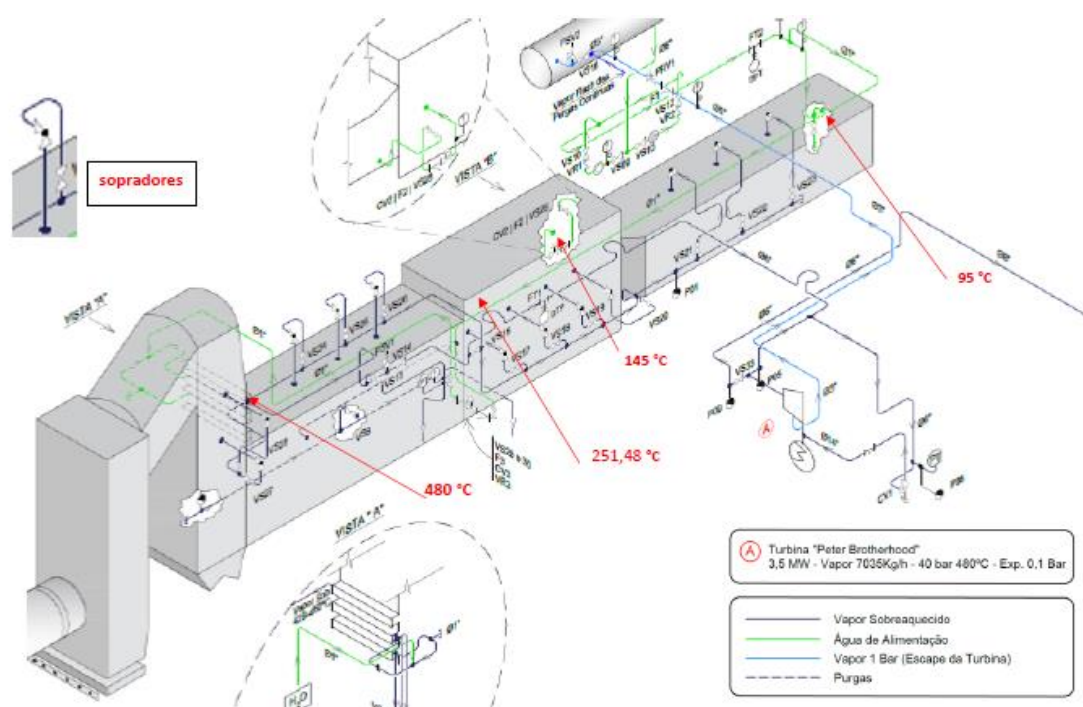
Ambitermo e HDS) a temperatura já caiu para 550 °C. No final da caldeira obtém-se 400 °C. Este ponto coincide com o início da passagem pelo permutador de auxílio à produção de vapor saturado a 0,9 MPa (neste momento fora de serviço). A temperatura dos gases na saída deste permutador, varia entre 350 °C os 380 °C, denotando desde logo alguma ineficiência na troca de calor e que tem consequências que serão abordadas mais à frente. Finalmente os gases atravessam o economizador e saem a cerca de 250 °C, que é ainda uma temperatura apreciável.

#### 4.1.2 Água de alimentação à caldeira e vapor sobreaquecido

A água de alimentação à caldeira (*feed water*) é bombeada a partir do desgaseificador e entra no economizador a cerca de 95 °C e sai a 145 °C. A temperatura de 95 °C é sensivelmente a mesma da água no interior do desgaseificador. Idealmente a temperatura no interior de um desgaseificador anda à volta de 104 °C e a uma pressão de saturação de 0,02 MPa. Estas condições são as que minimamente asseguram que o teor de oxigénio e de outros gases incondensáveis é nulo. Mais à frente serão abordados os possíveis motivos de o desgaseificador não estar a trabalhar nas condições ótimas. Do economizador, a água a 145 °C entra nos tubulares da caldeira e recebe calor dos gases até à temperatura de saturação a 4 MPa que corresponde à temperatura de 251,40 °C.

Como já se viu atrás, a água saturada a 4 MPa entra no barrilete superior e dá-se a separação de vapor saturado, cujo fluxo é mostrado num esquema mais à frente.

O vapor saturado passa, então, pelo sobreaquecedor e, mantendo a pressão de 4 MPa, vai atingindo 480 °C. No sobreaquecedor está instalado um atomizador de água desmineralizada, com a função de atemperar e manter a temperatura do vapor num determinado valor. Após o sobreaquecedor, o vapor sobreaquecido é conduzido para a turbina. Estes fluxos podem ser observados no esquema da Figura 33.



**Figura 33** Sistema de água de alimentação à caldeira e distribuição de vapor sobreaquecido. Em anexo encontra-se a figura ampliada.

Na figura anterior (Figura 33) também é possível observar que ao longo do desenvolvimento da tubagem de vapor sobreaquecido para a turbina, derivam várias tubagens para uns componentes distribuídos ao longo do sobreaquecedor (dois), da caldeira (três) e do economizador (três). Estes componentes são conhecidos por sopradores de fuligem (*sootblowers*) e têm um papel importante na eficiência da caldeira. Com efeito, as paredes dos fornos e as superfícies de convexão, tendencialmente acumulam camadas de cinza e escórias com efeitos de aumento de resistência à transmissão de calor. Fica então clara a necessidade de limpeza frequente dessas mesmas superfícies. Os sopradores são lanças ocas retráteis que forçam a entrada de vapor através dos tubos da caldeira para remover fuligem, cinzas e escória, como se mostra na Figura 34 [26], onde se pode ver a lança quando em operação e quando recolhida.

Os sopradores para além de ajudarem a manter os tubos limpos ajudam também na manutenção da eficiência térmica. Nesta instalação os ciclos de funcionamento dos sopradores tomam lugar em dois períodos diários de cerca de 20 minutos cada.

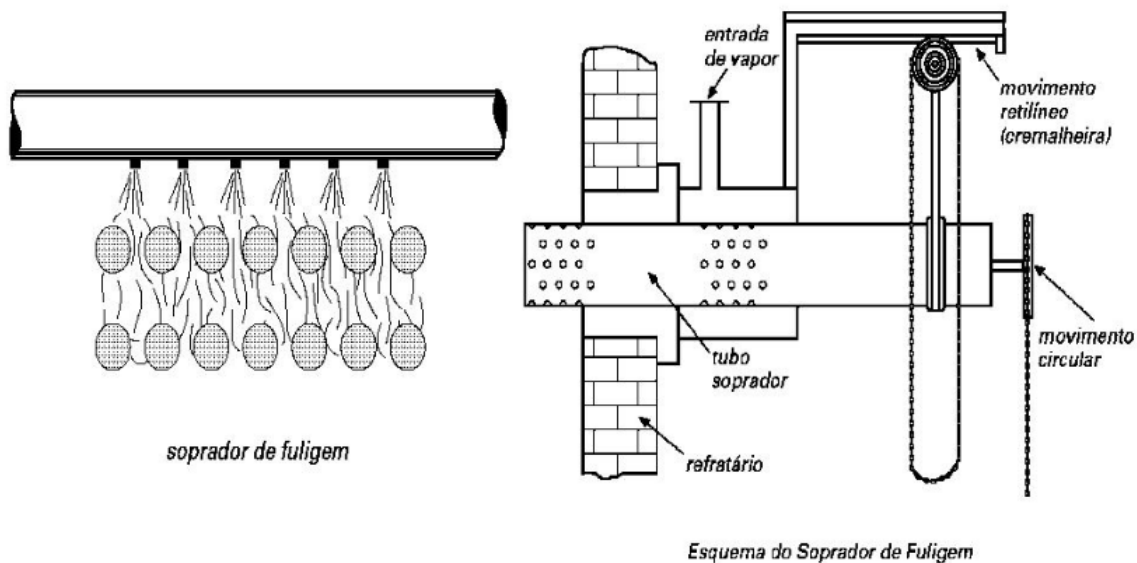


Figura 34 Esquema de funcionamento do soprador.

A figura anterior sugere que o movimento da lança é manual. Na instalação em estudo, os sopradores estão equipados com atuadores elétricos garantindo automatismo nas operações.

#### 4.1.3 Vapor de alta pressão saturado

Conforme já referido atrás, do barrilete superior da caldeira é de onde sai o vapor saturado e posteriormente, por tubagens, será conduzido para o sobreaquecedor. No entanto, antes de dar entrada no sobreaquecedor, parte deste vapor saturado vai ser desviado para duas aplicações: um escoamento de cerca de 1700 kg/h para uma estação de redução de pressão de 4 MPa para 0,9 MPa para satisfazer as necessidades de vapor das prensas de recauchutagem e autoclaves da fábrica, e por outra tubagem de diâmetro mais reduzido para as vedações do veio da turbina (*turbine steam glands*).

A Figura 35 dá uma ideia do percurso do vapor saturado (linhas a vermelho). São visíveis as linhas que saem da zona do barrilete superior e antes de entrarem no sobreaquecedor uma tubagem deriva para as vedações da turbina e outra vai de encontro à válvula de controlo “CV4” onde a pressão será reduzida para 0,9 MPa. De destacar que este caudal de vapor não será turbinado e trata-se ainda de uma quantidade significativa do total de vapor produzido (cerca de 20%). Mais adiante serão



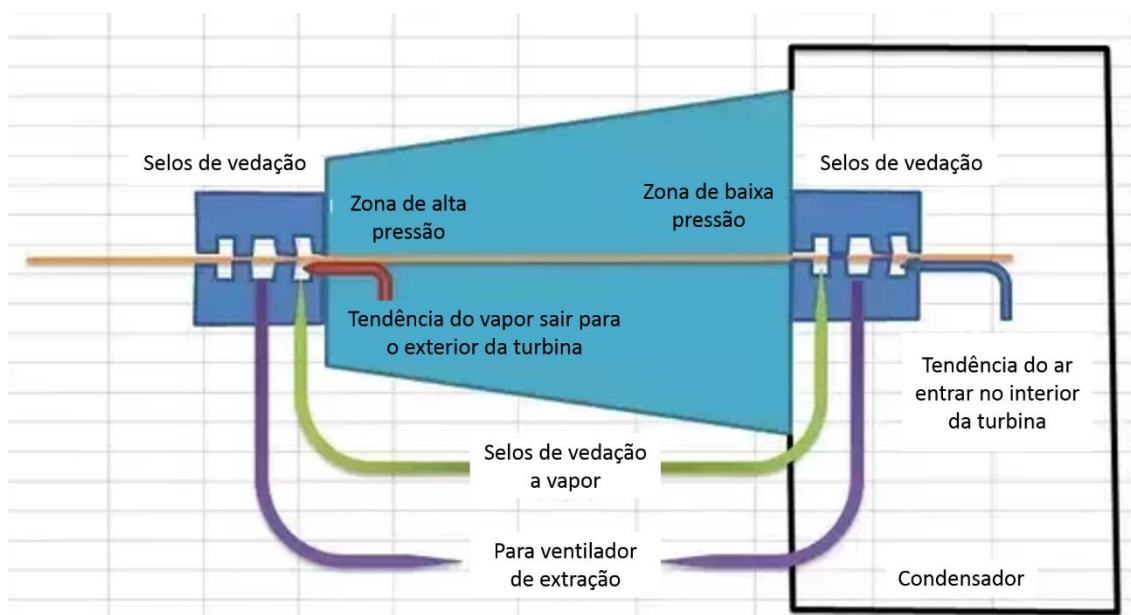


Figura 36 Vedação do veio da turbina com vapor [27].

Como se explica na figura, durante o arranque da turbina, os dois terminais terão de ter vedação de modo a que o condensador esteja isolado da atmosfera. Por um lado, deve permitir que ocorra aspiração de ar provocada por vácuo. No caso do lado da entrada de vapor na turbina, a vedação a vapor, com vapor saturado a alta pressão, impede assim a perda de vapor sobreaquecido da turbina.

#### 4.1.4 Circuito de água de arrefecimento e condensados da turbina

No esquema apresentado a seguir (Figura 37) estão representados os fluxos do condensado da turbina e que são bombeados para o desgaseificador. Neste desgaseificador é onde se faz a acumulação de água de alimentação à caldeira.

O condensador da turbina consiste num permutador em que o fluido de arrefecimento é água em circuito fechado. Daqui dirige-se para um conjunto de sete aeroarrefecedores onde perde temperatura para de novo ser bombeada para o condensador da turbina.

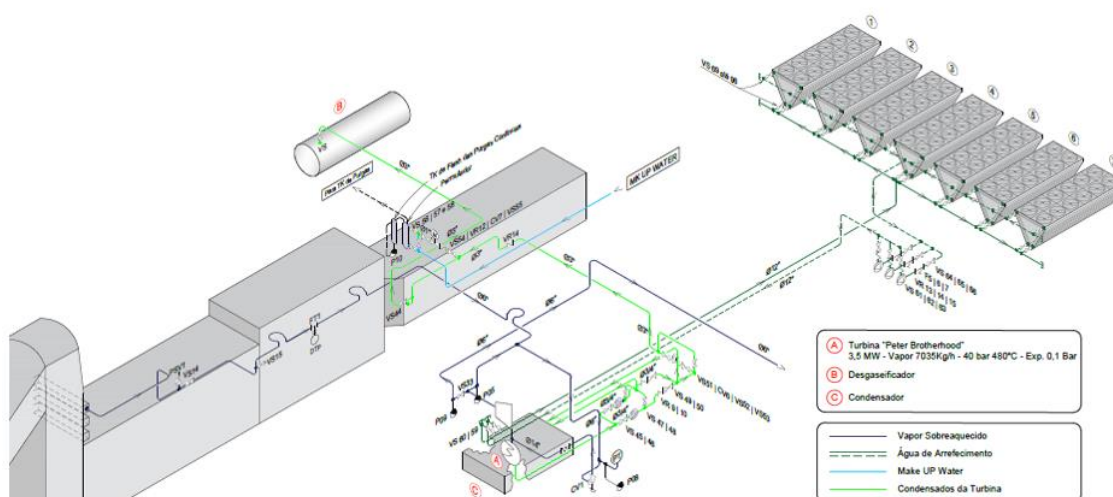


Figura 37 Água de arrefecimento e condensado da turbina.

A principal função dos aerorrefecedores é rejeitar calor da água de arrefecimento diretamente para o ar ambiente, ocorrendo assim uma transferência de energia térmica entre o ar, em que o escoamento do mesmo é realizado à custa de aeroventiladores, e a água, que circula nas tubagens, como se pode observar nas figuras seguintes (Figuras 38 e 39).

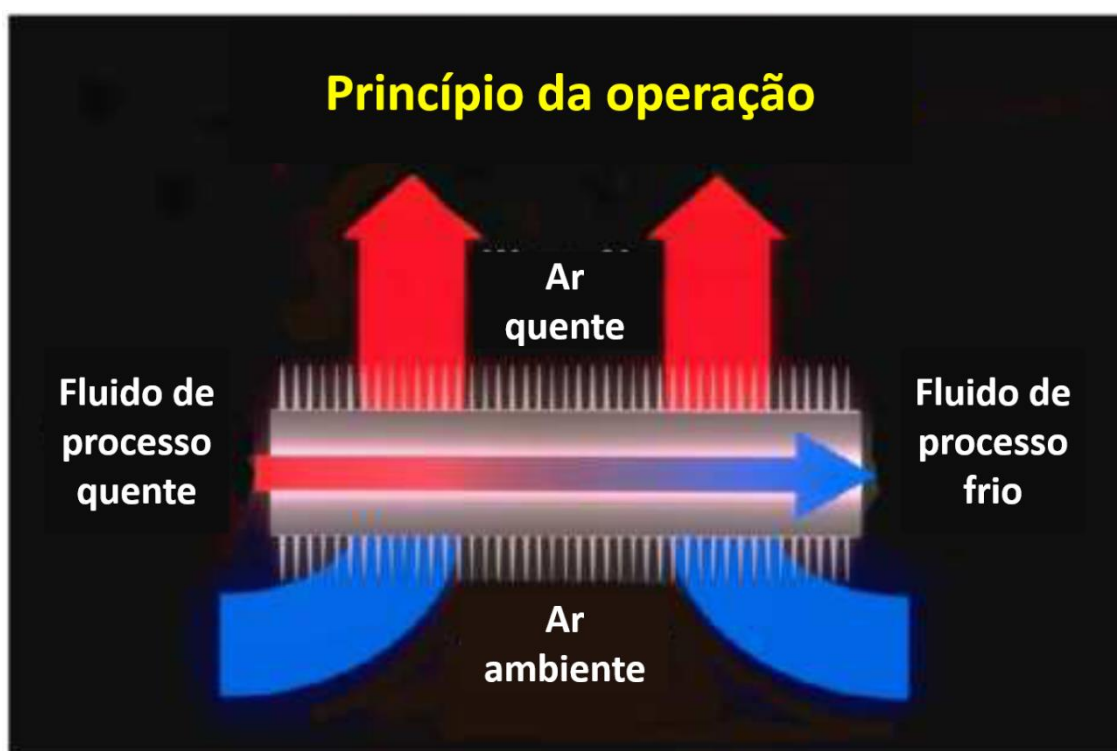


Figura 38 Objetivo de um Aeroarrefecedor [28].



Figura 39 Tipo de Aeroarrefecedores instalados (PowerCiat).

A principal vantagem de um aeroarrefecedor é a de que para efetuar o arrefecimento da água circulante nas tubagens é apenas necessário ar. Apesar dos fracos coeficientes de convecção para o ar, este está sempre disponível em grandes quantidades ao longo de todo o ano, para além de não trazer problemas ambientais, já que utilizando água, esta terá de sofrer tratamentos químicos antes de ser removida, para além dos custos de aquisição. Devido a estes fatores considera-se que o aeroarrefecedor é um dispositivo de baixo custo da operação e manutenção. Os aeroarrefecedores são utilizados num largo número de diferentes indústrias e produtos, no entanto, estes são geralmente utilizados no arrefecimento de gases e líquidos [29].

## 4.2 Dados e medições

### 4.2.1 Licença ambiental

Na Introdução, já se tinha abordado a opção da empresa em expandir a valorização energética não só de pneus e outros derivados da borracha, mas também incluir resíduos industriais não perigosos. Daqui a necessidade de terem adquirido um forno rotativo (*Rotary Kiln*). No fim do ano de 2008, a Unidade de Valorização Energética obteve da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) o averbamento à sua Licença de Exploração, autorizando-a a valorização energética de novas tipologias de resíduos não perigosos: resíduos têxteis, resíduos de plástico, CDR de plásticos, têxteis e madeira e *fluff*, ou seja, resíduos leves resultantes da fragmentação de “Veículos em Fim de Vida” (VFV). A licença obtida limita com bastante rigor e define os limites de operação da

---

Unidade de Valorização. Assim os dados e medições efetuadas verificam-se numa instalação enquadrada na referida licença de exploração. De seguida tenta-se transcrever as principais condicionantes a que esta unidade de valorização está sujeita.

#### **I. Resíduos abrangidos e respetivos códigos LER (Lista Europeia de Resíduos)**

Na tabela seguinte (Tabela 9) é possível encontrar os resíduos destinados a valorização energética assim como os respetivos códigos LER [30].

**Tabela 9** Lista de resíduos destinados a valorização energética.

<b>Código LER</b>	<b>Designação do resíduo</b>
02 01 04	Resíduos de plástico (excluindo embalagens)
04 01 09	Resíduos de confecção e acabamentos
04 02 09	Resíduos de materiais compósitos (têxteis impregnados, elastômeros, plastômeros)
04 02 21	Resíduos de fibras têxteis não processados
04 02 22	Resíduos de fibras têxteis processados
07 02 13	Resíduos de plástico
07 02 99	Outros resíduos anteriormente não especificados (borracha)
12 01 05	Aparas de materiais plásticos
15 01 02	Embalagens de plástico
15 01 09	Embalagens têxteis
16 01 03	Pneus usados
16 01 19	Plástico
17 02 03	Plástico
19 12 04	Plástico e borracha
19 12 08	Têxteis
19 12 10	Resíduos combustíveis (combustíveis derivados de resíduos)
19 12 12	Outros resíduos (incluindo misturas de materiais) do tratamento mecânico de resíduos, não abrangidos em 19 12 11
20 01 11	Têxteis
20 01 39	Plásticos

## **II. Capacidade de instalação**

A licença emitida é para uma instalação de capacidade de 53,33 Ton/ dia ou seja 2,22 Ton/ h, 14 400 Ton/ ano.

## **III. Transporte, recepção, descarga e armazenamento de resíduos**

#### **IV. Condições de operação da instalação**

1. Em conformidade com os artigos 19º e 21º do Decreto-lei nº 85/ 2005 a instalação de incineração deve ser explorada de modo a cumprir com as seguintes condições [30]:

**a)** A alimentação de resíduos deverá ser efetuada de forma controlada minimizando situações de instabilidade de queima;

**b)** A queima de resíduos só deverá ocorrer quando estão garantidas as condições que permitem dar cumprimento aos valores limite de emissão (VLE) aplicáveis, ao regime de monitorização (contínuo e pontual) das emissões definidas e ao respetivo registo;

**c)** A temperatura na primeira câmara de combustão (combustor primário), onde os resíduos são queimados, é igual ou superior a 850° C, após a última injeção de ar de combustão;

**d)** Os gases resultantes da queima dos resíduos são sujeitos a uma nova combustão na segunda câmara de combustão (combustor secundário, após a última injeção de ar de combustão, onde permanecem durante, pelo menos 2 segundos a uma temperatura superior a 850 °C;

**e)** Os queimadores auxiliares são ativados automaticamente durante as operações de arranque e paragem, a fim de assegurar constantemente a temperatura mínima de 850 °C na primeira câmara de combustão e na segunda câmara de combustão durante pelo menos 2 segundos e enquanto existirem resíduos na camara de combustão. São também ativados sempre que a temperatura do efluente gasoso nas primeira e segunda câmaras de combustão após a última injeção de ar seja inferior a 850 °C;

**f)** O sistema de encravamento da alimentação e resíduos atua nas seguintes condições: no arranque e enquanto não for atingida a temperatura de 850 °C nas câmaras de combustão, sempre que não seja mantida esta temperatura ou sempre que se excedam os VLE;

**g)** Garantir a monitorização dos parâmetros operacionais do processo de acordo com a tabela seguinte (Tabela 10).

Tabela 10 Parâmetros operacionais.

Parâmetros		Frequência da monitorização
<b>No efluente gasoso</b>	Temperatura próximo da parede interna ou de outro ponto representativo da câmara de combustão	Contínuo
	Teor de O <sub>2</sub>	
	Temperatura	
	Pressão	
	Teor de vapor de água (exceto se o gás for seco antes de ser analisado)	
	Caudal de gases de exaustão (se tecnicamente viável)	

2. Adicionalmente, a exploração da instalação de incineração deve dar cumprimento [30]:

- a) Ao Regulamento Geral do Ruído;
- b) À legislação aplicável em matéria de Segurança, Higiene e Saúde no trabalho.

## V. Monitorização, valores limite de emissão e parâmetros de operação

1. Os resultados das medições efetuadas para verificação da conformidade com os valores limite de emissão (VLE) das tabelas apresentadas a seguir (Tabelas 11, 12, 13 e 14) devem ser normalizados nas condições de 273 K de temperatura, 101,3 kPa de pressão e 11% de oxigénio, gás seco.

Tabela 11 Valore médios diários.

Parâmetros	Valor limite (mg/Nm <sup>3</sup> )
Partículas totais	10
Cloreto de hidrogénio (HCl)	10
Fluoreto de hidrogénio (HF)	1
Óxidos de azoto (NO <sub>3</sub> ), expressos em NO <sub>2</sub>	200
Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	50
Carbono orgânico total (COT)	10

Tabela 12 Valores médios a intervalos de 30 minutos.

Parâmetros	A (para 100% dos valores) (mg/Nm <sup>3</sup> )	B (para 97% dos valores) (mg/Nm <sup>3</sup> )
Partículas totais	30	10
HCl	60	10
HF	4	2
NO <sub>x</sub>	400	200
SO <sub>2</sub>	200	50
Compostos orgânicos	20	10

Tabela 13 VLE para o poluente monóxido de carbono (CO).

Valor limite (mg/Nm <sup>3</sup> )	Observações
50	Determinado como valor médio diário
150	Em pelo menos 95% de todas as medições determinadas como valores médios a intervalos de 10 minutos, ou
ou	
100	de todas as medições determinadas como valores médios a intervalos de 30 minutos, obtidas durante um período de 24 horas.

Tabela 14 VLE para os poluentes metais pesados, dioxinas e furanos.

Parâmetros	Valor limite (mg/Nm <sup>3</sup> )
Cd + Ti	0,05
Hg	0,05
Sb + As+ Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	0,1
Zn	1
Dioxinas/Furanos	0,1 ng TE/Nm <sup>3</sup>

2. No que se refere ao regime de monitorização aplicável a unidade deve proceder:
- À medição em contínuo dos poluentes CO, partículas totais em suspensão (TSP), compostos orgânicos totais (COT), HCl, HF, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> e os parâmetros operacionais indicados na Tabela 10;
  - A uma medição pontual para os metais pesados e dioxinas/furanos a realizar pelo menos duas vezes por ano.

#### 4.2.2 Medições

Procedeu-se a uma série de medições dos contadores de vapor, energia elétrica, massa de combustível e emissões, durante 8 dias e durante os períodos da Tabela 15.

Para as medições, foram usados os recursos instalados e que de seguida se faz uma breve descrição.

- **Termopares**

Para a medição de temperaturas usaram-se termopares cerâmicos convencionais até 1600 °C com erro de  $\pm 0,25\%$ .

- **Contadores de vapor**

- Contador de vapor saturado a 9 bar

- ✓ Marca – *Yokogawa* modelo *DY050*;
- ✓ Princípio – *Vortex* - efeito *Von Karman*, segundo o qual um fluido após embate numa barra sólida, desenvolvem-se padrões de vórtices com frequências proporcionais à velocidade;
- ✓ Medida do contador, capacidade e precisão – aplicação entre flanges DN50, caudais a 0,9 MPa, mínimo 89 kg/h, máximo 2793 kg/h. Precisão  $\pm 1\%$ . (Figura 40).



**Figura 40** - Contador de vapor saturado para a fábrica

- Contador de vapor sobreaquecido 40 bar e 480°C
  - ✓ Marca – *Rosemount*;
  - ✓ Princípio – Tubo *Pitot* para medição do diferencial de pressão do tubo com um transmissor com conversor 4-20 mA (Figura 41);
  - ✓ Medida do contador, capacidade e precisão – aplicação entre flanges DN150, caudais a 4,0 MPa, mínimo 1875 kg/h, máximo 15 000 kg/h. Precisão  $\pm 1\%$ .



**Figura 41** Pormenor das tomadas de pressão do tubo *Pitot* do contador de vapor a 4,0 MPa

- **Medição de partículas e gases**

- Medição de partículas
  - ✓ Marca – *Durag* modelo D-R 800;
  - ✓ Princípio – O dispositivo da Figura 42 trabalha de acordo com o princípio de dispersão para a frente. A luz de um díodo a laser concentrada e modulada penetra no volume em medição. A luz dispersada para a frente, largamente refletida pelas partículas, é medida e processada;
  - ✓ Gama de medida e precisão – gama de 0 a 200 mg/m<sup>3</sup> e precisão inferior a 2% desta gama.

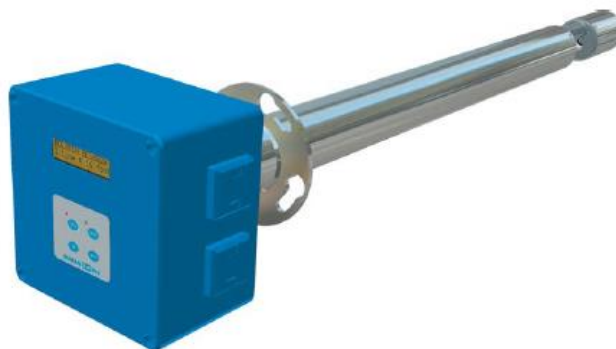


Figura 42 Monitor de partículas Durag D-R 800.

➤ Medição de CO, NO<sub>x</sub>, HCl, HF e SO<sub>2</sub>

- ✓ Marca – *Environnement SA*, modelo MIR 9000;
- ✓ Princípio – Analisador de gases por infravermelhos. Todos os gases poliatómicos absorvem radiação eletromagnética de um dado comprimento de onda. Chama-se absorção espectroscopia à análise qualitativa e quantitativa baseada neste fenómeno. O MIR 9000 é um dispositivo de medida que usa a espectroscopia de infravermelhos (IR) e correlações. Um raio ótico emitido pela fonte de IR passa pela camara de medição e é focalizado no detetor de IR. Cada tipo de gás presente no caminho do raio ótico e em comprimentos de onda específicos absorve os últimos emitidos. A Lei de *Beer Lambert* relaciona a concentração de gás com as diferenças de energia recebidas no detetor de IR quando há gás presente na camara de medição e quando não há gás presente;
- ✓ Precisão – inferior a 1% das gamas de leitura.

Na Figura 43, mostra-se o sistema de medição MIR 9000 e as botijas de calibração, tudo condicionado na mesma sala.



Figura 43 Sala com medidores de gases e botijas de calibração.

Os sensores para a medição de partículas e de concentração de gases estão instalados na chaminé na zona indicada na Figura 44.



Figura 44 Zona de instalação de sensores na chaminé.

- **Báscula**

- Ponte Báscula metal/betão

- ✓ Marca – *Balanças Paulo*;
    - ✓ Plataforma de 18 x 3 metros;
    - ✓ Gama e classe de erro e precisão – 0 a 60 000 ± 30 kg.

- **Contadores de energia elétrica**

- Contador de energia vendida e/ ou comprada à EDP

- ✓ Marca – *Landis*, modelo Gyr E550 (ver Figura 45);
- ✓ Exatidão – classe B.



**Figura 45** Contador de energia elétrica vendida e/ou comprada à EDP.

- Contador de energia elétrica fornecida à fábrica

- ✓ Marca – *Siemens*, modelo Sentron PAC 3200 (ver Figura 46).



**Figura 46** Contador de energia elétrica para a fábrica (foto da instalação e imagem de catálogo).

- Contador de energia elétrica consumida na UVEP

- ✓ Marca – *Frer*, modelo C96 (ver Figura 47);
- ✓ Precisão – 2 kWh.



Figura 47 Contador de energia elétrica para a UVEP (foto da instalação e imagem de catálogo).

- **Períodos em estudo**

Tabela 15 Horas de funcionamento.

Início abastecimento		Fim abastecimento		
Mês/dia	hora	dia	hora	Nº de horas
março/14	16:30	março/15	08:00	15,5
março/15	12:30	março/16	02:30	14
março/16	02:30	março/16	18:30	16
março/16	18:30	março/17	07:15	12,75
março/17	07:15	março/17	21:00	13,75
março/17	21:00	março/18	10:30	13,5
março/18	10:30	março/19	01:30	15
março/19	01:30	março/19	15:10	13,66
março/19	15:10	março/20	03:20	12,16
março/20	03:20	março/20	16:10	12,83
março/20	16:10	março/21	05:15	13,08
março/21	05:15	março/21	20:30	15,25
<b>Σ</b>				<b>167,48</b>

Nos anexos juntam-se cópias detalhadas de todas as tabelas referentes às medições efetuadas. Nas tabelas que se seguem, é feito um resumo das médias do total do período (Tabelas 16 a 20).

- **Temperaturas dos gases, caudais de vapor e energia elétrica produzida no período em estudo**

**Tabela 16** Temperaturas dos gases, caudais de vapor e energia elétrica produzida no período em estudo.

Valores	Temperatura gases na câmara de pós-combustão (°C)	Caudal de vapor (ton/h)	Energia produzida (MWh)
Média	1095	7,21	1,254
Máxima	1260	9,35	1,640
Mínima	971	4,42	0,536

- **Energia elétrica produzida medida por contadores**

**Tabela 17** Energia elétrica produzida medida pelos contadores.

		Início abastecimento		Fim abastecimento		Diferença
		Dia	hora	Dia	hora	*
		mar/14	16:30	mar/21	20:30	
<b>Contadores de energia elétrica (kWh)</b>	UVEP	14216413		14307223		90810
	Fábrica	9963535		10012890		49355
	Venda	18749058		18824054		74996
<b>Energia elétrica produzida (kWh) (A)</b>						215161
<b>* Total de horas de funcionamento (h) (B)</b>						167,48
<b>Energia elétrica média produzida (MWh) (A/B)</b>						1,28

- Vapor fornecido à fábrica

Tabela 18 Vapor fornecido à Fábrica no período em estudo.

	Início	Fim	Fábrica – 15 horas/dia
	abastecimento	abastecimento	excluindo domingos
	mês/dia	mês/dia	Nº horas
	mar/14	mar/21	105
Contadores de vapor	31017600	31200600	Valor fornecido 183000 kg
<b>Caudal de vapor médio/h fornecido à fábrica (kg/h)</b>			<b>1742,86</b>

- Combustível (resíduos) processado no mesmo período

Tabela 19 Resíduos processados no mesmo período.

Quantidades processadas (kg)			Quantidades processadas (%)			Resíduos (kg/h)	Resíduos (kg/kWh)
Resíduos	Escórias	Aço	% Escórias	% Aço	% Escórias + Aço		
363360	123820	29480	34	8	42	2169,57	1,429

- Caudal de gases médio/hora no período em estudo

Tabela 20 Caudal de gases.

Ventiladores/Filtros			
	Temperatura média	Frequência (Hz)	Caudal de gases (Nm <sup>3</sup> /h)
Filtro 1	157	34	31167
Filtro 2	126	34	48529

Não foi possível obter autorização para a instalação de um tubo *Pitot* para a medição de caudais. Assim para o cálculo dos caudais indicados na Figura 48, recorreu-se à seguinte metodologia:

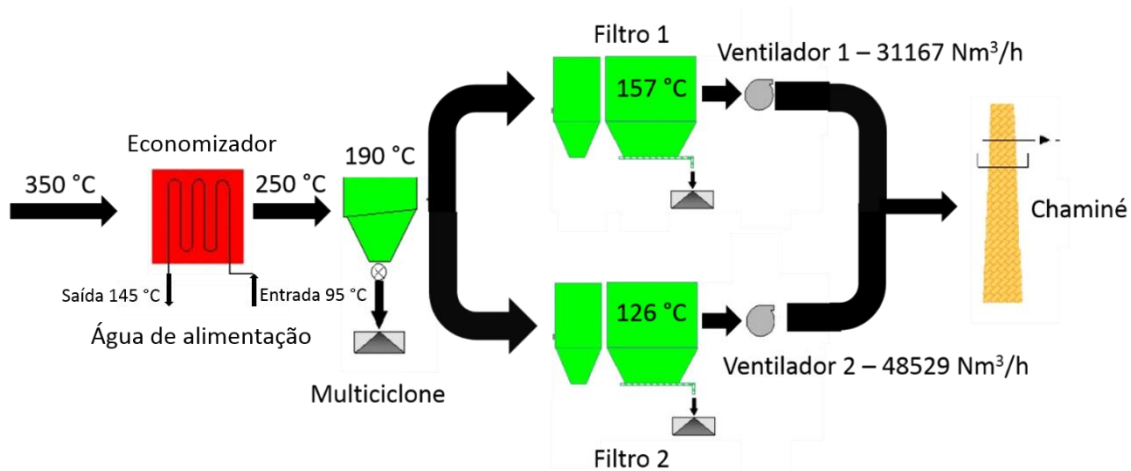


Figura 48 Fluxo de gases na zona dos filtros e ventiladores.

- Determinação da potência absorvida  $P$  (W) aplicando a seguinte equação:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \times \eta_m \quad (1)$$

Em que:

$U$  - Tensão trifásica (V)

$I$  - Intensidade de corrente absorvida (A)

$\eta_m$  - rendimento do motor (%)

Sabe-se que neste caso tem-se os valores de intensidade de corrente de 170 A para o ventilador 1 e 300 A para o ventilador 2, tensão 400 V,  $\cos\varphi$  igual a 0,8 e o rendimento de 0,8 (indicado pelo fabricante dos ventiladores). Substituindo-se obtém-se 75 290 W para ventilador 1 e 132 864 W para o 2.

- Para o cálculo do caudal volúmico  $\dot{V}$  [m³/s] usou-se a expressão (2):

$$\dot{V} = \frac{P}{(\Delta p \times 9,806) \times \eta_m} \quad 1) \quad (2)$$

Em que:

$P$  - Potência absorvida (W)

$\Delta p$  - diferencial de pressão em mm H<sub>2</sub>O

$\eta_m$  - rendimento do motor (%)

$$1) - \text{expressão deduzida de: } \dot{W} = \Delta p \cdot \dot{V} \eta_m = \rho g h \dot{V} \eta_m \quad (2.1)$$

Tem-se respetivamente para ventilador 1 e 2,  $\Delta p$  de 450 e 550 mm H<sub>2</sub>O, substituindo na expressão, obtém-se os caudais de:

$$\dot{V}_1 = 13,651 \text{ m}^3/\text{s} = 49\,145,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_2 = 19,695 \text{ m}^3/\text{s} = 70\,914,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

➤ Para as condições normais de pressão e temperatura, teremos de corrigir a massa volúmica do ar ( $\rho$ ) com a temperatura [29].

Tem-se à temperatura de 0°C a  $\rho_0 = 1,293 \text{ Kg/m}^3$ .

A uma temperatura  $x$  tem-se (Equações 3 e 4):

$$\text{Lei dos gases perfeitos } \rho_x = \frac{P}{R \times (t_x + 273,15)} \quad (3)$$

$$R \text{ do ar} = 287,0530 \text{ J/kg.K}$$

$$P = 101325 \text{ Pa}$$

e

$$\dot{V}_{xN} = (\rho_x / \rho_0) \times \dot{V}_x \quad (4)$$

Assim para temperatura  $t_1$  de 157 °C obtém-se:

$$\rho_1 = 0,82 \text{ Kg/ m}^3 \text{ e } \dot{V}_{1N} = 31167 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

e para temperatura  $t_2$  de 126 °C:

$$\rho_2 = 0,88 \text{ Kg/ m}^3 \text{ e } \dot{V}_{2N} = 48529 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

- **Valores Limite de Emissões- medições**

De seguida transcrevem-se nas seguintes tabelas (Tabelas 21 a 24) os valores enviados para a APA do último trimestre de 2017. Comparando com os valores limite exigidos na Licença Ambiental, é possível concluir que os valores obtidos são significativamente inferiores.

Tabela 21 Resultados do autocontrolo de emissões de CO e NO<sub>x</sub>.

Resultados do autocontrolo das emissões de CO e NO <sub>x</sub> para a atmosfera						
Valores Limite						
VLE Valores limite de emissão (mg/ Nm <sup>3</sup> )	CO			Nox		
	Semi horário	Diário		Semi horário	Diário	
	100	50		400	200	
Medições - Valores médios diários						
Ano de 2017	CO			NOx		
Meses	Outubro	Novembro	Dezembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Nº de valores	21	13	15	21	13	15
Valor máximo	24,9	23	30	89,5	94	96
Nº de valores >= 80% da Norma	0	0	0	0	0	0
Nº de valores >= Norma	0	0	0	0	0	0
Percentil 97 (acumulado)			35,9			96

Tabela 22 Resultados do autocontrolo de emissões de COT e Partículas.

Resultados do autocontrolo das emissões de COT e Partículas						
Valores Limite						
VLE Valores limite de emissão (mg/ Nm <sup>3</sup> )	COT			Partículas		
	Semi horário	Diário		Semi horário	Diário	
	20	10		30	10	
Medições - Valores médios diários						
Ano de 2017	COT			Partículas		
Meses	Outubro	Novembro	Dezembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Nº de valores	21	13	15	21	13	15
Valor máximo	0,8	3	8	4,2	5	6
Nº de valores >= 80% da Norma	0	0	0	0	0	0
Nº de valores >= Norma	0	0	0	0	0	0
Percentil 97 (acumulado)			4,9			5,8

Tabela 23 Resultados do autocontrolo de emissões de HCL e HF.

Resultados do autocontrolo das emissões de HCL e HF						
Valores Limite						
VLE Valores limite de emissão (mg/ Nm3)	HCL			HF		
	Semi horário		Diário	Semi horário		Diário
	60		10	4		1
Medições - Valores médios diários						
Ano de 2017	HCL			HF		
Meses	Outubro	Novembro	Dezembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Nº de valores	21	13	15	21	13	15
Valor máximo	4,1	5	4	0,3	0	0
Nº de valores >= 80% da Norma	0	0	0	0	0	0
Nº de valores >= Norma	0	0	0	0	0	0
Percentil 97 (acumulado)			4,2			0,5

Tabela 24 Resultados do autocontrolo de emissões de SO<sub>2</sub>.

Resultados do autocontrolo das emissões de SO2			
Valores Limite			
VLE Valores limite de emissão (mg/ Nm3)	SO2		
	Semi horário		Diário
	200		50
Medições - Valores médios diários			
Ano de 2017	SO2		
Meses	Outubro	Novembro	Dezembro
Nº de valores	21	13	15
Valor máximo	28,7	28	23
Nº de valores >= 80% da Norma	0	0	0
Nº de valores >= Norma	0	0	0
Percentil 97 (acumulado)			30,3



# 5. DETERMINAÇÃO DE EFICIÊNCIAS

5.1 PODER CALORÍFICO INFERIOR DO COMBUSTÍVEL

5.2 RENDIMENTO DA CALDEIRA

5.3 EFICIÊNCIA DA TURBINA

5.4 EFICIÊNCIA DA COGERAÇÃO



## 5. DETERMINAÇÃO DE EFICIÊNCIAS

### 5.1 Poder calorífico inferior do combustível

Uma das necessidades críticas na incineração de resíduos é o conhecimento do conteúdo energético destes. Existem três tipos de modelos usados nesta estimativa e baseiam-se no seguinte tipo de análise [31]:

- Composição física;
- Análise final;
- Análise aproximada.

Na análise da composição física entram as percentagens mássicas de plásticos, papel, água e outros resíduos. A análise final implica a determinação das frações mássicas de carbono (C), hidrogénio (H), oxigénio (O), nitrogénio (N) e enxofre (S). Na análise aproximada consideram-se os vários pesos na mistura, matéria combustível volátil, carbono e cinzas. De seguida indicam-se algumas fórmulas/modelos mais comumente usados na estimativa do conteúdo energético.

✓ Composição física - fórmula convencional (5):

$$PCI = 88,2 \times R + 40,5 \times (G + P) - 6 \times W \quad (5)$$

Em que:

PCI- Poder calorífico inferior (kcal/kg)

R – Plásticos, % em massa em base seca

G – Resíduos indiferenciados, % em massa em base seca

P – Papel, % em massa em base seca

W – Água, % em massa em base seca

✓ Análise final - fórmula de *Dulong* (6):

$$PCI = 81 \times C + 342,5 \times (H - O \div 8) + 22,5 \times S - 6 \times (9 \times H + W) \quad (6)$$

Em que:

C - Carbono, % mássica

H -Hidrogénio, % mássica

O - Oxigénio, % mássica

S - Enxofre, % mássica

✓ Análise aproximada - fórmula tradicional (7)

$$PCI = 45 \times B - 6 \times W \quad (7)$$

Em que:

B - Matéria combustível volátil nos resíduos (%)

Existem vários estudos com tabelas com o valor do poder calorífico superior (PCS) ou inferior (PCI), conforme o material em causa. Exemplo de uma destas é a tabela apresentada (Tabela 25).

**Tabela 25** Análise final e valores de PCS (componentes em %) [32].

Items	C (m/m%)	H (m/m%)	N (m/m%)	S (m/m%)	O (m/m%)	Cinzas (m/m%)	PCS kcal/kg
Lixo em aterros	40,78	6,16	0,85	0,20	38,59	13,42	3827
Espuma <i>Styrofoam</i>	58,25	8,02	0,70	0,08	30,79	2,16	6699
Têxtil	49,29	5,86	0,29	0,15	42,38	2,03	4292
Alumínio	57,05	9,08	0,56	0,04	23,32	9,95	8032
Papel	42,94	6,85	0,14	0,07	44,22	5,78	3949
Produtos de higiene absorventes	39,96	7,22	0,88	0,18	43,28	8,48	5531
Osso	33,84	6,17	4,89	0,24	24,86	30,0	3494
Plástico	79,81	14,41	0,01	0,02	3,98	1,77	10332
Lixo orgânico	37,74	6,79	2,73	0,53	41,41	10,8	3527
Borracha	65,72	6,93	0,3	1,57	11,97	13,51	6759
Plásticos de alta densidade	61,4	4,63	0,07	0,03	33,85	0,02	5402
Madeira	47,72	6,67	0,14	0,03	44,43	1,01	4296
Resíduos de fibra de coco	44,02	6,36	0,55	0,07	43,97	5,03	3838

A empresa estima que dos resíduos que recebe, 50- 60% são pneus triturados, 20- 25% resíduos de plásticos e o restante basicamente têxteis. Recorrendo-se, por exemplo, à tabela anterior obtém-se um PCS muito acima de 20 MJ/kg o que parece muito acima do expectável. Aparentemente os resíduos rececionados pela empresa consistirão em vários outros códigos LER, eventualmente até em outras proporções. Em Portugal, e em consequência do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE), o Despacho n.º 17313/2008 procede à publicação dos fatores de conversão para tonelada equivalente petróleo (tep) de teores em energia de combustíveis selecionados para utilização final, bem como dos respetivos fatores para cálculo da Intensidade Carbónica pela emissão de gases com efeito de estufa, referidos a quilograma de CO<sub>2</sub> equivalente (kgCO<sub>2e</sub>). Os valores para os combustíveis selecionados são os que constam na tabela seguinte (Tabela 26).

Tabela 26 PCI e FE de combustíveis [33].

COMBUSTÍVEL	PCI		FE	
	( MJ/ kg )	PCI (tep/t)	(kgCO <sub>2</sub> e/GJ)	(kgCO <sub>2</sub> e/tep)
Antracite	26,7	0,638	98,2	4114,4
Betume / Alcatrão	40,2	0,96	80,6	3374,6
Biogasolina e Biodiesel	27	0,645	0	0
Briquetes de lignite	20	0,478	101,1	4232,9
Briquetes de turfa	16-16,8	0,382-0,401	105,9	4433,8
Carvão betuminoso	25,8	0,616	94,5	3856,5
Carvão sub-betuminoso	18,9	0,451	96	4019,3
Carvão vegetal	29,5	0,705	0	0
Combustível para motor (gasolina)	44-45	1,051-1,075	69,2	2897,3
Coque de Carvão	28,2	0,674	94,5	3956,5
Coque de forno / lignite ou gás	28,2-28,5	0,674-0,681	107	4479,9
Coque de Petróleo	31-32,5	0,740-0,776	97,5	4082,1
Etano	46,4	1,108	61,6	2579,1
Fuelóleo pesado	40-40,4	0,955-0,965	77,3	3236,4
Fuelóleo	41,2	0,984	77,3	3236,4
Gás de Alto Forno	2,5	0,06	259,4	10860,6
Gás de coqueria e de fábricas de Gás	38,7	0,924	44,7	1871,5
Gás de forno de acearia a oxigênio	7,1	0,17	171,8	7129,9
Gás de petróleo liquefeito	46-47,3	1,099-1,130	63	2637,7
Gás de Refinaria	49,5	1,182	51,3	2147,8
Gás natural (superior a 93 % de metano)	47,2-48	1,127-1,146	56,1	2348,8
Gás natural liquefeito	44,2-45,2	1,056-1,080	64,1	2683,7
Gás natural (1)	45,1	1,077	64,1	2683,7
Gases de aterro/ lamas de depuração e outros biogases	50,4	1,204	0	0
Gasóleo / Diesel	42,3-43,3	1,010-1,034	74	3098,2
Hulha	17,2-30,7	0,411-0,733	97,5	4082,1
Lignite castanha	5,6-10,5	0,134-0,251	101,1	4232,9
Lignite negra	10,0-21	0,239-0,502	101,1	4232,9
Lubrificantes, ceras parafínicas e outros produtos Petrolí	40,2	0,96	73,3	3068,9
Madeira / resíduos de Madeira	13,8-15,6	0,330-0,373	0	0
Matérias -primas para refinaria	43	1,027	73,3	3068,9
Metano	50	1,194	54,9	2298,6
Monóxido de Carbono	10,1	0,241	155,2	6497,9
Nafta química / Condensados de gasolina	44,5	1,063	73,3	3068,9
Óleo de xisto	38,1	0,91	73,3	3068,9
Óleos usados	40,2	0,96	73,3	3068,9
Orimulsão.	27,5	0,657	76,9	3219,6
Outra biomassa primária sólida	11,6	0,277	0	0
Outros biocombustíveis Líquidos	27,4	0,654	0	0
Peletes / briquetes de madeira	16,8	0,401	0	0
Petróleo Bruto	42,3	1,01	73,3	3068,9
Querosene	43,8	1,046	71,8	3006,1
Resíduos Industriais	7,4-10,7	0,177-0,256	142,9	5982,9
Turfa	7,8-13,8	0,186-0,330	105,9	4433,8
Xisto betuminoso	8-9	0,191-0,215	106,6	4463,1

(1)- Massa específica do gás natural é de 0,8404 kg/m<sup>3</sup>

Os valores para o PCI de resíduos indústrias a considerar estão na gama de 7,4 a 10,7 MJ/kg. No Documento de Referência da Comissão Europeia BREF WI (*Waste Incineration*) com as MTD para as incineradoras de resíduos [34], incluem valores para PCI bastante semelhantes, como mostra a tabela apresentada de seguida (Tabela 27).

**Tabela 27** Valores de PCI calculados em 50 incineradoras europeias.

PCI (unidades)	Mínimo	Média	Máximo
MJ/kg	8,0	10,4	12,6
MWh/ton	2,2	2,9	3,5

Neste documento de referência é incluído um método simples e bastante fiável ( $\pm 5\%$ ). Para o para cálculo do PCI, pode-se usar a seguinte expressão (8), em que as perdas de calor são consideradas bem como a razão de combustível e vapor produzido [34]:

$$PCI = (1,133 \times (m_{stw} \div m_c) \times C_{stx} + 0,008 \times t_g) \div 1,085 \quad \left(\frac{GJ}{ton}\right) \quad (8)$$

Onde:

- $m_{stw}$  – Quantidade de vapor produzido a partir dos resíduos no mesmo período, por exemplo ton/ano (Equação 9),
 
$$m_{stw} = m_{stx} - (m_f \times (C_f \div C_{stx}) \times \eta_b) \quad (9)$$
- $m_{stx}$  - Quantidade total de vapor produzido no mesmo período, por exemplo ton/ano,
- $m_f$  - Quantidade de combustível complementar usado no mesmo período, por exemplo ton/ano,
- $m_c$  - Quantidade de *resíduos incinerados* no mesmo período, por exemplo ton/ano,
- $C_{stx}$  - Entalpia do vapor deduzindo a entalpia da água de alimentação à caldeira (GJ/ton)
- $C_f$  - PCI do combustível complementar utilizado (GJ/ton)
- $t_g$  - Temperaturas dos gases após caldeira a 4- 12 % O<sub>2</sub> (°C)
- 0,008 – Energia específica nos gases (GJ/ ton x °C)
- 1,133 e 1,085 são constantes resultantes das regressões das expressões
- $\eta_b$  - Eficiência da caldeira (aproximadamente 0,8)

Aplicando esta expressão nesta instalação:

- Massas de vapor – determinação de  $m_{stx}$

Das medições da secção 4.2.2 do capítulo IV tem-se;

Vapor produzido a 4 MPa – 7,21 ton/h, do qual 5,460 ton/h são sobreaquecidos para a turbina e o restante 1,74 ton/h é para a fábrica.

Assume-se então  $m_{stx} = 7,21$  ton/h.

Como o combustível complementar basicamente é usado no arranque vamos prescindir do seu efeito neste cálculo,  $m_f = 0$  e  $m_{stw} = m_{stx} = 7,21$  ton/h

- Entalpias de vapor – determinação de  $C_{stx}$

Das tabelas de vapor tem-se;

Entalpia de vapor sobreaquecido (h) 4 MPa e 480°C - 3398 kJ / kg

Entalpia de vapor saturado ( $h_g$ ) 4 MPa - 2800 kJ / kg

A entalpia de vapor média será  $(3398 \times 5460 + 2800 \times 1740)/7210 = 3248$  kJ/kg

Temperatura da água de alimentação à caldeira – 95 °C

Calor específico da água ( $C_{pag}$ ) - 4,186 kJ/ kg. °C

Temperatura de referência  $t_r$  - 20°C

Energia da água de alimentação (Equação 10):

$$Q_{ag} = m_{ag} \times C_{pag} \times (t_{ag} - t_r) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \quad (10)$$

$$= 1 \times 4,186 \times (95 - 20) = 313,95 \text{ kJ/kg}$$

Então  $C_{stx} = [(3248) - (313,95)] = 2934,05$  kJ/kg

- Temperatura dos gases após caldeira,  $T_g = 250$  °C
- Quantidade de resíduos incinerados  $m_c = 2169,57$  kg/h
- Para o PCI tem-se;

$$PCI = (1,133 \times (7210 \div 2169,57) \times 2934,05 + 0,8 \times 250) \div 1,085$$

$$= \mathbf{10\ 366 \text{ kJ/ kg}}$$

Este valor, embora se aproxime do valor máximo do Despacho n.º 17313/2008, aproxima-se também do valor médio preconizado pelas MTD [34].

## 5.2 Rendimento da caldeira

Podem-se aplicar dois métodos para o cálculo do rendimento de uma caldeira.

### ✓ Método direto [25]

Pela razão entre a energia transferida para o fluido de trabalho e a energia fornecida pelo combustível e dada pela expressão (11):

$$\eta = \frac{Q_v}{\Sigma \text{Energia}_{entra}} = \frac{Q_v - Q_{ag}}{Q_c} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

- $\eta$  - rendimento do gerador de vapor (%),
- $Q_v$  - energia contida no vapor em kJ (12),

$$\text{Em que } Q_v = \dot{m}_v \times h_v \quad (\text{kJ}) \quad (12)$$

$\dot{m}_v$  - Caudal de vapor produzido (kg)

$h_v$  - Entalpia do vapor (kJ/kg)

- $Q_{ag}$  - energia na água de alimentação (kJ)  
Dada pela equação 10.
- $Q_c$  - calor de combustão (13):

$$\text{Em que } Q_c = \dot{m}_c \times PCI \quad (\text{kJ}) \quad (13)$$

### ✓ Método indireto [25]

O calor fornecido é transferido para o fluido de trabalho ou é perdido de alguma forma (Equação 14).

$$\eta = 100 - \Sigma \text{perdas} \quad (14)$$

Embora este método seja mais utilizado, pois permite o conhecimento de todas as perdas, neste caso e atendendo ao tipo de combustível alguns dados seriam de difícil obtenção preferiu-se o método direto.

Tem-se então:

- ✓  $\dot{m}_v = 7210$  kg/h, recordando que destes, 5460 kg/h são de vapor sobreaquecido com entalpia  $h = 3398$  kJ/kg e 1740 kg/h são de vapor saturado para a fábrica com  $h_g = 2800$  kJ/kg

$$Q_v = (5460 \times 3398) + (1740 \times 2800) = 23\,425\,080 \text{ kJ}$$

$$\checkmark Q_{ag} = (7210 / 0,98) \times 4,186 \times (95 - 20) = 2\,309\,774 \text{ kJ}$$

(Está-se a incluir no caudal de água 2% das purgas da caldeira)

$$\checkmark Q_c = 2169,57 \text{ kg} \times 10\,366 \text{ kJ/kg} = 22\,489\,762 \text{ kJ}$$

Aplicando a expressão (11) tem-se,

$$\eta = ((23\,425\,080 - 2\,309\,774) / 22\,489\,762) \times 100 = 93,88 \%$$

### 5.3 Eficiência da turbina

Como início deste ponto e em jeito de lembrete inclui-se na seguinte figura (Figura 49) o diagrama temperatura em função da entropia dos ciclos termodinâmicos e curvas características.



Figura 49 Diagrama pressão temperatura e curvas características [35].

A turbina da instalação em estudo segue um ciclo de *Rankine* regenerativo com aquecimento direto (processo adiabático) ilustrado na próxima figura (Figura 50).

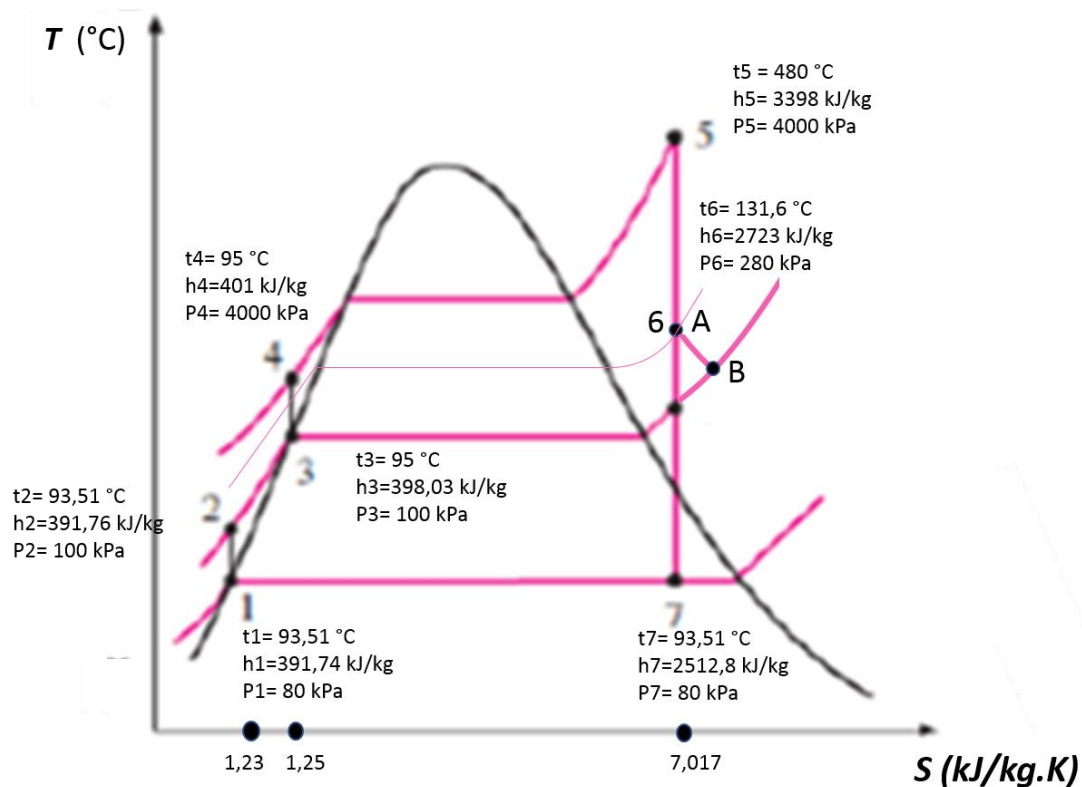
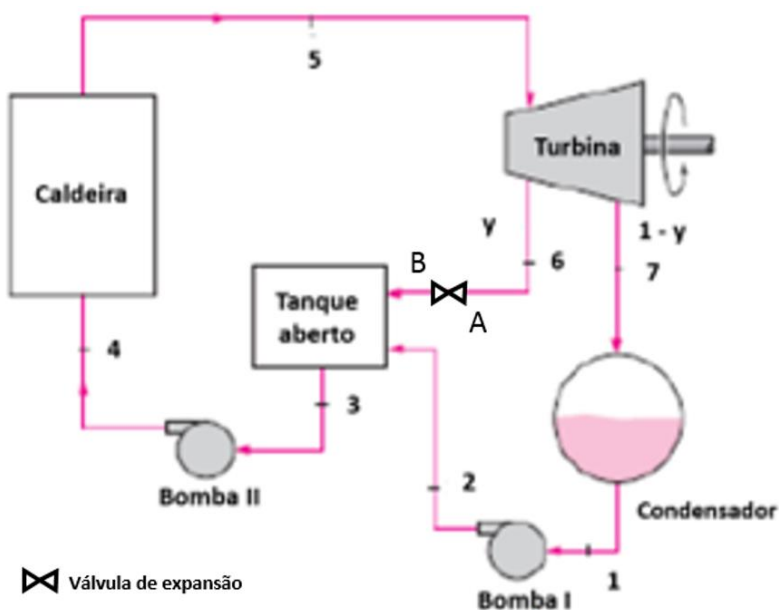


Figura 50 Ciclo de Rankine regenerativo com aquecimento direto [35].

Neste ciclo o vapor entra na turbina à pressão da caldeira em (5). Após entrada na turbina o vapor expande isentropicamente na turbina até uma pressão muito inferior (6) onde uma parte é extraída e encaminhada para o regenerador atmosférico, após passar por válvula de expansão (A – B) enquanto a outra parte do vapor na turbina (que é a maior parte) continua a expandir até ao fim, isto é, até atingir a pressão do

condensador (7). O condensado no condensador está à temperatura de saturação correspondente à pressão do condensador em (7). O condensado sai do condensador como líquido saturado em (1). O condensado (1) entra no regenerador aberto vindo da bomba, onde entra em contacto direto com o vapor extraído da turbina (6). A mistura deixa o regenerador aberto como líquido saturado correspondente à pressão de aquecimento em (3). A segunda bomba garante que o fluido de trabalho chegue à pressão da caldeira (4), onde muda o seu estado de líquido para vapor e é sobreaquecido para as condições de entrada da turbina. Na tabela 28 indicam-se as propriedades dos vários pontos do ciclo.

Tabela 28 Propriedades dos pontos no ciclo.

Estados	t (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	x (%)	Observações
1	93,51	80	391,74	1,233	0	
2	93,51	100	391,76	1,233		S <sub>2</sub> = S <sub>1</sub>
3	95	100	398,03	1,25		
4	95	4000	401	1,25		S <sub>4</sub> = S <sub>3</sub>
5	480	4000	3398	7,017		
6	131,6	280	2723	7,017		S <sub>5</sub> = S <sub>6</sub> = S <sub>7</sub>
B	123,31	100	2723	7,483		
7	93,51	80	2512,8 b)	7,017	93,33	x <sub>7</sub> = (S <sub>7</sub> - S <sub>f</sub> ) / (S <sub>g</sub> - S <sub>f</sub> ) a)

a) Valores de S<sub>f</sub> e S<sub>g</sub> @ 93,51 °C e 80 kPa - S<sub>f</sub> = 1,2331 e S<sub>g</sub> = 7,4344 kJ/kgK

b) Valores de h<sub>f</sub> e h<sub>fg</sub> @ 93,51 °C e 80 kPa - h<sub>f</sub> = 391,74 e h<sub>fg</sub> = 2273,47 kJ/kg

$$h_7 = 391,74 + 2273,47 \times 0,9333 = 2512,8 \text{ kJ/kg}$$

Para a determinação da eficiência térmica do ciclo recorre-se à seguinte expressão (15):

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{saída}}{q_{entrada}} \quad \% \quad (15)$$

Em que  $q_{entrada}$  é dada por (16):

$$q_{entrada} = h_5 - h_4 \quad \text{kJ/kg} \quad (16)$$

e

$$q_{saída} = (1 - y) \times (h_7 - h_1) \quad \text{kJ/kg} \quad (17)$$

Assim a expressão (15) pode ter o seguinte arranjo:

$$\eta_t = \frac{(1 - y) \times |(h_7 - h_5)| + y \times |(h_6 - h_5)|}{(h_5 - h_4)} \quad (18)$$

Nota: Por neste caso não ter um valor muito significativo não se considerou a energia da bomba.

Para a determinação da fração de caudal mássico  $y$  extraído da turbina usou-se a expressão (20) deduzida de:

$$y \times h_6 + (1 - y) \times h_2 = h_3 \quad (19)$$

$$\rightarrow y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} \quad (20)$$

Recorrendo-se aos valores da tabela 28, obtém-se:

$$\rightarrow y = (399,03 - 391,76) \div (2723 - 391,76) = 0,0031$$

Conclui-se que apenas uma pequena parte (0,31 %) de caudal mássico de vapor gerado na caldeira são extraídos.

Finalmente recorrendo-se à equações 18 e atendendo à Tabela 28 tem-se:

$$\eta_t = \frac{(1 - 0,0031) \times (2512,8 - 3398) + 0,0031 \times (2723 - 3398)}{(3398 - 401)} = 0,295$$

$$\therefore \eta_t = 29,5 \%$$

#### 5.4 Eficiência da cogeração

O Dec. Lei 23/ 2010 procede ao enquadramento da atividade de produção em cogeração. De seguida destacam-se os principais pontos relativos à eficiência.

##### **Cálculo da eletricidade produzida em cogeração [36]**

Os valores utilizados para o cálculo da eletricidade produzida em cogeração serão determinados com base no funcionamento esperado ou efetivo da unidade em condições normais de utilização. No caso desta instalação com turbina de condensação com extração de vapor e em que a eficiência anual é inferior a 80% a cogeração é calculada de acordo com a seguinte fórmula (21):

$$E_{CHP} = H_{chp} \times C \quad (21)$$

Em que:

$E_{\text{CHP}}$  — Quantidade de eletricidade produzida em cogeração;

$C$  — Rácio eletricidade/calor (entendido como o rácio entre a eletricidade produzida em cogeração e o calor útil produzido exclusivamente em modo de cogeração, utilizando dados operacionais da unidade em causa);

$H_{\text{chp}}$  — Quantidade de calor útil produzida em cogeração (calculada para o efeito como produção total de calor, deduzindo o calor que seja eventualmente produzido em caldeiras separadas ou por extração de vapor vivo do gerador de vapor antes da turbina).

O cálculo da eletricidade produzida em cogeração deve basear-se no rácio efetivo eletricidade/calor. Se o rácio efetivo eletricidade/calor de uma unidade de cogeração não for conhecido, podem ser utilizados, nomeadamente para fins estatísticos, os seguintes valores implícitos para as unidades de cogeração, desde que a eletricidade produzida em cogeração assim calculada seja igual ou inferior à produção total de eletricidade da unidade conforme a próxima tabela (Tabela 29).

**Tabela 29** Rácio implícito eletricidade/calor,  $C$ .

<b>Tipo de unidade</b>	<b>Rácio implícito eletricidade/calor, <math>C</math></b>
Turbinas de gás em ciclo combinado com recuperação de calor	0,95
Turbina de vapor contrapressão	0,45
Turbinas de condensação com extração de vapor	0,45
Turbinas de gás com recuperação de calor	0,55
Motores de combustão interna	0,75

O Decreto refere ainda que: ***Se uma parte do conteúdo energético do combustível utilizado no processo de cogeração for recuperada em produtos químicos e reciclada, essa parte é subtraída do consumo de combustível antes do cálculo da eficiência global utilizado.***

### **Cálculo da poupança de energia primária [36]**

A poupança de energia primária (PEP) da atividade da cogeração relativamente à produção separada de calor e de eletricidade é medida de acordo com a seguinte fórmula (22):

$$PEP = \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{CHP H\eta}{Ref H\eta}\right) + \left(\frac{CHP E\eta}{Ref E\eta}\right)} \right] \times 100\% \quad (22)$$

Em que:

- **CHP H $\eta$**  é a eficiência térmica do processo, definida como a produção anual de calor útil dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor e de eletricidade;
- **Ref H $\eta$**  é o valor de referência da eficiência para a produção separada de calor (pela lista da comissão europeia e para este tipo de instalação é de 75%);
- **CHP E $\eta$**  é a eficiência elétrica, definida como a produção total anual de eletricidade dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor útil e de eletricidade num processo de cogeração. Quando uma unidade de cogeração gerar energia mecânica, a quantidade anual de energia elétrica proveniente da cogeração poderá ser acrescida de um elemento suplementar que represente a quantidade de energia elétrica que é equivalente à da energia mecânica;
- **Ref E $\eta$**  é o valor de referência da eficiência para a produção separada de eletricidade (pela lista da comissão europeia e para este tipo de instalação é de 25%).

Para valores de PEP superiores a zero e até 10 % a cogeração é considerada eficiente e para valores superiores a 10 % considera-se muito eficiente. Nesta instalação e para 2017, o valor do PEP foi de 11 %, sendo então considerada uma cogeração muito eficiente.

Tentou-se estimar esta poupança de energia para o período em estudo de cerca 9 dias, mas verificou-se que a eficiência só seria positiva se o PCI do combustível fosse de cerca 6 MJ/kg. Concluindo-se que o período é muito reduzido para ser feita esta análise.



# 6. AVALIAÇÃO DAS SITUAÇÕES COM POTENCIAL DE OTIMIZAÇÃO

- 6.1 Humidade superficial do combustível
- 6.2 Produção de vapor de 9 bar para a fábrica
- 6.3 Vapor de reevaporação dos purgadores de alta
- 6.4 Manutenção de purgadores da fábrica
- 6.5 Vapor de reevaporação dos purgadores da fábrica



## 6. AVALIAÇÃO DAS SITUAÇÕES COM POTENCIAL DE OTIMIZAÇÃO

### 6.1 Humidade superficial do combustível

Os resíduos industriais são rececionados e armazenados em parque sem cobertura. A Empresa estima que a humidade superficial incluída no combustível, embora variando ao longo do ano pode atingir valores entre 1 a 10%. A energia perdida devida à humidade superficial do combustível é gasta a evaporar essa humidade e pode ser calculada com a seguinte expressão (23) [25]:

$$E_{perdahumsup} = m_{humsup} \times (h_g - h_f) \quad (23)$$

Em que:

- $m_{humsup}$  - é a massa de humidade superficial contida na massa de combustível  $m_c$  [kg]
- $h_g$  - Entalpia de vapor saturado da água que constitui a humidade superficial do combustível [KJ/kg]
- $h_f$  - Entalpia de líquido saturado da água que constitui a humidade superficial do combustível [KJ/kg]

O calor latente de evaporação da água não varia muito com a pressão. Por exemplo, para água à pressão de 0,01 atm a diferença  $h_g-h_f=2484,866$  kJ/kg e para água à pressão de 1 atm tem-se  $h_g-h_f= 2259,197$  kJ/kg. Como a água correspondente à humidade superficial do combustível evapora a pressão desconhecida, mas seguramente inferior a 1 atm, adoptar-se-á  $h_g-h_f=2372$  kJ/kg, que é a média aritmética entre os calores de evaporação da água a 0,01 e a 1 atm [25].

Supondo que a média de humidade superficial seja de 3% e considerando  $m_c$  média de 2169 kg/h e um ano de pelo menos 2000 horas tem-se:

$$\begin{aligned} E_{perdahumsup} &= 2169 \times 0,03 \times 2372 \times 2000 = 308692080 \text{ kJ} \\ &= 85,7 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Parece-nos ser um valor razoável que justificará alguma solução que permita diminuir a humidade superficial antes da queima.

## 6.2 Produção de vapor de 0,9 MPa para a fábrica

O caudal de vapor para a fábrica (recauchutagem) é praticamente todo desviado do vapor saturado da caldeira a 4 MPa antes de entrar no sobreaquecedor. Entre o final da caldeira e o economizador, existe um permutador que faria algum aquecimento do condensado da fábrica, mas neste momento não está operacional.

Fez-se uma abordagem com uma reputada empresa internacional no sentido de um pré-dimensionamento de um permutador para aquecimento de água até à saturação, pois o barrilete de separação de vapor já existe. De modo a não interferir com a situação atual, pretende-se recuperar calor após o economizador onde os gases estão a 250°C. A primeira simulação aceita perfeitamente as condições de serviço pretendidas conforme se pode ver no destaque da folha de cálculo seguinte (Figura 51).

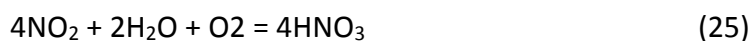
Transfer Mediums	Unit Type ->	Steam Genera	
G Heat Source		Exhaust	
L Heat Sink		Water	
<b>Flow Rates</b>			0
	Exhaust (SH= 0.24 Kcal/Kg C)	36600.0	[Kg/h]
	Water (SH= 1.00268 Kcal/Kg C)	1500	[Kg/h]
	Steam	1500.0	[Kg/h]
<b>Interface Temperatures</b>			
	Exhaust entry	260.0	[C]
	Exhaust exit	176.5	[C]
	Water entry	170.41	[C]
	Required Steam Temp	170.41	[C]
	Steam pressure	8.00	[Bar]
	<b>LMTD</b>	<b>31.05</b>	<b>SGCF27.5</b>
<b>Theoretical Available Heat</b>			
	[kcal/h]	733,503	<b>Index</b>
	[w]	852,910	27.5
	[BTU/h]	2,910,841	

Figura 51 Condições de serviço do permutador de vapor.

Uma questão importante a verificar são as condensações. De facto, quando o combustível é queimado, o enxofre é convertido em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>). Este SO<sub>3</sub> combina com a mistura para formar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):



Durante a combustão, algum nitrogénio é oxidado e forma dióxido de nitrogénio (NO<sub>2</sub>). Os dióxidos de nitrogénio nos gases, também reagem com água resultando em ácido nítrico:

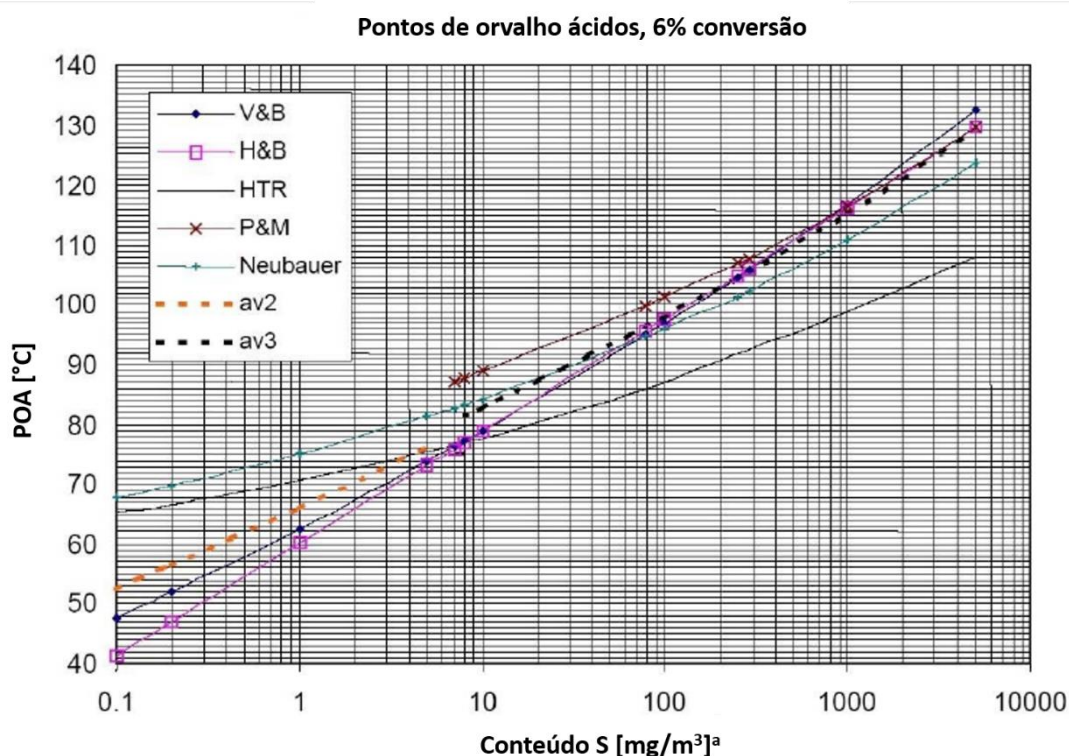


e com dióxido de enxofre e água forma mais ácido sulfúrico:



Se os gases são suficientemente arrefecidos, ocorrerá condensação e aparecerá líquido nas superfícies que estejam a temperaturas inferiores à do ponto de orvalho. A fase líquida incorporará ácido sulfúrico altamente corrosivo, causando a chamada corrosão a baixa temperatura.

A instituição, “*International Association for the Properties of Water and Steam*” (IAPWS) publicou um estudo de vários investigadores que relacionam temperaturas de orvalho ácidos e concentração de enxofre. A figura que se segue (Figura 52) resume as diferentes correlações [37].



**Figura 52** Correlações de pontos de orvalho.

Observações relativas à figura anterior:

a) volume em  $\text{m}^3$  no estado normal de 101,325 kPa e  $0^\circ\text{C}$  (273,15 K);

V & B - Verhoff e Banchemo (1974);

H & B - Haase e Borgmann (1981);

HTR - Siemens AG Energy Sector;

P & M - Pierce e Mueller (1977);

Neubauer (1962);

av2, av3 – curvas medias sobre as diferentes equações válidas na gama respetiva.

Numa análise mais superficial pode-se concluir que atendendo à temperatura prevista de saída no permutador de 176,5 °C (Figura 51) e a concentração de SO<sub>2</sub> (Tabela 24) não ultrapassar as 35 mg/m<sup>3</sup> não é de esperar condensações ácidas.

O tipo de permutador que se preconiza é de um recuperador com “Tubos de Calor”. Os “tubos de calor” são tubos de vácuo selados, com a extremidade inferior na corrente quente e outra extremidade superior na corrente fria. Contém um fluido de trabalho que, no constante ciclo de evaporação e condensação, se desloca à volta do tubo selado. Transfere-se assim, energia térmica de uma para a outra corrente repetindo-se sucessivamente este ciclo. A figura seguinte (Figura 53) exemplifica este processo.

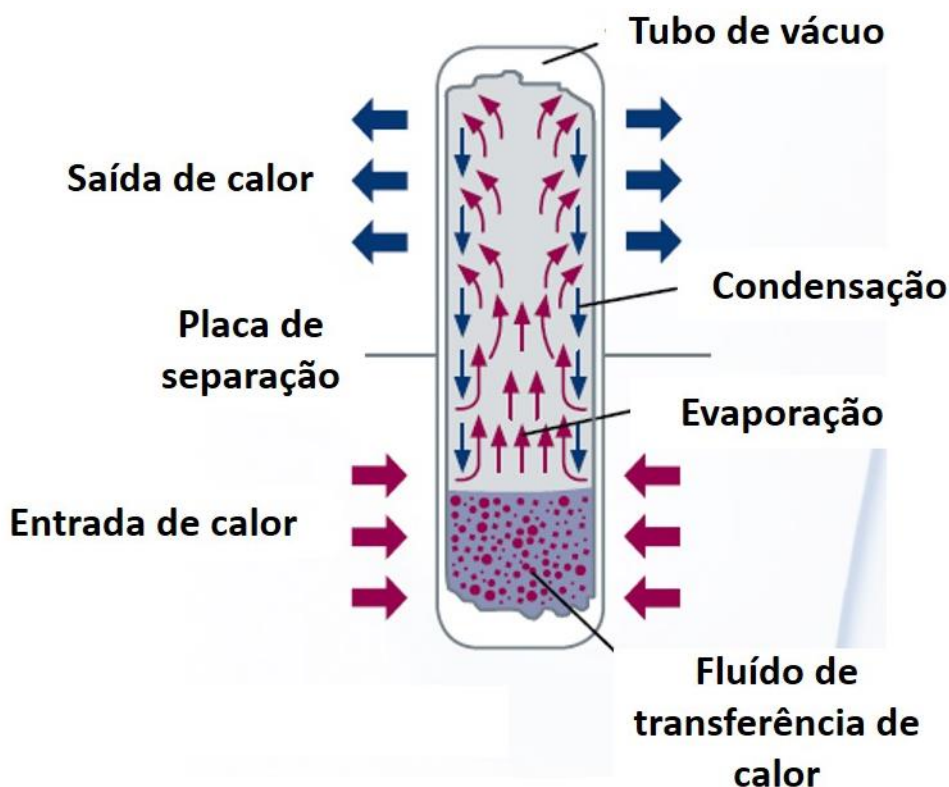
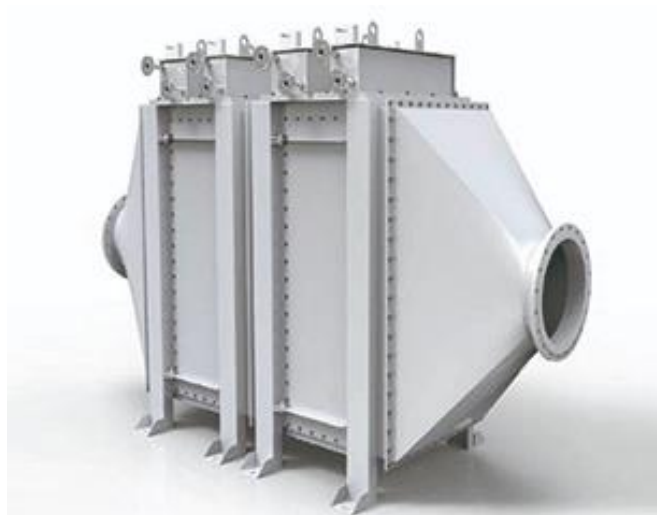


Figura 53 Tubo de calor e ciclo de transferência de calor.

O “Tubo de Calor”, normalmente é posicionado na vertical (embora também possa operar até uma inclinação de 4° relativamente à horizontal). Uma vantagem deste tipo de permutador é que na sua conceção, procuram a maior facilidade na limpeza dos tubulares. A Figura 54 dá uma ideia destes sistemas [38].



**Figura 54** Permutador de tubos de calor.

Este sistema de permutador sem instalação, tem um orçamento de cerca 95 a 100 000€. É um investimento que requer alguma ponderação, mas tem a grande vantagem de permitir que uma grande quantidade de vapor a 4 MPa, pelo menos cerca de 1500 kg/k pudesse passar pelo sobreaquecedor e ser dirigido para a turbina para produção de eletricidade.

### 6.3 Vapor de reevaporação dos purgadores de alta

Já se referiu anteriormente que a temperatura do desgaseificador é de 95 °C e deveria ser de pelo menos 99/100 °C, de modo a verificar-se a desgaseificação completa. Em princípio o vapor extraído da turbina não estará a entrar no tanque, eventualmente devido a problemas da válvula de controlo. Já está programada intervenção em próxima paragem.

Também a água de reposição entra fria a cerca de 15 °C sem qualquer pré-aquecimento. Perto da tubagem de água de reposição, mas no exterior existe uma descarga/exaustão de vapor de reevaporação dos purgadores de alta pressão da turbina e algum vapor da vedação do veio da turbina (*Glands*).

A estimativa de calor que sai por esta tubagem de exaustão é um pouco complicada. Recorrendo-se ao guia “*DETR Energy Consumption Guide Nº 67 – Steam Distribution Costs*”, esta inclui uma expressão e que é assumida pelos habituais intervenientes nos sistemas de vapor como uma estimativa bastante satisfatória [39]:

$$\dot{m}_{vapor} = 2,8 \times 6^L \quad (27)$$

Em que:

$\dot{m}_{vapor}$  - Caudal mássico da perda de vapor (kg/h)

$L$  - Comprimento visível da pluma (m)

Neste caso a pluma tem cerca de 1,5 m de altura e aplicando a equação anterior estima-se um caudal de vapor atmosférico de cerca 41,15 kg/h.

- A energia necessária adicionar ao desgaseificador para elevar a temperatura de 95 °C para 100°C é dada pela equação 10;

Massa de água com as purgas = 7357 kg/h (7210/ 0,98)

$$Q_{ag} = 7357 \times 4,186 \times 5 = 153\,982 \text{ kJ/h}$$

- O vapor a aproveitar, inclui a energia que pode ser calculada pela equação 12, considerando a entalpia de vapor atmosférico de 2675 kJ/kg,

$$Q_v = 41,15 \times 2675 = 110\,076 \text{ kJ/h}$$

Não é suficiente, eleva a temperatura até cerca de 98,5 °C, mas permite reduzir significativamente as necessidades de vapor a extrair da turbina. A solução passa praticamente pela instalação do permutador, não havendo necessidade de qualquer outro equipamento complementar para além de tubagem. O permutador que se mostra na figura seguinte tem um custo, sem instalação de cerca 1600 €. A figura seguinte (Figura 55) dá também indicações do tipo de instalação.

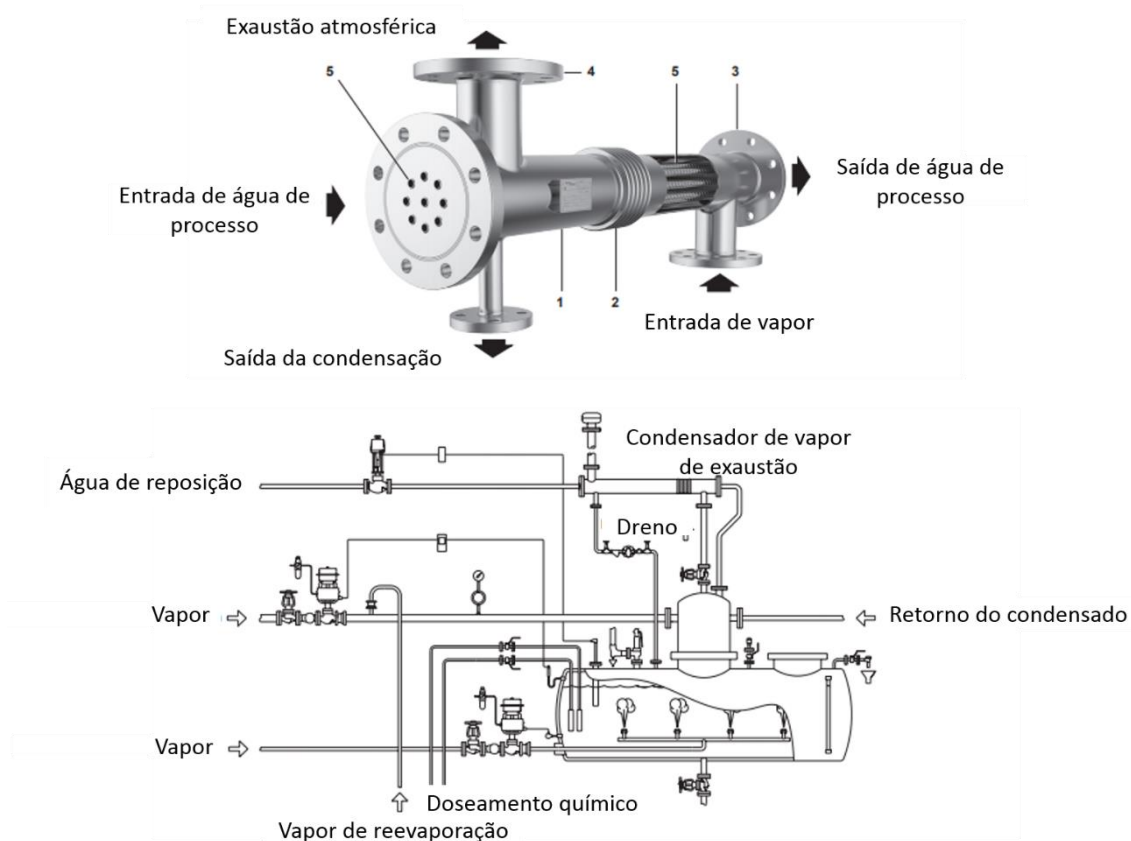


Figura 55 Permutador de condensação de vapor de reevaporação [40].

## 6.4 Manutenção dos purgadores da fábrica

Ainda relativamente ao consumo de vapor para a fábrica, pareceu-nos pertinente avaliar o potencial de perdas de vapor, por eventuais purgadores de condensado de vapor em fuga. Um purgador é um dispositivo automático (válvula) que garante a descarga de condensado sem perda de vapor. Se isto acontecer, então o purgador estará avariado. De seguida, inclui-se um breve resumo do documento de referência da Comissão Europeia, Abordagem MTD para eficiência energética [41].

### Purgadores com perda de vapor:

Um purgador que não esteja a vedar, purgador em fuga, pode representar uma perda de uma quantidade significativa de vapor, resultando numa perda muito elevada de energia. Um programa de manutenção adequada, geralmente reduz com eficácia estas perdas. Num sistema de vapor, onde nos três ou cinco últimos anos, os purgadores não foram inspecionados, até 30% deles estarão com fuga de vapor. Pelo contrário, em

sistemas com manutenção programada esta percentagem é reduzida até cerca de 5% [1].

Existem vários tipos de purgadores, cada um com características próprias. Os meios de verificação do seu estado de funcionamento baseiam-se em verificações; acústicas, visuais, condutividade elétrica e temperatura [1].

A Tabela 30 mostra as perdas de vapor aproximadas em orifícios de vários diâmetros.

**Tabela 30** Caudais de vapor em purgadores com fuga [41].

Diâmetro aproximado do orifício do purgador (nm)	Perda de vapor aproximada (kg/h)			
	Pressão de vapor aproximada (barg)			
	1	7	10	20
1	0,38	1,5	2,1	-
2	1,5	6,08	6	16,4
3	6,2	24	34,4	65,8
4	13,9	54	77	148
6	24,8	96	137	263
8	55,8	215	309	591

O estado do funcionamento de um purgador cai dentro de uma das categorias da Tabela 31.

Tabela 31 Possíveis estados de funcionamento de um purgador [1].

Nomenclatura	Descrição	Definição
OK	Correto	Com funcionamento correto
FGT	Fuga total	Purgador está com perda máxima de vapor. Deverá ser substituído
FG	Com fuga	Purgador com má vedação e com fuga de vapor. Necessita de reparação ou substituição
CR	Ciclo rápido	Ciclo em purgadores termodinâmicos muito rápido. Necessita de reparação ou substituição
BQ	Bloqueado	Purgador está fechado. Nenhum condensado é descarregado. Deverá ser substituído
AL	Alagado	Purgador não consegue descarregar a totalidade do condensado. Substituir por purgador de dimensão adequada
FS	Fora de serviço	Linha está fora de serviço
NT	Não testado	Por dificuldades de acesso não foi testado

Este mesmo Documento de Referência da Comissão Europeia indica que a quantidade de perda de vapor, por um purgador pode ser estimada pela seguinte fórmula (28) [41]:

$$L_{t,y} = \frac{1}{150} \times FT_{t,y} \times FS_{t,y} \times CV_{t,y} \times h_{t,y} \times \sqrt{P_{1,t}^2 - P_{2,t}^2} \quad (28)$$

Em que:

- $L_{t,y}$  - caudal de vapor que o purgador  $t$  perde no período  $y$  (toneladas)
- $FT_{t,y}$  - fator de operação do purgador  $t$  durante o período  $y$  (ver Tabela 32)
- $FS_{t,y}$  - fator de carga do purgador  $t$  durante o período  $y$  (ver Tabela 33)
- $CV_{t,y}$  - coeficiente de caudal do purgador  $t$  durante o período  $y$ , dado por

$$CV_{t,y} = 3,43 \times R^2 \quad (29)$$

em que  $R$  é o raio da abertura em cm.

- $h_{t,y}$  - número de horas de operação do purgador  $t$  durante o período  $y$
- $P^2_{1,t}$  - pressão a montante do purgador  $t$  (bar)
- $P^2_{2,t}$  - pressão a jusante do purgador  $t$  (bar)

O fator de operação  $FT_{t,y}$  encontra-se na Tabela 32.

**Tabela 32** Fatores de operação para as perdas de vapor de um purgador [1].

Tipo de operação		$FT_{t,y}$
FGT	Fuga total	1,0
FG	Com fuga	0,25
CR	Ciclo rápido	0,20

O fator de carga tem em consideração a interação entre vapor e condensado. Quanto mais condensado escoar pelo purgador, menos espaço haverá para a passagem de vapor. O escoamento de condensado depende das aplicações, conforme se pode verificar na Tabela 33.

**Tabela 33** Fatores de carga para as perdas de vapor [1].

Aplicação	Fator de carga
Aplicações de processo típicas	0,9
Aplicações de traçagens	1,4
Escoamento de vapor (sem condensado)	2,1

### Abordagem usada por algumas empresas de Engenharia e Auditoria

Usam a bem conhecida equação de “John Napier” (Equação 30):

$$\dot{m}_{vapor} = 0,247175 \times \Delta P \times d^2 \quad (\text{Equação 30})$$

Em que:

- $\dot{m}_{vapor}$  - Caudal de vapor (kg/h)
- $\Delta P$  - Diferencial de pressão entre o orifício (bar)
- $d$  - Diâmetro do orifício (mm)

### Levantamento efetuado

Com ajuda de um detetor ultrassónico procedeu-se a um rastreio e inspeção ao funcionamento dos purgadores e obtiveram-se os seguintes resultados:

- Tipo de purgadores:
 

Flutuador.....	3
Termodinâmico.....	11
Termostático de pressão Balanceada.....	5
Balde Invertido.....	109
Total	<b>128</b>
- Marcas instaladas:
 

Spirax - Sarco.....	96
Armstrong.....	24
Douglas.....	1
Desconhecida.....	6
Europa.....	1
Total	<b>128</b>
- Estado de funcionamento:
 

Bloqueados.....	4
Fuga de vapor total.....	18
Com fuga.....	2
Não testado.....	5
Ciclo rápido.....	1
Bom funcionamento.....	98
Total	<b>128</b>

Os purgadores com fuga são todos de balde invertido e o orifício é de 3 mm, a pressão a montante é de 4 Bar a jusante atmosférica. Aplicando a equação 28 e os fatores de operação e de carga das Tabelas 32 e 33, obteve-se as seguintes perdas:

Purgadores com fuga total	-	4,64 kg/h x 18 purgadores	=	83,52 kg/h
Purgadores com fuga	-	1,16 kg/h x 2 purgadores	=	2,32 kg/h
Purgadores com ciclo rápido	-	0,99 kg/h x 1 purgador	=	0,99 kg/h

Tem-se uma perda por hora de 86,83 kg.

A Recauchutagem funciona 16 horas dia 6 dias por semana e 50 semanas por ano, ou seja, 4800 horas o que totaliza uma perda de 416,7 toneladas de vapor que poderiam produzir cerca de 100 MWh de energia elétrica, perto de 10 000 €.

Procedeu-se ao mesmo cálculo, mas utilizando a equação de *Napier* e obteve-se quase o dobro da equação das MTD. A primeira estimativa está corrigida com fatores de operação e de carga. Na outra abordagem é normal fazer-se uma redução de 50 a 60% devido às seguintes razões:

- Nem todos os purgadores falham totalmente abertos;
- O efeito da geometria da sede, sujidade e bloqueios parciais;
- A descarga inclui as duas fases, mistura de condensado a reevaporar e vapor;
- Alguns purgadores estão instalados a jusante de válvulas de controlo e poderão regular fechados;
- Se o condensado é recuperado para a central térmica, uma percentagem de vapor em fuga elevará a temperatura e condensará.

Se o processo de cálculo destas estimativas estiver automatizado, por exemplo numa folha de cálculo, é preferível e mais rigoroso o método das MTD.

## 6.5 Vapor de reevaporação da fábrica

Praticamente a globalidade do vapor consumido na fábrica é de modo indireto, isto é, após ceder calor há retorno de condensado. Também a pressão de vapor de operação é de 0,4 MPa resultante de um conjunto redutor de pressão à entrada da fábrica que faz a redução a partir de 0,9 MPa. O condensado resultante é conduzido por tubagem até ao tanque de condensados.

Neste tanque, chega a totalidade do condensado, mais uma parte de vapor que foi reevaporado quando o condensado é descarregado pelos purgadores em que se dá expansão atmosférica. Esta quantidade de condensado que reevapora é bastante significativa e poderá ser calculada pela seguinte expressão (31):

$$\text{Proporção de vapor de reevaporação} = \frac{(h_f \text{ à } P_1) - (h_f \text{ à } P_2)}{h_{fg} \text{ à } P_2} \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{condensado}} \quad (31)$$

Em que:

- $h_f$  - entalpia de saturação da água [kJ/kg]
- $h_{fg}$  - entalpia de evaporação [kJ/kg]
- $P_1$  - Pressão a montante dos purgadores [MPa]
- $P_2$  - Pressão a jusante dos purgadores [MPa]

Considerando então:

$h_f$  da água do vapor a 0,3 MPa = 605,3 kJ/kg

$h_f$  da água do vapor a 0 MPa = 419,04 kJ/kg

$h_{fg}$  de evaporação do vapor a 0 MPa = 2257 kJ/kg

tem-se,

$$\begin{aligned} \text{Proporção de vapor de reevaporação} &= (605,30 \text{ kJ/kg} - 419,04 \text{ kJ/kg}) / (2227 \text{ kJ/kg}) \\ &= 0,083 \times 100 = 8,3 \% \end{aligned}$$

Da média total de 1740 kg condensado, 8,3%, são reevaporado diretamente para a exaustão atmosférica:

$$1740 \times 0,083 = \mathbf{144, 42 \text{ kg/h.}}$$

Considerando as 4800 horas anuais, esta perda ascende a **693 toneladas de vapor**.

São conhecidos pelo menos dois métodos de recuperar esta energia.

Uma com um permutador idêntico ao já mencionado no ponto da recuperação de calor das purgas da turbina, para aquecimento de água AQS por exemplo ou água para aquecimento de ar em estufas.

Outro método mais oneroso (custo de cerca 12 000 €) mas mais interessante passa pela aplicação de um termocompressor que faria a aspiração deste vapor atmosférico e misturado com vapor motriz de 0,9 MPa, descarregaria vapor a uma pressão de perto dos 4 MPa. As figuras seguintes (Figuras 56 a 58) mostram respetivamente a aparência de um termocompressor, funcionamento interno e detalhe de instalação.



Figura 56 Aspeto de um termocompressor [42].

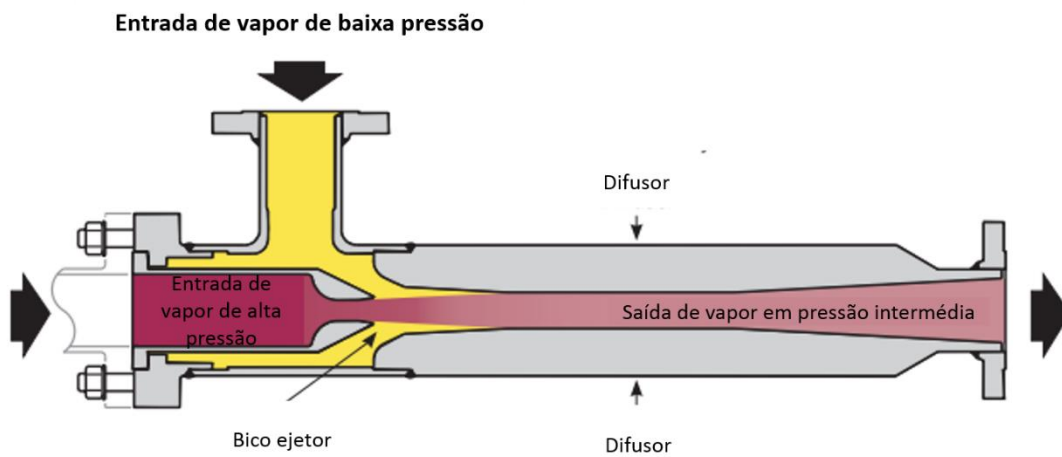


Figura 57 Termocompressor, funcionamento interno [42].

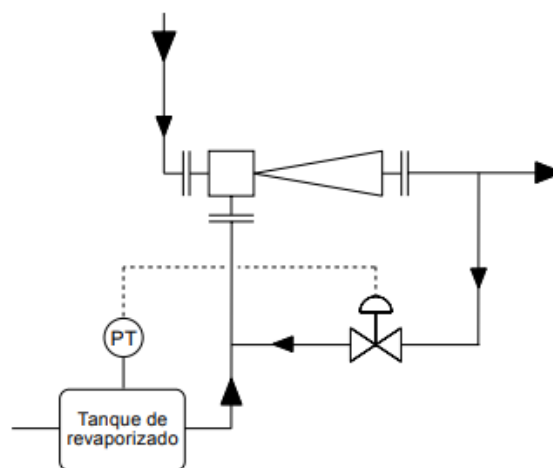


Figura 58 Termocompressor, detalhe de instalação [42].

# 7. CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES

7.2 TRABALHOS FUTUROS



## 7. CONCLUSÕES

### 7.1 Conclusões

A Unidade de Valorização Energética da Recauchutagem Nortenha tem no mapa de fluxos de resíduos industriais não perigosos, particularmente de pneus usados, um papel único no País. Com efeito é a única incineradora com Cogeração, dedicada a este tipo de resíduos.

Os principais objetivos deste estudo foram:

- Tomar conhecimento de um tipo de central termoelétrica com queima de resíduos industriais não perigosos;
- Perceber todas as fases do processo, desde a recolha de resíduos até à produção de energia elétrica;
- Investigar os pontos onde possíveis alterações possam conduzir a um aumento da energia elétrica produzida;
- Avaliar a exequibilidade técnica e económica das possíveis soluções preconizadas.

Iniciou-se este trabalho com entrevistas e reuniões com responsáveis da empresa, tentando aproveitar e absorver ao máximo informações técnicas e de gestão dos profissionais altamente qualificados da empresa. De igual modo compreender como uma empresa evolui ao longo de algumas décadas fruto de capacidades extraordinárias de empreendedorismo dos detentores do capital da empresa.

Para se perceber o papel da empresa no tecido industrial português, fizeram-se pesquisas relativas aos problemas ambientais associados aos PU e PFV e como a empresa se enquadra no sistema de Gestão dos Pneus Usados gerido pela Valorpneu. A função da empresa é exclusiva neste sistema no aspeto da valorização energética. No entanto há que lembrar o lugar da empresa na reutilização e reciclagem como Indústria de Recauchutagem.

Ao longo de várias semanas fez-se um levantamento em campo exaustivo da instalação, com desenho de componentes, de fluxos de fumos, vapor saturado, vapor

sobreaquecido, água de alimentação à caldeira, água de reposição ao desgaseificador, turbina, água de arrefecimento. Seguiu-se um período de recolha de dados e medições.

Para a obtenção de resultados era fundamental a informação o mais exata possível do poder calorífico inferior do combustível. Recordando, a empresa iniciou a atividade de valorização energética baseada na queima de PU, mas posteriormente renovou a licença com a APA para alargar a queima a resíduos industriais não perigosos.

A empresa passou então a ter como combustível uma mistura essencialmente de 50% de PU, 25% plásticos e restante têxteis.

Infelizmente o Decreto-Lei que regula a eficiência das Cogerações indica um PCI numa gama alargada e que parece ser um pouco desadequada. Optou-se por considerar um PCI calculado pelas MTD do documento de referência para incineradoras de resíduos, publicado pela Comissão Europeia.

Procedeu-se ao cálculo de eficiências da caldeira, da turbina e da Cogeração. Da turbina e Cogeração estão dentro de valores esperados, no entanto, sobre a caldeira o valor determinado da eficiência parece ser muito elevado, indiciando que o valor assumido para o PCI ser manifestamente baixo.

No plano de otimização, a empresa tem a sensibilidade de que e nomeadamente os tubulares da caldeira estarão subdimensionados para o desempenho desejado. É um assunto que neste momento a empresa está em conversações com o fornecedor de uma parte deste sistema de tubulares.

Os pontos que foram tratados para otimização energética foram:

- Redução da humidade superficial do combustível. Atualmente a receção e armazenamento são feitos a céu aberto;
- Substituir o desvio de vapor saturado para as necessidades da fábrica, optando-se por produção de vapor de 0,9 MPa ainda com energia dos gases após o economizador e que ainda estão a 250 °C;

É uma solução perfeitamente viável, mas merece estudo financeiro mais profundo pois aparentemente o período de recuperação do investimento será de cerca dois anos;

- Recuperação do vapor de reevaporação das purgas da turbina por um permutador de pré-aquecimento da água de reposição ao desgaseificador; Tem um custo de cerca 1600€ e é recuperável num período inferior a 8/10 meses;
- Reparação dos purgadores de condensado da fábrica. A sua resolução implica um custo inferior a 1000 € mas tem retorno superior a 10 000 €/ano;
- Recuperação do vapor de reevaporação do tanque de condensados da fábrica. São cerca de 8 % do vapor que é desviado antes do sobreaquecedor; A recuperação desta energia depende fundamentalmente da aplicação correta no seu consumo. A mais efetiva seria a compressão do vapor. A aquisição de um termocompressor para o efeito, com custo de 9/10 000 € ainda é recuperável em cerca de 6 meses.

## 7.2 Trabalhos futuros

Não houve a possibilidade de se observar o interior das caldeiras e avaliar o estado dos tubulares, desenho, incrustações, isolamentos. É uma das tarefas essenciais a desenvolver num futuro próximo.

Claramente há necessidade de se trabalhar no conhecimento mais profundo do vapor real do PCI. Eventualmente desenvolver-se trabalho de determinação por calorímetros em laboratório e definir periodicidade de análises.

Estudo da melhoria do sistema de arrefecimento a água.

Preparar instrumentação necessária e adequada para avaliação mais fiável do caudal de gases.

Revisão às sondas de temperatura se possível com calibração.

Ver possibilidades de registar perfil das percentagens de O<sub>2</sub>, ao longo do percurso de gases.



## 8.BIBLIOGRAFIA



## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] *European Environment Agency – “Environment and climate policy evaluation”:* EEA Report Nr 18/2016. ISBN 978-92-9213-801-1
- [2] [www.recnor.pt](http://www.recnor.pt)- página do Grupo Recauchutagem Nortenha.
- [3] [www.einforma.pt](http://www.einforma.pt)- base de dados da Informa *Dun & Bradstreet* S.A.
- [4] [www.centrodeinformacao.ren.pt](http://www.centrodeinformacao.ren.pt)- centro de informações da REN – Redes Energéticas Nacionais.
- [5] [www.e2p.inegi.up.pt](http://www.e2p.inegi.up.pt)- página do e2p- INEGI, Energias Endógenas de Portugal.
- [6] XARÁ, Susana – A incineração de resíduos em Portugal – ESB, Universidade Católica. Periódico, “Debater a Europa”, junho 2009. ISSN 1647-6336
- [7] FERRÃO, Paulo; RIBEIRO, Paulo; SILVA, Paulo; *A management system for end-of-life tyres - A Portuguese case study. Science Direct - Waste Management* 28 (2008) 604–614.
- [8] *European Environment Agency - Waste from vehicles (number and treatment of used tyres). Indicator fact sheet, TERM 2002 11b EU.*
- [9] *3Drivers- Engenharia, Inovação e Ambiente Lda. – Balanço Ambiental, Económico e Social da Gestão de Pneus Usados em Portugal. IST – Instituto Superior Técnico, IN+ - Centro de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas do Desenvolvimento. Relatório de Projeto, dezembro 2013.*
- [10] Bontoux, Laurent; *The incineration of waste in Europe: Issues and perspectives. Joint Research Centre - Institute for Prospective Technological Studies. March 1999.*
- [11] [www.etrma.org](http://www.etrma.org) - Página da *European Tyre & Rubber Manufacturer’s Association”- ETRMA , Statistics-2*
- [12] <https://ec.europa.eu/eurostat>- Base de dados estatísticos da Comissão Europeia.
- [13] *Freedonia Group Inc.- World Tyres, Industry Study with Forecasts for 2017 & 2022. Study #3105 | January 2014.*
- [14] VAN BEUKERING, P.J.H; JANSSEN, Marco A. - *Trade and recycling of used tyres in Western and Eastern Europe. Institute for Environmental Studies, Vrije*

- Universiteit. The Netherlands. Elsevier- Resources, Conservation and Recycling*, 33 (2001) 235–265.
- [15] MACHIN, Einar Blanco; PEDROSO, Daniel Travieso; CARVALHO Jr, João Andrade - *Energetic valorization of waste tyres. São Paulo State University. Elsevier- Renewable and Sustainable Energy Reviews 68 (2017) 306–315*
- [16] CONNOR, Kailyn; CORTESA, Steven; ISSAGALIYEVA, Shakhizada; MEUNIER, Adam - *Developing a Sustainable Waste Tyre Management for Thailand. Worcester Polytechnic Institute. March 1<sup>st</sup>, 2013*
- [17] SIENKIEWICZ, Maciel; KUCINSKA-LIPKA, Justyna; JANIK, Helena; BALAS, Adolf; *Progress in used tyres management in the European Union: A review. Gdansk University of Technology. Elsevier- Waste Management 32 (2012) 1742–1751*
- [18] EUROPEAN TYRE & RUBBER MANUFACTURER’S ASSOCIATION – *Statistics 2014 Edition.*
- [19] Dec. Lei 111/ 2001 - Estabelece o regime jurídico a que fica sujeita a gestão de pneus e pneus usados
- [20] [www.valorpneu.pt](http://www.valorpneu.pt) – Página da Valorpneu - Sociedade de Gestão de Pneus, Lda.
- [21] [www.basel.int](http://www.basel.int) – Página da “Basel Convention” - *Synergies documentation.*
- [22] LAGARINHOS, Carlos - *Reciclagem de Pneus- Coleta e reciclagem de Pneus.* Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. 2004.
- [23] LUND, Herbert F.; - *The McGraw- Hill recycling handbook. New York, McGraw-Hill, 1993 ISBN-13: 978-0070391567*
- [24] FEECO INTERNATIONAL INC.; *Rotary Kiln Handbook.*
- [25] RIBEIRO, Leonardo Silva - Apontamentos da Unidade Curricular “Equipamento Térmico e Hidráulico” ISEP - Mestrado em Engenharia Mecânica- Ramo Energia. Ano letivo 2016/ 2017.
- [26] BABCOCK & WILCOX - “*Steam – Its generation and use*”- *Babcock & Wilcox CoMPany 38 th edition, 1972.*
- [27] *Fisher Controls Int. LLC. - Steam Turbines. Application Guide D3522 19X 012, August 2013.*

- [28] VILELA, Marcos Gonçalves- Aumento da eficiência de Aeroarrefecedores na Refinaria de Matosinhos. FEUP, Dissertação Fevereiro 2010.
- [29] AIR MOVEMENT AND CONTROL ASSOCIATION INTERNATIONAL, INC - *Laboratory Methods of Testing Fans for Aerodynamic Performance Rating. June 1999.*
- [30] AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE - Licença Ambiental concedida à Recauchutagem Nortenha
- [31] JUIN-I, Liu , RAJENDRA D. Paode , THOMAS, M. Holsen. *Modeling the Energy Content of Municipal Solid Waste Using Multiple Regression Analysis. Journal of the Air & Waste Management Association. 9 January 2012. ISSN: 1096-2247 (Print) 2162-2906 (Online)*
- [32] AINIE, Khuriati1; WAHYU, Setia Budi; MUHAMMAD, Nur; ISTADI, Istadi; GATO Suwoto; *Modelling of heating value of municipal solid waste based on ultimate analyses using multiple stepwise regression linear in Semarang. Diponegoro University, Semarang, Indonesia. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. VOL. 12, NO. 9, MAY 2017. ISSN 1819-6608*
- [33] Despacho n.º 17313/2008 - Poderes Caloríficos Inferiores e Fatores de Emissão para Combustíveis. Diário da República, 2.ª série — N.º 122 — 26 de junho de 2008.
- [34] EUROPEAN COMMISSION - *Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration.*
- [35] PILÃO, Rosa – Apontamentos da Unidade Curricular “Sistemas de Conversão de Energia”, ISEP - Mestrado em Energias Sustentáveis. Ano letivo 2013/ 2014.
- [36] Decreto Lei 23/ 2010.
- [37] International Association for the Properties of Water and Steam. - *Dew Point for Flue Gas of Power-Plant Exhaust. Certified Research Need – ICRN 23, September 2008.*
- [38] SPIRAX – SARCO LTD. – *Heat Pipe Heat Exchanger - An energy recovery solution. SB-P211-02 CH Issue 1, 2014*

- 
- [39] UK DEPARTMENT OF ENVIRONMENT, TRANSPORT AND REGIONS - *Steam Distribution Costs. Best Practice Programmes, Volume 67 Energy consumption guide*. DETR, 1997.
- [40] [www.sacome.com](http://www.sacome.com) – Página da SACOME. *Engineering, Design and Manufacturing of Tubular Heat Exchangers, Metal Expansion Joints, Process Plants and Pressure Vessels*
- [41] EUROPEAN COMMISSION - *Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiencies. February 2009.*
- [42] SPIRAX – SARCO LTD. – *Thermocompressor, High-efficiency energy savings solution. STR1041, 2017.*

## 9. ANEXOS

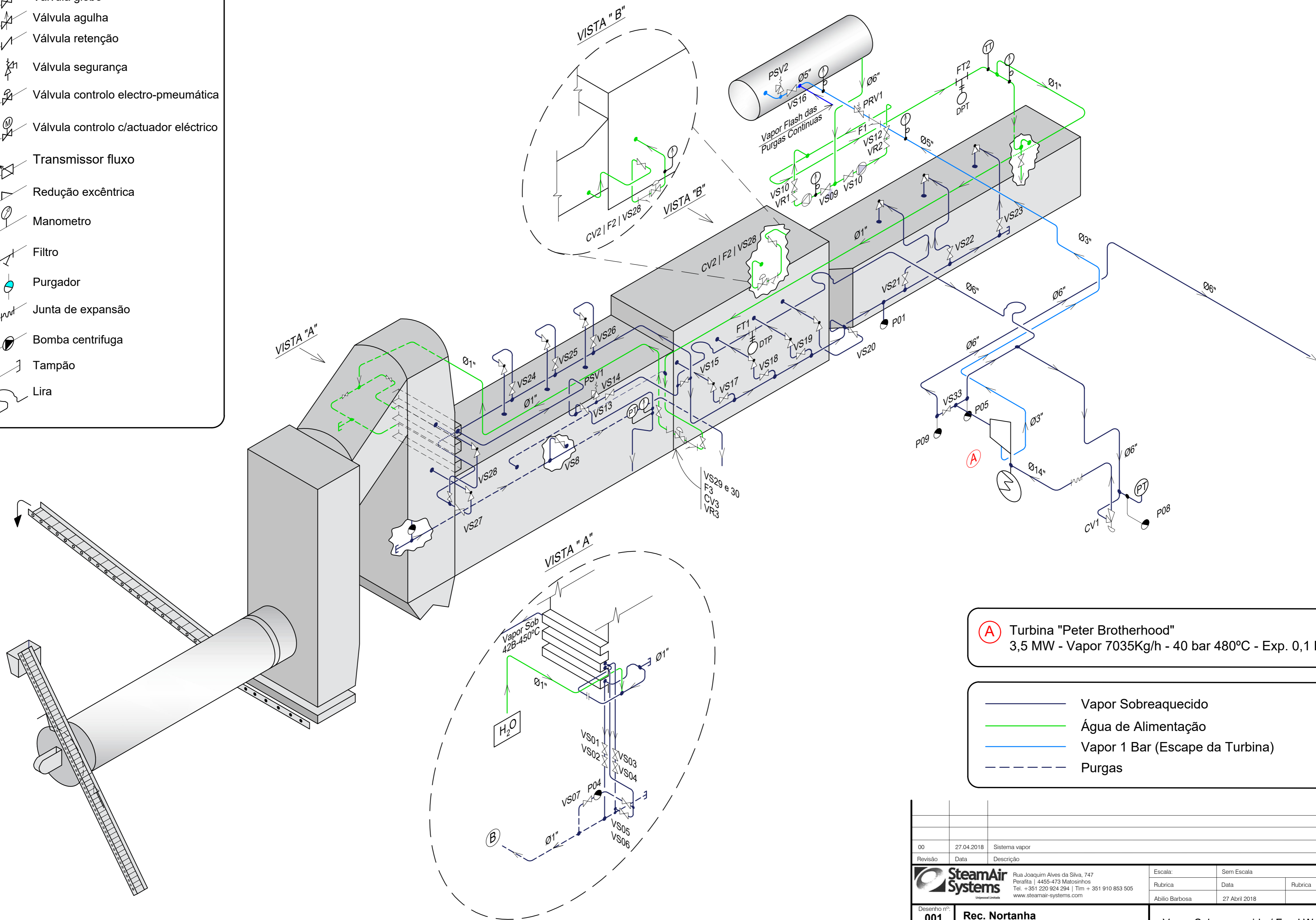


## 9. ANEXOS

- Desenho isométrico da Instalação de vapor sobreaquecido e água de alimentação;
- Desenho isométrico da Instalação de vapor saturado 4 MPa;
- Desenho isométrico da Instalação de vapor saturado 0,9 MPa e água de arrefecimento;
- Mapa de medições;
- Mapa de VLE.

# SIMBOLOGIA

- Direção do fluxo
- Válvula globo
- Válvula agulha
- Válvula retenção
- Válvula segurança
- Válvula controlo electro-pneumática
- Válvula controlo c/actuador eléctrico
- Transmissor fluxo
- Redução excêntrica
- Manómetro
- Filtro
- Purgador
- Junta de expansão
- Bomba centrífuga
- Tampão
- Lira




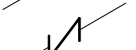






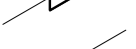



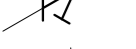



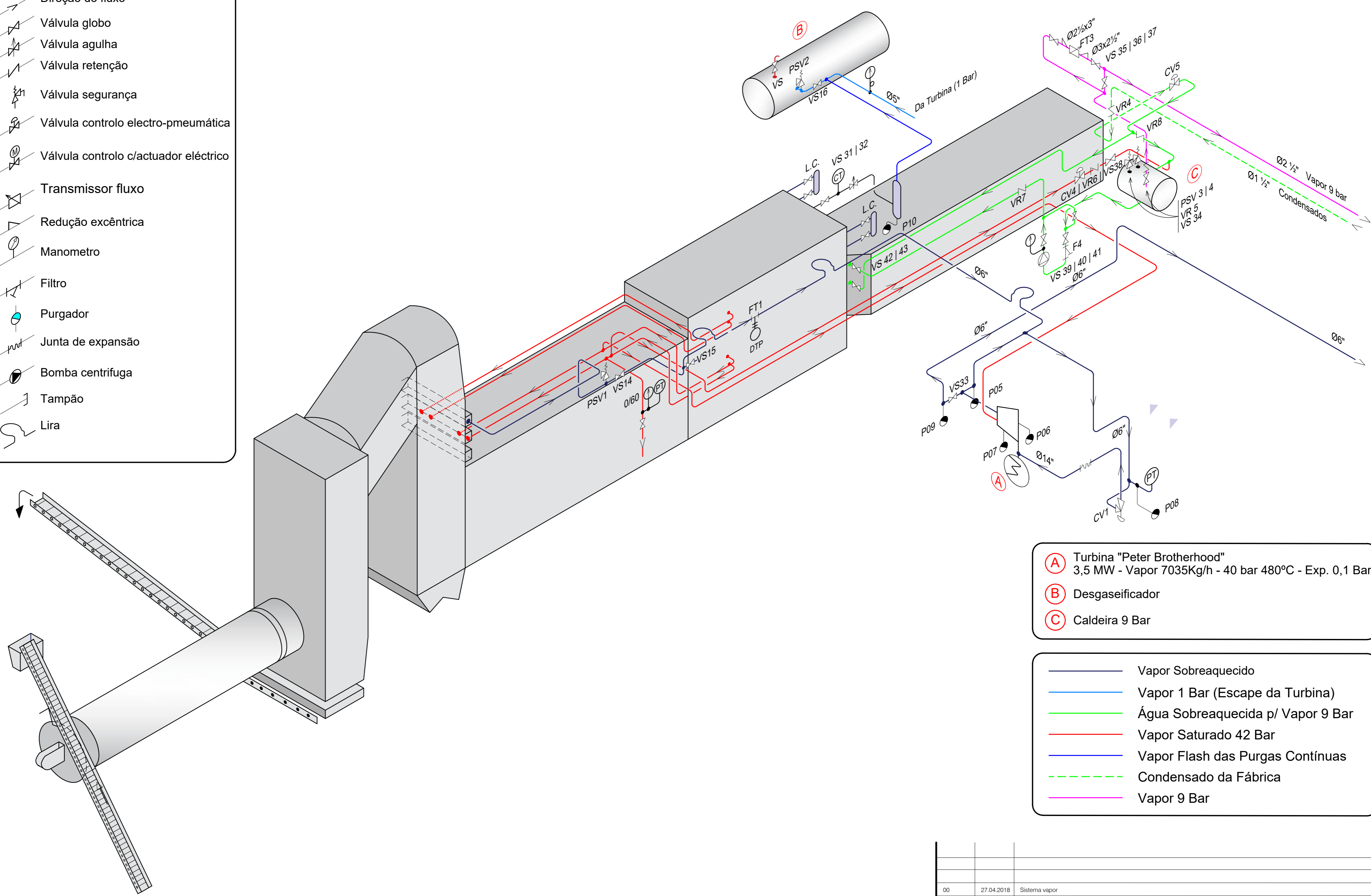
**(A)** Turbina "Peter Brotherhood"  
 3,5 MW - Vapor 7035Kg/h - 40 bar 480°C - Exp. 0,1 Bar

— Vapor Sobreaquecido  
 — Água de Alimentação  
 — Vapor 1 Bar (Escape da Turbina)  
 - - - Purgas








00	27.04.2018	Sistema vapor	Revisão	Data	Descrição
		Rua Joaquim Alves da Silva, 747 Perafita   4455-473 Matosinhos Tel. +351 220 924 294   Tlm + 351 910 853 505 www.steamair-systems.com	Escala: Sem Escala Rubrica: Data Rubrica Abílio Barbosa 27 Abril 2018		
Desenho nº: <b>001</b> Revisão: <b>0</b>	<b>Rec. Nortanha</b> Rede de Vapor	Vapor Sobreaquecido / Feed Water			


# SIMBOLOGIA

-  Direção do fluxo
-  Válvula globo
-  Válvula agulha
-  Válvula retenção
-  Válvula segurança
-  Válvula controlo electro-pneumática
-  Válvula controlo c/actuador eléctrico
-  Transmissor fluxo
-  Redução excêntrica
-  Manómetro
-  Filtro
-  Purgador
-  Junta de expansão
-  Bomba centrífuga
-  Tampão
-  Lira



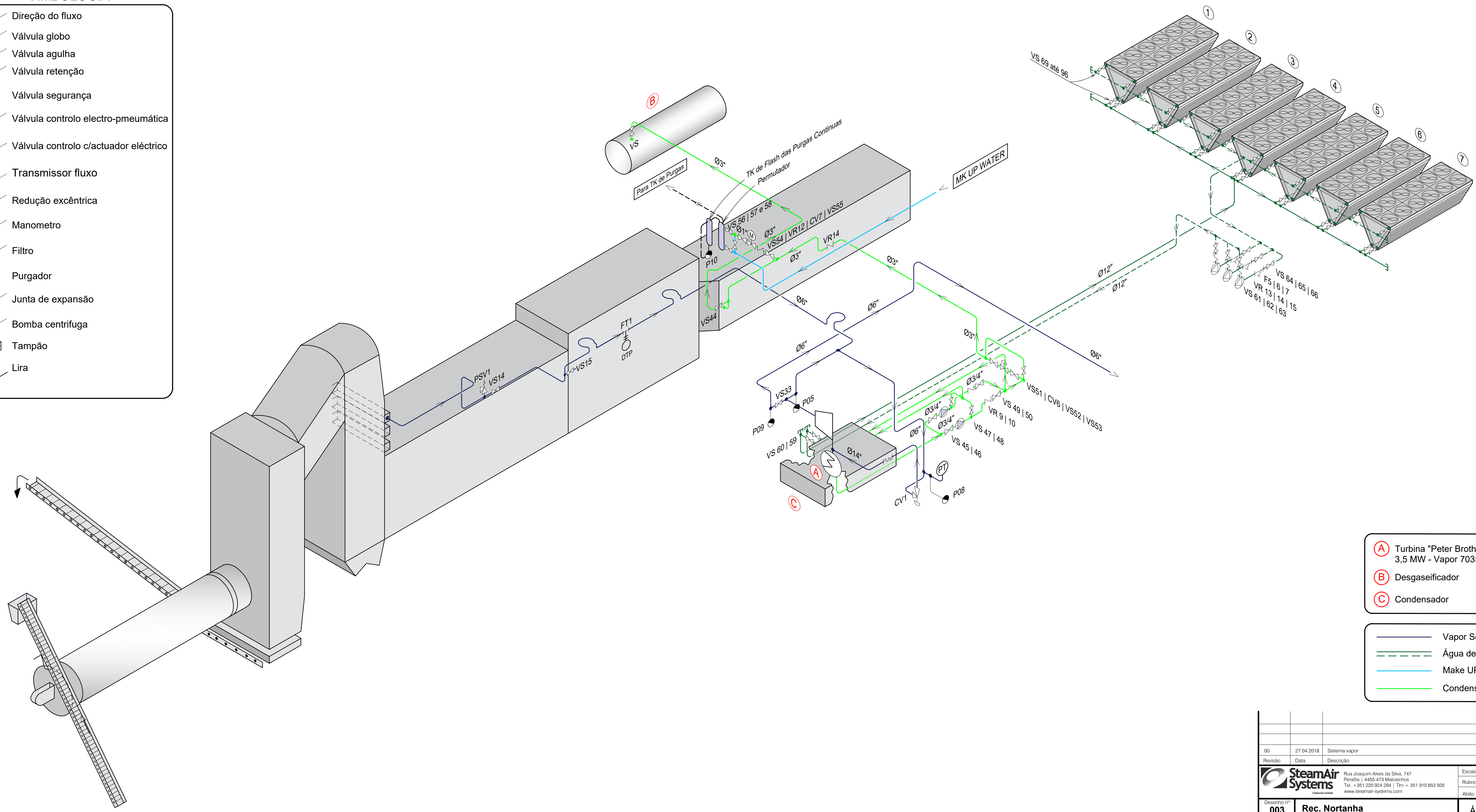
- (A)** Turbina "Peter Brotherhood"  
3,5 MW - Vapor 7035Kg/h - 40 bar 480°C - Exp. 0,1 Bar
- (B)** Desgaseificador
- (C)** Caldeira 9 Bar

-  Vapor Sobreaquecido
-  Vapor 1 Bar (Escape da Turbina)
-  Água Sobreaquecida p/ Vapor 9 Bar
-  Vapor Saturado 42 Bar
-  Vapor Flash das Purgas Contínuas
-  Condensado da Fábrica
-  Vapor 9 Bar

00	27.04.2018	Sistema vapor		
Revisão	Data	Descrição		
		Rua Joaquim Alves da Silva, 747 Perafita   4455-473 Matosinhos Tel. +351 220 924 294   Tlm + 351 910 853 505 www.steamair-systems.com		Escala: Sem Escala Rubrica: Data: Rubrica:
		Desenho nº: <b>002</b> Revisão: <b>0</b>	<b>Rec. Nortanha</b> Rede de Vapor	Vapor Saturado 42 Bar e Sistema Vapor 9 Bar
		Abílio Barbosa	27 Abril 2018	

# SIMBOLOGIA

- Direção do fluxo
- Válvula globo
- Válvula agulha
- Válvula retenção
- Válvula segurança
- Válvula controlo electro-pneumática
- Válvula controlo c/actuador eléctrico
- Transmissor fluxo
- Redução excêntrica
- Manómetro
- Filtro
- Purgador
- Junta de expansão
- Bomba centrífuga
- Tampão
- Lira



- (A)** Turbina "Peter Brotherhood"  
3,5 MW - Vapor 7035Kg/h - 40 bar 480°C - Exp. 0,1 Bar
- (B)** Desgaseificador
- (C)** Condensador

- Vapor Sobreaquecido
- Água de Arrefecimento
- Make UP Water
- Condensados da Turbina

00	27.04.2018	Sistema vapor			
Revisão	Data	Descrição	Escala:	Sem Escala	
			Rubrica	Data	Rubrica
			Abílio Barbosa	27 Abril 2018	
Desenho nº: <b>003</b>	Rec. Nortanha Rede de Vapor		Água de Arrefecimento e Condensados		
Revisão: <b>0</b>					

Rua Joaquim Alves da Silva, 747  
 Parafita | 4455-473 Matosinhos  
 Tel. +351 220 924 294 | Tlm. + 351 910 853 505  
 www.steamair-systems.com





INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
mar/14	16:30	1087	1218	6,76	9,35	1,175	1,640	163	34
mar/15	08:00	1101	1203	6,73	8,67	1,171	1,504	166	34
142,6413	142,4425	1168	1020	7,09	8,87	1,240	1,543	156	34
9985933	998590	1020	24	8,87	4,46	1,543	0,554	126	34
18749058	18753590	31	45	7,09	0,60	1,240	0,110	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		31	45	7,09	0,60	1,240	0,110	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		31	45	7,09	0,60	1,240	0,110	156	34

CONTADOR	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
VAPOR	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
	310176	310393	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
	310176	310393	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADORES	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
DE ENERGIA	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
142,6413	142,4425	8012	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
9985933	998590	9055	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
18749058	18753590	4632	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		4632	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		4632	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADOR	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
VAPOR	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
	310393	310562	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
	310393	310562	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADORES	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
DE ENERGIA	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
142,6413	142,4425	8380	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
9985933	998590	6473	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
18749058	18753590	4796	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		4796	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		4796	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADOR	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
VAPOR	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
	310562	310884	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
	310562	310884	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADORES	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
DE ENERGIA	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
142,6413	142,4425	6958	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
9985933	998590	3586	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
18749058	18753590	5478	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		5478	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		5478	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADOR	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
VAPOR	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
	310884	311044	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
	310884	311044	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADORES	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
DE ENERGIA	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
142,6413	142,4425	7389	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
9985933	998590	3000	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
18749058	18753590	8918	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		8918	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		8918	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADOR	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
VAPOR	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
	311044	311204	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
	311044	311204	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADORES	INICIO	FIM	TEMPERATURA GASES (°C)		CAUDAL DE VAPOR (Ton/h)		POTÊNCIA GERADA (Mw)		VENTILADOR / FILTRO	
DE ENERGIA	Mês/dia	hora	MÉDIA	MÁXIMA	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIA	MÁXIMA	Temp média(°C)	Frequência(Hz)
142,6413	142,4425	19307	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
9985933	998590	3000	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
18749058	18753590	2261,82	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		2261,82	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		2261,82	1088	1175	7,64	8,98	1,318	1,554	156	34

CONTADOR VAPOR	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	VAPOR FORNECIDO	Equiv.Eletr (kwh)
	311044	311098	5400 Kg	1152

CONTADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	CAUDAL DE VAPOR(Ton/h)	POTÊNCIA GERADA (Mw)
	Mês/dia hora	hora	MÉDIO	MÉDIA
	mar/17 21:00	mar/18 10:30	MÁXIMO	MÁXIMA
			MÍNIMO	MÍNIMA
			DES. PADRÃO	DES. PADRÃO
	14256807	14268472	6665 kwh	7,87
	998933	9989219	286 kwh	9,31
	18777822	18782312	9490 kwh	13,5
	ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		QUANTIDADES PROCESSADAS (kg)	
			RESÍDUOS	% escórias
			ESCORIAS	% aço
			ACO	% escórias+aço
			29400	4
			9700	33
			1040	2177,78
				1,788

CONTADOR VAPOR	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	VAPOR FORNECIDO	Equiv.Eletr (kwh)
	311098	311098	0 Kg	0

CONTADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	CAUDAL DE VAPOR(Ton/h)	POTÊNCIA GERADA (Mw)
	Mês/dia hora	hora	MÉDIO	MÉDIA
	mar/18 10:30	mar/19 01:30	MÁXIMO	MÁXIMA
			MÍNIMO	MÍNIMA
			DES. PADRÃO	DES. PADRÃO
	14263472	14271566	8094 kwh	7,54
	9989219	9989533	314 kwh	8,91
	18787312	18788896	11584 kwh	4,58
	ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		QUANTIDADES PROCESSADAS (kg)	
			RESÍDUOS	% escórias
			ESCORIAS	% aço
			ACO	% escórias+aço
			28500	1
			9280	33
			200	1900,00
				1,426

CONTADOR VAPOR	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	VAPOR FORNECIDO	Equiv.Eletr (kwh)
	311098	311098	0 Kg	0

CONTADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	CAUDAL DE VAPOR(Ton/h)	POTÊNCIA GERADA (Mw)
	Mês/dia hora	hora	MÉDIO	MÉDIA
	mar/19 01:30	mar/19 15:10	MÁXIMO	MÁXIMA
			MÍNIMO	MÍNIMA
			DES. PADRÃO	DES. PADRÃO
	14271566	14278818	7252 kwh	7,33
	9989533	9993369	3836 kwh	10,72
	18798896	18805056	6160 kwh	4,96
	ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		QUANTIDADES PROCESSADAS (kg)	
			RESÍDUOS	% escórias
			ESCORIAS	% aço
			ACO	% escórias+aço
			30100	7
			9960	33
			2100	2203,51
				1,488

CONTADOR VAPOR	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	VAPOR FORNECIDO	Equiv.Eletr (kwh)
	311098	311238	14000 Kg	2987

CONTADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	CAUDAL DE VAPOR(Ton/h)	POTÊNCIA GERADA (Mw)
	Mês/dia hora	hora	MÉDIO	MÉDIA
	mar/19 15:10	mar/20 08:20	MÁXIMO	MÁXIMA
			MÍNIMO	MÍNIMA
			DES. PADRÃO	DES. PADRÃO
	14278818	14285413	6595 kwh	7,27
	9993369	9997980	4011 kwh	9,10
	18805056	18810028	4972 kwh	4,97
	ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA		QUANTIDADES PROCESSADAS (kg)	
			RESÍDUOS	% escórias
			ESCORIAS	% aço
			ACO	% escórias+aço
			29300	3
			1000	33
			9580	2409,54
				1,543

CONTADOR VAPOR	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	VAPOR FORNECIDO	Equiv.Eletr (kwh)
	311238	311398	16000 Kg	3413

CONTADOR VAPOR	INICIO ABASTECIMENTO	FIM ABASTECIMENTO	CAUDAL DE VAPOR(Ton/h)	POTÊNCIA GERADA (Mw)
			MÉDIO	MÉDIA
			MÁXIMO	MÁXIMA
			MÍNIMO	MÍNIMA
			DES. PADRÃO	DES. PADRÃO
			7,45	1,288

FILTRO 1	Temp média(°C)	166	VENTILADOR / FILTRO
	Frequência(Hz)	34	CAUDAL DE GASES (Nm3/h)
FILTRO 2	Temp média(°C)	133	
	Frequência(Hz)	34	

FILTRO 1	Temp média(°C)	170	VENTILADOR / FILTRO
	Frequência(Hz)	34	CAUDAL DE GASES (Nm3/h)
FILTRO 2	Temp média(°C)	136	
	Frequência(Hz)	34	

FILTRO 1	Temp média(°C)	156	VENTILADOR / FILTRO
	Frequência(Hz)	34	CAUDAL DE GASES (Nm3/h)
FILTRO 2	Temp média(°C)	124	
	Frequência(Hz)	34	

FILTRO 1	Temp média(°C)	138	VENTILADOR / FILTRO
	Frequência(Hz)	34	CAUDAL DE GASES (Nm3/h)
FILTRO 2	Temp média(°C)	109	
	Frequência(Hz)	34	

FILTRO 1	Temp média(°C)	138	VENTILADOR / FILTRO
	Frequência(Hz)	34	CAUDAL DE GASES (Nm3/h)
FILTRO 2	Temp média(°C)	109	
	Frequência(Hz)	34	

CONTADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	Mês/dia	hora	dia	hora	Nº horas	MÁXIMA	MÍNIMA	DES. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO	DES. PADRÃO	MÁXIMA	MÍNIMA	DES. PADRÃO
	14285413	03:20	14292275	16:10	12,83									
FÁBRICA VENDA	9997380	10002660	10002660		5280	QUANTIDADES PROCESSADAS (kg)		24	%	%	%	%	%	%
	18810028	18814460	18814460	4432	432	RESÍDUOS	ESCORIAS							
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA														
29700														
10540														
1480														
35														
5														
2314,88														
1,441														

CONTADOR INICIO ABASTECIMENTO 311398 FIM ABASTECIMENTO 311587 VAPOR FORNECIDO 38900 kg Equiv. Elet. (kwh) 4032

CONTADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	Mês/dia	hora	dia	hora	Nº horas	MÉDIA	MÁXIMA	MÍNIMA	DES. PADRÃO	MÉDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	DES. PADRÃO	MÉDIA	MÁXIMA	MÍNIMA	DES. PADRÃO
	14282775	16:10	14299390	05:15	13,08												
FÁBRICA VENDA	10002660	10006690	10006690		7115	QUANTIDADES PROCESSADAS (kg)		27	%	%	%	%	%	%			
	18814460	18819478	18819478	5018	5018	RESÍDUOS	ESCORIAS								ACO	escorias	aco
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA																	
31400																	
11120																	
900																	
35																	
3																	
2400,61																	
1,547																	

CONTADOR INICIO ABASTECIMENTO 311587 FIM ABASTECIMENTO 311781 VAPOR FORNECIDO 19400 kg Equiv. Elet. (kwh) 4139

CONTADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	Mês/dia	hora	dia	hora	Nº horas	MÉDIA	MÁXIMA	MÍNIMA	DES. PADRÃO	MÉDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	DES. PADRÃO	MÉDIA	MÁXIMA	MÍNIMA	DES. PADRÃO
	14299390	05:15	14307223	20:30	15,25												
FÁBRICA VENDA	10006690	10012890	10012890		6200	QUANTIDADES PROCESSADAS (kg)		16	%	%	%	%	%	%			
	18819478	18824054	18824054	4576	4576	RESÍDUOS	ESCORIAS								ACO	escorias	aco
ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA																	
30580																	
11500																	
900																	
38																	
3																	
2005,25																	
1,306																	

CONTADOR INICIO ABASTECIMENTO 311781 FIM ABASTECIMENTO 312006 VAPOR FORNECIDO 22500 kg Equiv. Elet. (kwh) 4800

FILTRO 1 122 34  
FILTRO 2 98 34

Temp média(°C) 164 131  
FILTRO 1 164 131  
FILTRO 2 131 34

VENTILADOR / FILTRO Frequência(Hz) CAUDAL DE GASES (Nm3/h)

Temp média(°C) 166 132  
FILTRO 1 166 132  
FILTRO 2 132 34

VENTILADOR / FILTRO Frequência(Hz) CAUDAL DE GASES (Nm3/h)

## Resultados do autocontrolo das emissões para a atmosfera

Dados relativos aos meses de:	OUT	NOV	DEZ				
Ano de:	2017						
e aos poluentes atmosféricos:	CO	NOx	COT	Partículas	HCl	HF	SO2
Designação da Empresa:	Recachutagem Nortenha, S.A.						
Unidade de Valorização Energética de Pneu:							
Fonte de poluentes para a atmosfera:	1 Fonte - Unidade de Valorização Energética de Pneu						

### A - Apresentação dos dados

	CO			NOx			COT			Partículas			HCl			HF			SO2			
	100	50	mg/Nm3	400	200	mg/Nm3	10	20	mg/Nm3	30	10	mg/Nm3	60	10	mg/Nm3	4	1	mg/Nm3	200	50	mg/Nm3	
VLE Semi-Horário/Diário:																						
Unidade de medida :																						

### Cálculos baseados nos valores relativos aos valores médios diários

Número de valores	21	13	15	21	13	15	21	13	15	21	13	15	21	13	15	21	13	15	21	13	15	21	13	15
Valor máximo	24,9	23	30	89,5	94	96	4,2	0,8	2	3,0	4	5	4,1	5	4	0,3	0	0	0,3	0	0	28,7	28	23
Número de valores >= 80% da norma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(*) Número de valores >= norma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(*) Percentil 97 (Acumulado)			35,9			96,0			4,9						5,8									30,3

### Cálculos baseados nos valores relativos aos períodos de integração base

Número de valores	1082	826	819	1082	826	819	1082	826	819	1082	826	819	1082	826	819	1082	826	819	1082	826	819	1082	826	819	
Valor médio	16,3	14	20	54,7	73	56	3,0	0,6	2	3,0	4	5	2,7	3	3	0,3	0	0	0,3	0	0	17,6	16	17	
Valor máximo	57,3	67	63	109,5	132	122	6,9	8,4	10	7	9	7	6,8	7	7	0,8	0	0	0,8	0	0	39,4	40	39	
Número de valores >= norma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Percentil 97 (Acumulado)			44,5			102,4			6,0						6,5									0,6	36,7

(\*) Número de dias em que se verifica a exclusão de mais do que cinco valores médios a intervalos de 30 minutos (mau funcionamento ou manutenção do sistema de medição em contínuo)

### Especificamente para CO (cálculos baseados nos valores relativos aos períodos de integração de 10 min.)

(*) Número de valores	3248	2478	2449
(*) Valor máximo	71,9	74	75
(*) Percentil 95 (Acumulado)	50,6	49,8	49

### Especificamente para CO (em nº de dias):

Percentil 95 de valores de 10 min > 150 mg/m3N	0	0	0
Máximo semi-horário > 100 mg/m3N	0	0	0
Condições anteriores simultâneas	0	0	0

### Especificamente para temperatura:

Valores 10 min < temp. mínima admissível	0	0	0
(*) Número de valores	3248	2478	2449
(*) Valor mínimo	869	870	871
(*) Valor médio	998	1000	990
(*) Valor médio dos valores inferiores a 850°C	0	0	0

**B - Dados relativos ao funcionamento da unidade industrial**  
**(ATENÇÃO: Formato da data - d/mmhh hh:mm Exemplo: 25/Dec 12:00 )**

Número de horas de funcionamento efectivo da fonte :

Número de dias de funcionamento efectivo da fonte (2):

**Observações :**

(ver os registos de Processo Parado em anexo)

Os períodos correspondentes a situações explicitadas nos pontos 26. e 27. do Projecto de Nota Técnica estão, quando aplicável, incluídos nos períodos reportados nos mapas resumo do autocontrolo das emissões como "interrupção da alimentação de resíduos" e/ou "paragem da instalação".