

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO



DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO E REENGENHARIA
DO PROCESSO DE SECAGEM NA FÁBRICA DE
REVESTIMENTOS

Ana Cristina Dantas Évora

Novembro de 2010

Orientadores: Doutor Christopher Sá e Engenheiro Belmiro Crispim.

Co-orientador: Doutor Crispim Ribeiro.

Diagnóstico Energético e Reengenharia do Processo de Secagem na Fábrica de Revestimentos

ANA CRISTINA DANTAS ÉVORA

NOVEMBRO DE 2010

Orientador: Doutor Christopher Sá e Engenheiro Belmiro Crispim.

Co-orientador: Doutor Crispim Ribeiro.

Agradecimentos

Na realização deste trabalho tive o apoio de pessoas, às quais gostaria de agradecer, pois sem elas era impossível realiza-lo.

Agradeço:

Ao Engenheiro Belmiro Crispim, pelo apoio e orientação na Monteiro Ribas – Revestimentos;

Ao Doutor Christopher Sá pela orientação no ISEP, e no esclarecimento de todas as dúvidas;

A todos os funcionários da Monteiro Ribas – Revestimentos que me ajudaram na integração e forneceram algumas informações importantes;

Ao Engenheiro Carlos Neto, pela sua disponibilidade e pelo apoio que me deu;

Ao Engenheiro Luís Braga que forneceu um equipamento importante à realização deste trabalho;

À Doutora Paula Neto, pela sua ajuda e disponibilidade;

À minha colega Joana Fernandes que esteve sempre comigo e me ajudou;

Ao Doutor Crispim pela excelente orientação, por me ter ajudado a ultrapassar todas as dificuldades no percurso deste trabalho.

Ao Engenheiro Ricardo Ribeiro, pelo fornecimento de informações importantes;

E não menos importante, gostaria de agradecer aos meus pais e irmãs pelo apoio e carinho que sempre me deram, em especial à minha irmã Andreia.

Por fim gostaria de agradecer à pessoa que sempre esteve ao meu lado, me apoiou e acreditou que era possível a realização deste trabalho, o meu namorado, Ricardo.

Resumo

Este trabalho surgiu no âmbito da Tese de Mestrado em Engenharia Química - Ramo Optimização Energética na Indústria Química, aliando a necessidade da Empresa Monteiro Ribas – Indústrias, S.A. em resolver alguns problemas relacionados com as estufas da unidade J da fábrica de revestimentos. Outro dos objectivos era propor melhorias de eficiência energética neste sector da empresa. Para tal, foi necessário fazer um levantamento energético de toda a unidade, o que permitiu verificar que as estufas de secagem (Recobrimento 1 e 2) seriam o principal objecto de estudo.

O levantamento energético da empresa permitiu conhecer o seu consumo anual de energia de 697,9 tep, o que a classifica, segundo o Decreto-lei nº 71 de 15 de Abril de 2008, como Consumidora Intensiva de Energia (CIE).

Além disso, as situações que devem ser alvo de melhoria são: a rede de termofluido, que apresenta válvulas sem isolamento, o sistema de iluminação, que não é o mais eficiente e a rede de distribuição de ar comprimido, que não tem a estrutura mais adequada. Desta forma sugere-se que a rede de distribuição de termofluido passe a ter válvulas isoladas com lã de rocha, o investimento total é de 2.481,56 €, mas a poupança pode ser de 21.145,14 €/ano, com o período de retorno de 0,12 anos. No sistema de iluminação propõe-se a substituição dos balastros normais por electrónicos, o investimento total é de 13.873,74 €, mas a poupança é de 2.620,26 €/ano, com período de retorno de 5 anos.

No processo de secagem das linhas de recobrimento mediram-se temperaturas de todos os seus componentes, velocidades de ar o que permitiu conhecer a distribuição do calor fornecido pelo termofluido. No Recobrimento 1, o ar recebe entre 39 a 51% do calor total, a tela recebe cerca de 25% e na terceira estufa este é apenas de 6%. Nesta linha as perdas de calor por radiação oscilam entre 6 e 11% enquanto as perdas por convecção representam cerca de 17 a 44%. Como o calor que a tela recebe é muito inferior ao calor recebido pelo ar no Recobrimento 1, propõe-se uma redução do caudal de ar que entra na estufa, o que conduzirá certamente à poupança de energia térmica. No Recobrimento 2 o calor fornecido ao ar representa cerca de 51 a 77% do calor total e o cedido à tela oscila entre 2 e 3%. As perdas de calor por convecção oscilam entre 12 e 26%, enquanto que as perdas por radiação têm valores entre 4 e 8%. No que diz respeito ao calor necessário para evaporar os solventes este oscila entre os 4 e 13%.

Os balanços de massa e energia realizados ao processo de secagem permitiram ainda determinar o rendimento das 3 estufas do Recobrimento 1, com 36, 47 e 24% paras as

estufa 1, 2 e 3, respectivamente. No Recobrimento 2 os valores de rendimento foram superiores, tendo-se obtido valores próximos dos 41, 81 e 88%, para as estufas 1, 2 e 3, respectivamente.

Face aos resultados obtidos propõem-se a reengenharia do processo introduzindo permutadores compactos para aquecer o ar antes de este entrar nas estufas. O estudo desta alteração foi apenas realizado para a estufa 1 do Recobrimento 1, tendo-se obtido uma área de transferência de calor de $6,80 \text{ m}^2$, um investimento associado de 8.867,81 €. e uma poupança de 708,88 €/ano, com um período de retorno do investimento de 13 anos. Outra sugestão consiste na recirculação de parte do ar de saída (5%), que conduz à poupança de 158,02 €/ano. Estes valores, pouco significativos, não estimulam a adopção das referidas sugestões.

Palavras-chave: Monteiro Ribas - Indústrias, S.A., Eficiência energética, estufas de secagem, Policloreto de vinilo, Poliuretano

Abstract

This work appears in the scope of the Master in Chemical Engineering – Energy Optimization in Chemical Industry, allying the need of Monteiro Ribas – Indústrias, S.A, to solve some energy problems in the dryers of unit J - coatings factory. The first aim was to propose improvements in energy efficiency of that unit. For this, it was done an energetic survey in the entire unit, which showed that dryers from lines Coating 1 and 2 were the main subject of study.

During the energetic survey, it was possible to determine an annual energy consumption of 697,9 tep in the referred unit. So, by the Portuguese Decree-Law No. 71, from April 15th of 2008, the unit was considered an Intensive Energy Consumer (CIE).

Beyond that, some situations were also identified from the energetic survey that need improvement such as: thermofluid network has no insulation valves, lighting system and compressed air network distribution are unappropriated. Thus, it is suggested an insulation of valves with rock wool with a total investment of 2.481,56 € with savings to 21.145,14 €/year and payback period of 0.12 years. In the lighting system, the replacement of normal by electronic ballasts needs a total investment of 13.873,74 €/year, but gives a saving of 2.620,26 €/year and a pay-back of 5 years.

In the drying process and considering the line Coating 1, it was verified that heat from thermofluid is distributed as follows: air receives between 39 and 51%, PVC film receives 25% and the third dryer about 6% of total heat. Losses by radiation oscillate between 6 and 11% while by convection represent around 17 to 44%. The heat received by PVC film is much lower than the heat received by the air, and because of this it is proposed a reduction of air flow entering the dryer, which would allow savings in thermal energy certainly.

In line Coating 2, heat supplied to air represents around 51 to 77% of total heat supplied. The heat transferred to the PU film is between 2 and 3% and there are losses by convection, between 12 and 26%, and by radiation, between 4 and 8%. Finally heat required to evaporate solvents is between 4 and 13%. The heat transfer efficiencies obtained in line Coating 1 were 36, 47 and 24% to dryer 1, 2 and 3, respectively. For the line Coating 2 the efficiencies values were higher and close to 41, 81 and 88% to dryer 1, 2 and 3, respectively. Values are very low and show that theoretical global heat transfer coefficient is rather higher than the real, explaining an existence of a reasonable level of fouling.

Some studies were done to re-think the process of dryers, like implementation of compact heat exchangers to heat the entering air using the outlet air. The sizing was made for the first dryer of line Coating 1 and it was achieved an heat transfer area of 6,80 m², investment of 8.867,81€, energy savings of 708,88 €/year with a payback period of 13 years. Other suggestion consists in the recycling of some (5%) outlet air, which leads to savings of 158,02 €/year. These values, very low, do not stimulate the adoption of the related suggestions.

Key- words: Monteiro Ribas - Indústrias, Energy efficiency, Driers, Polyvinyl chloride, Polyurethane

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. A empresa	2
1.2. Estado tecnológico actual	5
1.2.1. Descrição do processo	5
1.2.2. Revestimentos.....	6
1.2.3. A energia na indústria de revestimentos.....	9
1.2.4. Indicadores energéticos na Monteiro Ribas, S.A.	9
1.2.5. Enquadramento Legislativo sobre a Gestão do Consumo Intensivo de Energia na Monteiro Ribas S.A.....	10
2. Levantamento Energético	13
2.1. Descrição do Processo.....	13
2.2. Energia utilizada	17
2.2.1. Energia térmica	18
2.2.2. Energia eléctrica.....	22
2.3. Dados da produção	26
2.4. Distribuição dos consumos.....	26
2.5. Indicadores energéticos.....	30
2.6. Recomendações e sugestões de melhoria	34
3. Reengenharia do processo de secagem.....	37
3.1. Medições efectuadas.....	37
3.2. Resultados obtidos a partir das medições	41
3.3. Avaliação da eficiência das estufas	45
3.4. Sugestões de melhoria	46
4. Conclusões	47
Bibliografia.....	51
Anexos	53
A. Levantamento energético - Tabelas.....	55

A.1. Energia térmica.....	55
A.3. Dados da produção.....	63
A.4. Distribuição dos consumos	64
A.5. Indicadores energéticos	65
B. Características técnicas dos equipamentos	67
B.1. Equipamentos auxiliares	67
B.2. Instrumentação de medida.....	71
C. Medições efectuadas	73
D. Resultados.....	81
E. Exemplo de cálculo.....	89
E.1. Energia térmica.....	89
E.2. Produção	96
E.3. Distribuição dos consumos	96
E.4. Cálculo dos indicadores energéticos.....	100
E.5. Recomendações e sugestões de melhoria.....	101
E.6. Reengenharia do processo de secagem	105
E.6.1. Dimensionamento do permutador de calor	124
E.6.2. Recirculação do ar.....	134
F. Propriedades físicas dos fluidos.....	137
G. Factores de conversão.....	141

Índice de figuras

Figura 1.1. Fachada do edifício central da empresa. (Monteiro Ribas – Indústrias, S.A., 2010)	2
Figura 1.2. Mapa com os destinos dos produtos exportados pela Monteiro Ribas – Indústrias, S.A. (Monteiro Ribas – Indústrias, S.A., 2010).....	3
Figura 1.3. Diagrama do processo produtivo.	5
Figura 1.4. Exemplo de revestimentos têxteis (Science Tech Entrepreneur,2009).....	6
Figura 2.1. Rede de distribuição de termofluido na fábrica de revestimentos.....	20
Figura 2.2. Imagens obtidas, com a câmara termográfica, na medição de temperaturas do termofluido no Recobrimento 1.	21
Figura 2.3. Imagens obtidas, com a câmara termográfica, na medição de temperaturas do termofluido no Recobrimento 2.	21
Figura 2.4. Perda de energia (kWh/ano) nas válvulas não isoladas dos vários sectores da fábrica de revestimentos.	22
Figura 2.5. Distribuição dos consumos de energia eléctrica.....	23
Figura 2.6. Consumo de energia eléctrica necessária aos equipamentos do sector J da fábrica de revestimentos.	23
Figura 2.7. Distribuição da energia (tep) utilizada na iluminação em cada sector da fábrica de revestimentos.	24
Figura 2.8. Rede de distribuição de ar comprimido da fábrica de revestimentos.....	25
Figura 2.9. Variação da produção de PVC e PU (m ²) e a energia consumida (tep) ao longo do ano de 2009.	26
Figura 2.10. Distribuição dos custos de energia em euros na fábrica de Revestimentos.	27
Figura 2.11. Distribuição dos gastos energéticos (tep) ao longo do ano de 2009 na fábrica de Revestimentos.	28
Figura 2.12. Variação do consumo específico (tep/m ²) e produção de PU (m ²) ao longo do ano.	32
Figura 2.13. Variação do consumo específico (tep/m ²) e produção de PVC (m ²) ao longo do ano.....	32
Figura 2.14. Variação dos consumos específicos anual e mensal para o PU.	33

Figura 2.15. Relação entre os consumos específicos anual e mensal para o PVC.	33
Figura 3.1. Primeira estufa do Recobrimento 1.	38
Figura 3.2. Segunda estufa do Recobrimento 1.	38
Figura 3.3. Terceira estufa do Recobrimento 1.	39
Figura 3.4. Primeira estufa do Recobrimento 2.	40
Figura 3.5. Segunda estufa do Recobrimento 2.	40
Figura 3.6. Terceira estufa do Recobrimento 2.	41
Figura 3.7. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na primeira estufa do Recobrimento 1.	41
Figura 3.8. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na segunda estufa do Recobrimento 1.	42
Figura 3.9. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na terceira estufa do Recobrimento 1.	42
Figura 3.10. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na primeira estufa do Recobrimento 2.	43
Figura 3.11. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na segunda estufa do Recobrimento 2.	44
Figura 3.12. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na terceira estufa do Recobrimento 2.	44
Figura E.1. Representação esquemática de uma válvula.	90
Figura E.2. Esquema representativo das estufas da fábrica de revestimentos.	106
Figura E.3. Diagrama de humidades.	111
Figura E.4. Variação do fluxo e calor de gelificação com a temperatura (°C). (Alves & Rodolfo, 2006)	113
Figura E.5. Eficiência de alhetas cilíndricas (Ozisik, M, 1985).	116
Figura E.6. Factor de correcção de temperaturas com correntes cruzadas e os dois fluidos não misturados. (Incropera & DeWitt, 2003)	117
Figura E.7. Transferência de calor para permutador de calor com tubo circular e alheta circular. (Incropera & DeWitt, 2003)	129

Figura E.8. Custo para permutadores de calor arrefecidos a ar. (Peters & Timmerhaus, 1991)	132
Figura E.9. Esquema representativo da recirculação do ar na estufa.	134
Figura F.1. Variação da condutividade térmica (kcal/mh ^o C) do termofluido com a temperatura (°C) (Monteiro Ribas – Indústrias SA.)	137
Figura F.2. Variação do calor específico (kcal/h kg) do termofluido com a temperatura (Monteiro Ribas – Indústrias SA.)	138
Figura F.3. Variação da viscosidade cinemática (Cst) do termofluido com a temperatura (°C) (Monteiro Ribas – Indústrias SA.)	139

Índice de tabelas

Tabela 2.1. Valores obtidos na análise dos gases de escape.	18
Tabela 2.2. Valores obtidos no cálculo do rendimento das caldeiras da fábrica de revestimentos.	19
Tabela 2.3. Informações obtidas com a câmara termográfica na medição de temperaturas do termofluido no Recobrimento 1.	21
Tabela 2.4. Informações obtidas com a câmara termográfica na medição de temperaturas do termofluido no Recobrimento 2.	22
Tabela 2.5. Consumos de energia, custos e gases com efeito de estufa (GEE) na fábrica de revestimentos no ano de 2009.	27
Tabela 2.6. Consumos mensais de gás natural e respectivas emissões de gases com efeito de estufa (GEE), na fábrica de revestimentos no ano de 2009.	29
Tabela 2.7. Consumos mensais de água quente e respectivas emissões de gases com efeito de estufa (GEE), na fábrica de revestimentos no ano de 2009.	29
Tabela 2.8. Consumos mensais, custos e respectivas emissões de gases com efeito de estufa (GEE), de energia eléctrica na fábrica de revestimentos no ano de 2009. ...	30
Tabela 2.9. Valores de Intensidade carbónica (IC) ao longo do ano de 2009.	31
Tabela 2.10. Valores de investimento, poupança de energia e período pay-back relativos à implementação de isolamento.	35
Tabela 2.11. Valores de investimento, poupança de energia e período pay-back relativos à implementação de balastros electrónicos.	35
Tabela 3.1. Valores do coeficiente global de transferência de calor real e teórico, rendimento e resistência de sujamento calculados para o Recobrimento 1 e Recobrimento 2.	45
Tabela 3.2. Resultados obtidos no dimensionamento do permutador compacto.	46
Tabela A.1. Resultados calculados para as perdas de calor nas válvulas não isoladas dos colectores da caldeira e Recobrimento 1.	55
Tabela A.2. Resultados calculados para as perdas de calor nas válvulas não isoladas do Recobrimento 2 e Gravação 1.	56
Tabela A.3. Resultados calculados para as perdas de calor nas válvulas não isoladas da Gravação 1 e 2, Estampagem 1,2 e 3, Lacagem e Máquina Piloto.	57

Tabela A.4. Equipamentos existentes na cozinha das pastas de PU e PVC e respectivas características (tipo de accionamento, horas de funcionamento, potência nominal e energia anual consumida).	58
Tabela A.5. Equipamentos existentes no sector de recobrimento e respectivas características (tipo de accionamento, horas de funcionamento, potência nominal e energia anual consumida).....	59
Tabela A.6. Equipamentos existentes nos serviços auxiliares e respectivas características (tipo de accionamento, horas de funcionamento, potência nominal e energia anual consumida).....	59
Tabela A.7. Equipamentos existentes no sector de acabamento e controlo final e respectivas características (tipo de accionamento, horas de funcionamento, potência nominal e energia anual consumida).	60
Tabela A.8. Características da instalação da iluminação.	61
Tabela A.9. Características da instalação da iluminação.	62
Tabela A.10. Produção da fábrica de revestimentos no ano de 2009.	63
Tabela A.11. Consumos de energia (gás natural, água quente e energia eléctrica), no ano de 2009.....	64
Tabela A.12. Repartição dos consumos e custos das diferentes formas de energia utilizadas no sector J.	64
Tabela A.13. Valores de consumo específico de energia (CEE) calculados para os artigos em PU e PVC, no ano de 2009.	65
Tabela B.1. Características técnicas das caldeiras existentes na fábrica de revestimentos.	67
Tabela B.2. Características técnicas do compressor existente na fábrica de revestimentos	67
Tabela B.3. Características das estufas do Recobrimento 1.	68
Tabela B.4. Características das estufas do Recobrimento 2.	68
Tabela B.5. Características dos dois permutadores da primeira estufa do Recobrimento 1.	69
Tabela B.6. Características dos permutadores da segunda estufa do Recobrimento 1 e da segunda estufa do Recobrimento 2.....	69

Tabela B.7. Características dos permutadores na terceira estufa do Recobrimento 1 e quarta estufa do Recobrimento 2.....	70
Tabela B.8. Características dos permutadores da primeira e terceira estufas do Recobrimento 2.	70
Tabela B.9. Características da câmara termográfica utilizada nas medições efectuadas no sector J da fábrica de revestimentos.....	71
Tabela C.1. Medição de temperatura na primeira estufa do Recobrimento 1.....	73
Tabela C.2. Medição de velocidade na primeira estufa do Recobrimento 1.	73
Tabela C.3. Medição de temperatura na segunda estufa do Recobrimento 1.	74
Tabela C.4. Medição de velocidade na segunda estufa do Recobrimento 1.	74
Tabela C.5. Medição de temperatura na terceira estufa do Recobrimento 1.....	75
Tabela C.6. Medição de velocidade na terceira estufa do Recobrimento 1.	76
Tabela C.7. Medição de temperatura na primeira estufa do Recobrimento 2.....	76
Tabela C.8 Medição de velocidade na primeira estufa do Recobrimento 2.	77
Tabela C.9. Medição de temperatura na segunda estufa do Recobrimento 2.	77
Tabela C.10. Medição de velocidade na segunda estufa do Recobrimento 2.	77
Tabela C.11. Medição de temperatura na terceira estufa do Recobrimento 2.....	78
Tabela C.12. Medição de velocidade na terceira estufa do Recobrimento 2.	79
Tabela D.1.Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.	81
Tabela D.2. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.	82
Tabela D.3. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.	83
Tabela D.4. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.	84
Tabela D.5. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.	85
Tabela D.6 Valores obtidos nos cálculos efectuados às três estufas do Recobrimento 1	86

Tabela D.7. Valores obtidos nos cálculos efectuados às três estufas do Recobrimento 1 (continuação).....	87
Tabela D.8 Valores obtidos nos cálculos efectuados às três estufas do Recobrimento 2.	87
Tabela D.9. Valores obtidos nos cálculos efectuados às três estufas do Recobrimento 2 (continuação).....	88
Tabela E.1. Dimensões de diferentes tipos de válvulas. (ZETKAMA - Válvulas Industriais).....	90
Tabela E.2. Composição do gás natural. (Penínsulagás).....	93
Tabela E.3. Preços do isolamento de válvulas. (Portugalisol, 2010)	104
Tabela E.4. Parâmetros a e m para tubos desalinhados e para diferentes intervalos do número de Reynolds.....	122
Tabela E.5. Condições estabelecidas para dimensionar o permutador de calor.	124
Tabela F.1. Propriedades físicas do ar à pressão atmosférica (Incropera, P., & DeWitt, 2003)	137
Tabela F.2. Propriedades físicas do tolueno. (Himmelblau, 1998)	140
Tabela F.3. Propriedades físicas do álcool isopropílico. (Himmelblau, 1998).....	140
Tabela G.1. Factores de conversão utilizados para o gás natural.	141
Tabela G.2. Factores de conversão utilizados para a água quente.....	141
Tabela G.3. Factores de conversão utilizados para a energia eléctrica.	141

Listas de abreviaturas, siglas, símbolos

Siglas

ADENE – Agência para a energia;

CEE – Consumo específico de energia;

CIE – Consumidoras intensivas de energia;

Dióctil ftalato – DOP;

EDP – Energias de Portugal;

GEE- Gases com efeito de estufa;

IC – Intensidade carbónica;

PU – poliuretano;

PVC – policloreto de vinilo;

tep - tonelada equivalente de petróleo;

Símbolos

A	Área	(m^2)
C	Carbono presente no combustível, nas condições de queima	(%)
CO_2	Dióxido de carbono presente nos gases de combustão	(%)
C_p	Calor específico	$(J/kg\ ^\circ C)$
D	Diâmetro	(m)
D_h	Diâmetro hidráulico	(m)
E_c	Energia cinética	(J)
E_p	Energia potencial	(J)
FC	Factor de Conversão	()
G	Velocidade mássica	$(kg/s\ m^2)$
g	Aceleração da gravidade	(m/s^2)
H	Hidrogénio no combustível nas condições de queima	(%)
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$(W/m^2\ ^\circ C)$

	Entalpia específica	(J/kg)
K	Constante que depende do combustível utilizado	()
k	Condutividade térmica	($W/m^2\text{°C}$)
L	Comprimento	(m)
M_i	Massa molecular do componente i	(g/mol)
m	Massa	(kg)
\dot{m}	Caudal mássico	(kg/s)
m_{H_2O}	Humidade em peso no combustível nas condições de queima	(%)
N	Número de passagens nos tubos	()
NP	Número de permutadores em cada estufa	()
NT	Número de tubos	()
n_a	Número de alhetas	()
P	Potência hora	(kWh)
P_{cf}	Perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo	(%)
PCI	Poder calorífico inferior do combustível	(kJ/kg)
P_{cv}	Perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes	(%)
P_{gc}	Perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustão	(%)
P_{H_2O}	Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão	(%)
Q	Calor	(W)
Q_v	Capacidade nominal da caldeira	(MW)
(R_i)	Resistência de sujamento	($\text{°C}/W$)
r_1	Raio externo do tubo sem alheta	(m)
r_2	Raio externo do tubo com alheta	(m)
T_a	Temperatura do ar de combustão à entrada da caldeira	(°C)
T_g	Temperatura dos gases de combustão à saída da caldeira	(°C)
T_{sup}	Temperatura da parede	(K)
T_∞	Temperatura ambiente	(K)
t	Espessura das alhetas	(m)

U	Coeficiente global de transferência de calor	$(W/m^2\text{°C})$
	Energia interna	(J)
V	Volume	(m^3)
\dot{V}	Caudal volumétrico	(m^3/s)
v	Velocidade	(m/s)
y_e	Humidade específica	$(g \text{ vapor } H_2O/g \text{ ar seco})$
y_i	Fracção molar do componente i no combustível	$()$
y_m	Humidade molar	$(mol \text{ vapor } H_2O/mol \text{ ar seco})$
y_r	Humidade relativa	$(\%)$
W	Trabalho	(W)

Números adimensionais

F	Factor da correcção média logaritmica das temperaturas	$()$
Gz	Número de Graetz	$()$
Nu	Número de Nusselt	$()$
Ra	Número de Rayleigh	$()$
Re	Número de Reynolds	$()$

Letras Gregas

α	Difusividade térmica	(m^2/s)
β	Coeficiente volumétrico de expansão térmica	(K^{-1})
ΔH_v	Calor latente de vaporização	(J/kg)
Δx	Espessura do tubo	(m)
ΔT_{lm}	Temperatura média logaritmica	(°C)
δ	Espaçamento entre tubos	(m)
ε	Emissividade	$()$
η	Rendimento	$()$
μ	Viscosidade	$(kg/s.m)$
ν	Viscosidade cinemática	(m^2/s)
ρ	Massa volúmica	(kg/m^3)

Capítulo 1

Introdução

A gestão dos recursos de energia é um dos principais desafios que a sociedade moderna enfrenta a nível mundial. A forma como utilizamos a energia de que dispomos é uma questão chave e, por isso, o aumento da eficiência energética das operações nas empresas é imprescindível para se atingirem os objectivos do novo modelo de desenvolvimento (Animar, 2010)

Novos regulamentos têm sido criados de forma a modificar e a reduzir o consumo de energia como os que entraram em vigor a 1 de Julho de 2007: RCCTE (Regulamento do Comportamento Características Térmicas dos Edifícios) e RSECE (Regulamento de Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios).

Neste contexto de melhoria energética combinado com a necessidade da Monteiro Ribas – Indústrias, S.A de resolver alguns problemas relacionados com as estufas da unidade J – fábrica de revestimentos, surge este trabalho no âmbito da minha Tese de Mestrado em Engenharia Química - ramo Optimização Energética na Indústria Química.

Este trabalho, com estágio na empresa, foi uma mais-valia para a minha formação, uma vez que tive a possibilidade de entrar em contacto com o mundo do trabalho, aplicando alguns dos conhecimentos adquiridos durante o curso.

Objectivos

Este trabalho teve como objectivo propor melhorias de eficiência energética na unidade J - fábrica de revestimentos da empresa Monteiro Ribas – Indústrias, S.A.. Para tal, foi necessário fazer um levantamento energético de toda a unidade, o que permitiu concluir que as estufas de secagem (Recobrimento 1 e 2) seriam o principal objecto de estudo.

Organização do trabalho

No capítulo 1 é apresentada a empresa Monteiro Ribas – Indústrias, S.A. e uma breve descrição do processo produtivo da unidade J do sector dos revestimentos. É também apresentado o estado tecnológico actual, em que se introduzem conceitos teóricos pesquisados, com o objectivo de servir de suporte ao desenvolvimento do trabalho e à melhoria da eficiência energética dos equipamentos. Refere-se ainda o

enquadramento Legislativo sobre a Gestão do Consumo Intensivo de Energia na Monteiro Ribas – Indústrias, S.A..

No capítulo 2 descreve-se o processo de produção de artigos de PVC e PU, identificam-se as formas de energia utilizadas e os dados de produção e, por fim, os consumos de energia na fábrica de revestimentos no ano de 2009. Neste capítulo são já apresentadas algumas propostas de melhoria da eficiência energética.

No capítulo 3 são apresentados as medições efectuadas e os resultados das propostas de melhoria de eficiência energética efectuadas às estufas do Recobrimento 1 e 2.

Por fim, no capítulo 4 são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como algumas propostas para trabalhos futuros.

1.1. A empresa

A empresa Monteiro, Ribas – Indústrias, S.A., teve origem em 1917 na antiga Fábrica Portuense de Curtumes dedicada à produção de solas de calçado. O nome Monteiro Ribas resultou de uma nova sociedade entre duas famílias – Monteiro e Ribas – as quais tinham ligação à indústria de curtumes. A sua sede encontra-se na Estrada da Circunvalação, nº. 9020, na cidade do Porto, Portugal. Nesta mesma localização situa-se, também, a Unidade Fabril de Produção da Monteiro, Ribas – Revestimentos, Lda.



Figura 1.1. Fachada do edifício central da empresa. (Monteiro Ribas – Indústrias, S.A., 2010)

Desde a década de 50 até 2005 a empresa foi líder, em Portugal, no sector dos curtumes. No início dos anos 60, a empresa tinha como principal propósito servir a indústria de calçado, mas ao longo desta década a empresa iniciou uma política de

Do ponto de vista energético a empresa em Junho de 1992 concluiu a instalação de um sistema de co-geração, um investimento de cerca de 3.000.000 € que trouxe significativas poupanças de energia. Nessa época os excedentes produzidos eram absorvidos pela EDP, contudo na actualidade esta entidade tem que comprar toda a energia produzida pela sua unidade de co-geração.

Actualmente a Monteiro Ribas – Indústrias, S.A. (MRR) tem em funcionamento as seguintes unidades de Produção:

Monteiro, Ribas – Embalagens flexíveis (ex-unidade P)

Criada em 1965, destina-se à produção de embalagens flexíveis, com impressão em rotogravura e complexagem de filmes para as indústrias alimentar e química. Emprega cerca de 110 trabalhadores. Exporta mais de 50% da sua produção.

CTB – Monteiro, Ribas – Componentes Técnicos em Borracha, Lda.

A sua actividade consiste na produção de componentes técnicos em borracha pelos processos de compressão, transferência e injeção, destinados aos sectores automóveis e electrodomésticos. Emprega cerca de 45 trabalhadores.

Monteiro, Ribas – Produção e Distribuição de Energia, Lda. - PDE

Tem como principal objectivo fornecer energia eléctrica e térmica às Unidades, colocando os excedentes da produção energética na rede eléctrica nacional. É constituída por 6 trabalhadores.

Unidade K – Monteiro, Ribas – Indústrias, S.A.

Produz placas de borracha para solas, destinadas à indústria do calçado e ao mercado de reparação de calçado. Emprega cerca de 40 trabalhadores.

MRR – Monteiro, Ribas - Revestimentos, Lda.

As instalações da MRR ocupam um espaço de cerca de 7.500 m², compostos por área de produção de produto, instalações de escritórios e laboratórios. A produção destina-se em cerca de 70% ao mercado de exportação, principalmente para a União Europeia. Neste sector, actualmente trabalham 72 pessoas. (Monteiro Ribas – Indústrias, S.A., 2010)

1.2. Estado tecnológico actual

Neste item são apresentados alguns conceitos pesquisados com o objectivo de servir de suporte ao desenvolvimento do trabalho bem como à melhoria da eficiência energética dos equipamentos.

1.2.1. Descrição do processo

Um diagrama genérico do processo produtivo no sector de revestimentos onde se produz artigos de napa a partir de PVC (policloreto de vinilo) e PU (poliuretano) é apresentado na Figura 1.3.

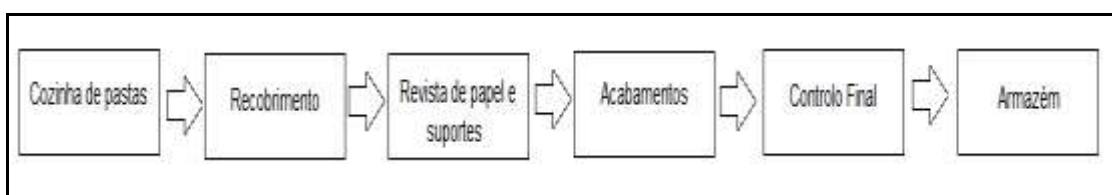


Figura 1.3. Diagrama do processo produtivo.

A produção de artigos com revestimentos em PVC e PU tem início na cozinha das pastas, onde são adicionados todos os componentes necessários para que os artigos tenham as características que o cliente pretende.

Depois de elaboradas as pastas, estas seguem para as linhas de Recobrimento (existem duas) e são colocadas sobre um papel de suporte antes de entrar na estufa para se efectuar a secagem. A colocação da pasta sobre o papel é repetida duas a três vezes dependendo da espessura do artigo que se pretende.

O papel pode ter a necessidade de ser substituído, pois após algumas passagens na máquina de recobrimento, pode apresentar alguns estragos como rasgos, emendas, sujidade ou riscos.

Em seguida os artigos vão para o acabamento que pode ser de diferentes tipos como lacagem, estampagem, gravação, esmerilagem e fulonagem dependendo das especificações dos clientes. Depois dos artigos terminados existe um controlo final, sendo estes encaminhados para o armazém onde permanecem até serem entregues ao cliente.

1.2.2. Revestimentos

Actualmente existe a necessidade de desenvolvimento de técnicas de revestimento que satisfaçam a exigência dos consumidores e ao mesmo tempo preservem o ambiente (Science Tech Entrepreneur,2009)

A indústria de revestimento de têxteis tem essa preocupação, oferecendo técnicas capazes de melhorar e modificar as propriedades físicas dos tecidos ou capazes de produzir produtos inteiramente novos. (Bidoki & R., 2009)

A aplicação de têxteis revestidos é amplamente utilizada em muitos sectores como calçados, tecidos, indústria automóvel, entre outros. (Bidoki & R., 2009;Science Tech Entrepreneur,2009)

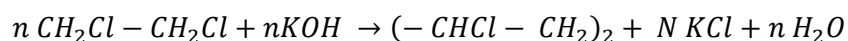


Figura 1.4. Exemplo de revestimentos têxteis (Science Tech Entrepreneur,2009).

As propriedades de um tecido com revestimento dependem do tipo de polímero utilizado e sua formulação, natureza do substrato e método de revestimento. Existem diversos polímeros utilizados para este fim, contudo os mais utilizados para revestimento são o policloreto de vinilo (PVC) e poliuretano (PU) (Dumont & Guignard, 1991; Bidoki, 2009).

História e características das resinas de PVC

Em 1835, Regnault observou que a reacção do dicloreto de etileno e potássio sob a acção da luz solar levava à formação de um pó branco, segundo a reacção:



Contudo a primeira síntese de PVC não resultou em nenhuma aplicação industrial, surgindo mais tarde na Alemanha, em 1935. É nesta altura que a produção de PVC assume interesse comercial e conseqüentemente uma produção industrial, havendo uma preocupação na procura de diversos aditivos. (Dumont & Guignard, 1991)

O PVC é um polímero formado pela reacção do cloro (57% em peso do polímero) com eteno (43% em peso). Esta reacção origina um novo gás, o dicloroetano (DCE), que ao sofrer pirólise produz o monómero cloreto de vinilo (MVC). O cloro é obtido por electrólise de uma solução de cloreto de sódio conhecida como salmoura e o eteno é obtido através do processo de pirólise (quebra de ligações químicas por acção do calor) da fracção de nafta na refinação do petróleo. (Instituto do PVC,2010)

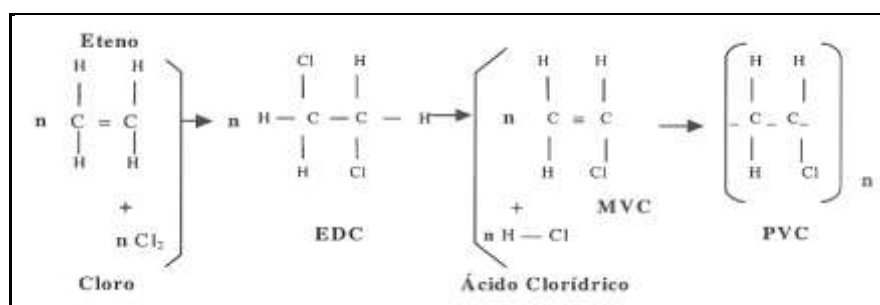


Figura 2.1. Produção de PVC (Instituto do PVC,2010).

O PVC é um termoplástico, que possui determinadas características que permitem que ao ser aquecido, moldado, arrefecido e aquecido novamente não haja perda significativa das suas propriedades. Contudo, as resinas de PVC, apresentam baixa estabilidade térmica e uma elevada viscosidade o que não permite que sejam directamente processadas. Desta forma, são adicionados aditivos com o objectivo de melhorar determinadas propriedades e possibilitar o processamento. (Instituto do PVC,2010)

Propriedades do PVC

As resinas de PVC têm uma plastificação diferente da maioria dos termoplásticos, pois antes de ocorrer a fusão completa há uma etapa designada por gelificação. Esta etapa é muito importante pois permite que as resinas de PVC se tornem uma massa fundida e processável. (Alves & Rodolfo, 2006 ;BQP Químicos,2010).

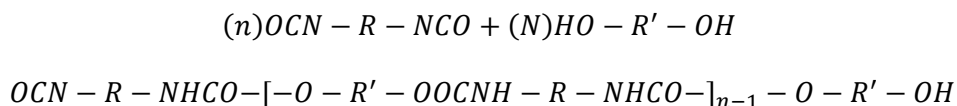
No processo de gelificação os parâmetros temperatura, pressão e tensão dão origem à desintegração de vários níveis morfológicos da resina de PVC, assim como ao desenvolvimento de um fundido homogéneo que após arrefecimento promove uma cristalização secundária. Isto é, as resinas de PVC tornam-se numa massa homogénea quando expostas a temperaturas entre os 180 e os 200°C e, quando arrefecidas, transformam-se num sólido que se mantém na forma do suporte em que foi aplicado (Alves & Rodolfo, 2006 ;BQP Químicos,2010).

História e características do poliuretano

Foi na década de 30 que os poliuretanos surgiram, consequência da descoberta de novos materiais de forma a tentar competir com as fibras de poliamida, que naquela altura eram comercialmente bem sucedidas. Embora estes materiais tivessem sido utilizados em algumas aplicações, só na década de 40 é que foram produzidos industrialmente, durante a Segunda Guerra Mundial, como revestimento térmico e acústico de submarinos e aviões. Só em 1950 os poliuretanos começaram a ser comercializados em camadas, adesivos, elastómeros e espumas rígidas. No final desta década iniciou-se a comercialização de espumas flexíveis. (Fernandes, 2008;Silva,2008)

Com o desenvolvimento tecnológico, as formulações, os aditivos e técnicas de processamento, têm sofrido alterações, como a utilização de reforços e moldações estruturais em partes exteriores de automóveis.

No que diz respeito às características do poliuretano, este é sintetizado a partir de uma reacção de poliadição em etapas, com compostos hidroxilos (OH) e isocianatos (OCN), como se pode ver pela Equação 1.1.



Equação 1.1

Os poliuretanos devido às suas propriedades conseguiram abrir novos horizontes na reutilização e reciclagem, já que podem ser extensamente usados para formular materiais adesivos. Pode-se falar por exemplo na resina de poliuretanos, que funciona como uma cola permitindo que vários materiais possam ser ligados (madeira, borrachas, entre outros). Geralmente, a composição dos revestimentos de PU são de superfície, formados por aditivos e outros dois componentes: um material aglutinante responsável pela formação do revestimento e uma mistura de líquidos voláteis, normalmente de tolueno e álcool isopropílico. Estes têm como objectivo promover uma adequada viscosidade, sendo posteriormente eliminados por evaporação. (Fernandes, 2008;Silva,2008).

A energia necessária à evaporação destes solventes pode ser determinada através da Equação 1.2.

$$Q = \sum m_{solvente,i} \times C_{pliquido,i}(T_s - T_e) + \sum m_{solvente,i} \times \Delta H_{v,i}$$

Equação 1.2

1.2.3. A energia na indústria de revestimentos

A produção de revestimentos em escala industrial requer um elevado consumo de energia térmica e eléctrica, sendo esta utilizada em várias etapas ao longo de todo o processo produtivo.

A energia térmica necessária à secagem do revestimento é normalmente proveniente do gás natural, que é o combustível utilizado nas caldeiras de aquecimento de um termofluido. Este fluido após sair das caldeiras alimenta vários permutadores, geralmente compactos, permitindo que um caudal de ar seja aquecido, que por sua vez vai secar e/ou gelificar o revestimento. Os equipamentos que mais consomem energia são portanto as estufas

A energia eléctrica na indústria de revestimentos é utilizada como força electromotriz nos equipamentos e iluminação. No entanto, a carga eléctrica mais importante do ponto de vista do consumo são os dispositivos mecânicos uma vez que são movidos por motores eléctricos. Estes são nomeadamente bombas, compressores, ventiladores, moinhos, tapetes rolantes, etc.

1.2.4. Indicadores energéticos na Monteiro Ribas, S.A.

A Monteiro Ribas – Indústrias, S.A. é uma empresa que tem preocupação com os consumos energéticos realizando com frequência auditorias onde é revisto o seu Plano de Racionalização do Consumo de Energia e avaliado a situação energética da empresa estabelecendo metas.

Os indicadores energéticos mais importantes para a empresa são a Intensidade Carbónica (IC) e o Consumo Específico de energia (CEE).

❖ Intensidade carbónica (IC)

A intensidade carbónica é medida pelo quociente entre o valor das emissões de gases com efeito de estufa resultantes da utilização das várias formas de energia no processo produtivo e o respectivo consumo total de energia (DL nº 71 de 15 de Abril de 2008). A Equação 1.3 permite calcular a intensidade carbónica (IC).

$$IC = \frac{GEE(kg CO_2)}{Energia (tep)}$$

Equação 1.3

❖ **Consumo específico**

O consumo específico é um indicador energético que permite relacionar a energia total consumida com a produção de um determinado produto. A Equação 1.4 permite calcular o consumo específico.

$$\text{Consumo específico} = \frac{\text{Energia (tep)}}{\text{Produção(m}^2\text{)}}$$

Equação 1.4

1.2.5. Enquadramento Legislativo sobre a Gestão do Consumo Intensivo de Energia na Monteiro Ribas S.A.

As empresas consumidoras intensivas de energia estão sujeitas a um vínculo legislativo. O Decreto-lei que deve ser aplicado é o Decreto-lei nº 71 de 15 de Abril de 2008 que regula o Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE). Este decreto surgiu da reforma do Regulamento de Gestão dos Consumos de Energia (RGCE) e é mais exigente no que respeita ao nível de emissão de gases com efeito de estufa, à utilização mais eficiente da energia e ao controlo e fiscalização do sector energético.

❖ **Âmbito de aplicação**

As instalações consumidoras que

no ano civil imediatamente anterior tenham tido um consumo energético superior a 500 toneladas equivalentes de petróleo (500 tep/ano), com excepção das instalações de co-geração juridicamente autónomas nos respectivos consumos de energia, são consumidoras intensivas de energia (CIE).

O operador responsável por instalações Consumidoras Intensivas de Energia fica sujeito a:

- ❖ fazer o registo das instalações;
- ❖ realizar auditorias energéticas que permitam verificar a possibilidade da implementação de fontes de energia renováveis, redução das facturas energéticas e outras medidas que contribuam para o aumento da eficiência energética;

- ❖ elaborar Planos de Racionalização do Consumo de Energia (PREn), com a finalidade de aumentar a eficiência energética e que devem ser posteriormente apresentados à ADENE (Agência para a Energia);
- ❖ colocar em prática e cumprir os PREn aprovados, sob a responsabilidade técnica de um técnico credenciado.

Auditorias Energéticas

É obrigatória a realização das seguintes auditorias energéticas:

- ❖ **Instalações com consumo de energia ≥ 1000 tep/ano**
Periodicidade de seis anos;
Realizada quatro meses após o registo.

- ❖ **Instalações com consumo de energia ≥ 500 tep/ano, mas <1000 tep/ano**
Periodicidade de oito anos;
Realizada no ano seguinte ao do registo.

As auditorias incidem não só sob as condições de utilização da energia, mas também sob a concepção e estado da instalação. Deve ainda ser recolhida toda a informação necessária para posterior elaboração do Plano de Racionalização do Consumo de Energia (PREn) e verificar o seu cumprimento. É ainda importante lembrar que, sem prejuízo do estabelecido anteriormente, o operador pode realizar as auditorias que considerar necessárias ao aumento da eficiência energética da instalação consumidora intensiva de energia.

Capítulo 2

Levantamento Energético

Neste Capítulo é apresentado o levantamento energético realizado à empresa Monteiro Ribas – Revestimentos, S.A., concretamente no sector destinado à produção de napa em PVC (policloreto de vinilo) e PU (poliuretano), referente ao ano 2010. Contudo, no que diz respeito ao consumo de energia e à produção de napa, estes dados foram fornecidos pela empresa e são referentes ao ano de 2009. Este levantamento energético inclui a descrição do processo, energia utilizada, dados de produção, consumos de energia e recomendações/sugestões de melhoria.

2.1. Descrição do Processo

Este item descreve de uma forma pormenorizada o processo de produção de artigos de PVC e PU.

Cozinha de pastas de PVC

A pasta de PVC é composta por vários componentes: resina, plastificante, cargas, espessantes, estabilizantes de temperatura, elemento expensor, pigmentos e outros aditivos.

Os aditivos que são encontrados na maioria das vezes na formulação dos plastisóis para diversas aplicações são:

- **Plastificantes:** têm não só a função de reduzir as forças de atracção entre as moléculas do PVC, como também aumentar a flexibilidade das cadeias poliméricas. Alterando a quantidade e natureza do plastificante incorporado são obtidos produtos finais com diferentes propriedades e aspectos. Os plastificantes mais comuns são DOP (dioctil ftalato) e o DINP (diisonil ftalato), sendo o DOP o mais utilizado devido ao seu baixo custo.
- **Estabilizantes:** No processo de transformação e devido ao efeito do calor, o PVC liberta cloreto de hidrogénio, havendo degradação da cadeia polimérica. Contudo, a degradação também pode ocorrer devido à radiação ultravioleta proveniente dos raios solares, sendo a decomposição da cadeia polimérica semelhante à degradação térmica. Desta forma, utilizam-se os estabilizantes que têm a função reduzir as estruturas das cadeias instáveis e tornar lenta a velocidade de todos os processos de decomposição iniciados durante o processamento ou uso do produto. (Instituto do PVC)

- **Cargas:** A função das cargas é diminuir o custo do material, mas também conferir propriedades desejáveis no PVC, tais como melhorar as propriedades mecânicas, eléctricas ou térmicas, aparência e da sua superfície (Dumont *et al.*, 1991).
- **Pigmentos e Corantes:** A coloração do PVC é feita com pigmentos e corantes, estes são compostos inorgânicos e insolúveis no polímero. O pigmento normalmente utilizado é o óxido de titânio que promove tanto a brancura como a opacidade dos produtos (Dumont & Guignard, 1991).

A preparação da pasta tem início com a pesagem dos diferentes componentes, que posteriormente são adicionados e misturados num tanque durante o tempo necessário para que a mistura fique homogénea (este tempo varia de acordo com o produto e pode ser entre 10 a 20 minutos). De seguida são ainda adicionados à mistura outros aditivos e o tempo de agitação varia com o tipo de pasta que se pretende obter.

Cozinha de pastas de PU

A elaboração das pastas de PU é semelhante à preparação das pastas de PVC, contudo estas contêm solventes orgânicos como o tolueno e o álcool isopropílico. Os solventes são adicionados em diferentes quantidades, dependendo da camada que se pretende obter. Na primeira camada a quantidade de solventes adicionados é de 70% em relação à massa de pasta, na segunda e terceira camadas a quantidade de solventes é cerca de 50%. Para os artigos de PU as massas utilizadas na primeira, segunda e terceira camadas são de 50, 90 e 100 g/m².

Moinhos

A moagem tem como objectivo diminuir o tamanho das partículas e promover a homogeneização da pasta. Esta etapa é realizada em moinhos tricilíndricos com uma abertura maior ou menor, consoante o tamanho das partículas. Estes moinhos iniciam o seu funcionamento apenas quando é necessário fazer um produto e param para dar lugar a outro produto ou a mudanças de cor e respectivas lavagens

Extracção do ar

Esta etapa tem como objectivo remover o ar que possa existir nas pastas. Este ar provoca defeitos no produto como riscos, bolhas de ar, entre outros. A extracção do ar é, então, efectuada através de uma bomba de vácuo acoplada a um dispersor.

Máquina piloto

Esta secção destina-se a pequenas encomendas, sendo constituída por uma estufa e uma cabeça. Ao contrário dos restantes equipamentos da fábrica, esta máquina não funciona em contínuo e, por isso, as pastas fazem várias passagens na mesma cabeça e estufa. As temperaturas na estufa podem variar desde os 80 até aos 200°C, no entanto à saída da estufa existem rolos (permutadores de calor que utilizam água como fluido de arrefecimento) que permitem arrefecer a pasta.

Recobrimento 1

A máquina onde se dá início o fabrico dos artigos de PVC é uma máquina de indução de três módulos (cabeça, estufa e sistema de arrefecimento) e nesta secção existe três máquinas com esta configuração.

No início da máquina existe um sistema de desenrolamento que contém o papel que é utilizado como suporte do PVC. Na primeira cabeça é depositada a pasta de PVC com o auxílio de um sistema constituído por uma faca que regula a gramagem a depositar sobre o papel. O papel com a primeira camada de pasta entra numa estufa de dupla passagem (constituída por duas zonas), onde recebe calor por injeção de ar aquecido (por um permutador de calor com termofluido) e gelificará adquirindo a viscosidade necessária para se colocar uma nova camada (sem estragar a primeira). Depois de fazer a segunda passagem na estufa, a pasta é arrefecida em rolos arrefecedores (permutadores de calor com circuito interno de água de arrefecimento).

O papel e o PVC aplicados anteriormente levam uma segunda camada de PVC com o agente expansor. A segunda cabeça possui duas facas, sendo possível o controlo do peso e espessura do PVC através de balanças radiométricas. Seguidamente o papel com PVC entra na estufa, que é constituída por duas zonas e onde é possível controlar a temperatura e espessura da camada. Antes de ir para o terceiro módulo o produto de PVC é arrefecido em rolos arrefecedores.

Por fim, o artigo recebe a última camada de PVC na terceira cabeça da máquina e, em simultâneo, é colocado um revestimento em tecido à medida que os rolos vão girando. Posteriormente, o artigo entra na estufa onde se dá a expansão do PVC e após sair é arrefecido em rolos arrefecedores. No final da máquina existem dois sistemas de enrolamento duplos, um para o papel e outro para o artigo final.

Recobrimento 2

Esta linha permite produzir encomendas de PVC e PU e o princípio de produção nesta secção é semelhante ao do Recobrimento 1. As máquinas de indução são de três módulos (cabeça, estufa e sistema de arrefecimento), sendo que nesta secção existem quatro módulos com esta configuração.

A primeira cabeça da máquina é a mais recente da fábrica e permite a aplicação de filmes de espessura reduzida. O produto depois de passar na primeira estufa, constituída por duas zonas de secagem com ventiladores de topo, é arrefecido em rolos arrefecedores.

A segunda cabeça da máquina é a mais tradicional, e possui dois ventiladores laterais. À semelhança da máquina no Recobrimento 1 a segunda estufa está dividida em duas zonas e no final existem rolos arrefecedores.

A terceira cabeça é semelhante à primeira, mas menos automatizada. A estufa é constituída por três zonas e os ventiladores estão situados no topo.

A quarta cabeça é semelhante à segunda cabeça do Recobrimento 1 onde a última estufa tem duas zonas termicamente controladas e os ventiladores estão no topo. À saída, o produto passa por rolos arrefecedores que também permitem remover o papel de suporte.

Revisão do Papel e Suportes

O papel após fazer algumas passagens na máquina de recobrimento pode apresentar alguns estragos como rasgos, emendas, sujidade ou riscos. Sendo assim, este papel necessita de passar por uma máquina com o objectivo de recuperar todo o papel em bom estado, aumentando assim o seu rendimento e diminuindo a possibilidade de defeitos no produto. Esta máquina é ainda constituída por um sistema de desenrolamento à entrada e enrolamento à saída.

Acabamento

Lacagem

A maioria dos artigos de PVC e alguns artigos de PU passam pelo processo de lacagem, ou seja, é aplicada uma laca que confere algumas propriedades como o toque, brilho e resistência. Neste processo existe uma estufa com uma zona de temperatura controlada, cujos ventiladores se encontram na parte lateral.

Estampagem

O processo de estampagem consiste na passagem de um desenho gravado em rolos de estampar para o artigo em processo. Na fábrica existem três processos onde é possível fazer a estampagem e são designados por Estampagem 1, 2 e 3. Em todos estes processos são utilizadas estufas aquecidas por um termofluido.

Gravação

A gravação é um processo através do qual é possível gravar um padrão no artigo. Para tal, o padrão tem de ser aquecido até 80°C, numa primeira fase, e depois passar numa zona onde atinge uma temperatura cerca de 300°C durante alguns segundos. Por fim, o produto passa em rolos de borracha para adquirir o padrão pretendido.

Na fábrica existem duas máquinas designadas por Gravação 1 e 2 onde é possível fazer a gravação dos produtos.

Esmerilagem

Esta parte do processo permite dar ao artigo um aspecto tipo camurça, através do desgaste de parte da primeira camada. Para tal, é necessário que o artigo passe duas vezes numa máquina que contém uma lixa.

Fulonagem

Nesta secção o artigo é quebrado em vários pontos.

Controlo Final

A esta secção chegam os produtos acabados, sendo necessário controlar algumas das suas propriedades como dureza, cor, reprodução do estampado, espessuras, entre outros. No final os produtos de segunda qualidade e de desconto são detectados e os restantes são cortados, embalados e identificados.

2.2. Energia utilizada

Na fábrica de revestimentos existem três formas de energia utilizadas: gás natural, água quente e energia eléctrica. O gás natural é utilizado para aquecer o fluido térmico no sector J da fábrica (Sector de Revestimentos - produção de napa em PU e PVC). A água quente é proveniente da unidade de co-geração, sendo utilizada como fluido de aquecimento do ar ambiente. A energia eléctrica não só é utilizada como força electromotriz dos motores eléctricos como também de iluminação.

2.2.1. Energia térmica

Na indústria, um dos equipamentos indispensável é o gerador de calor, sendo também um dos locais onde existe maior consumo de energia. As centrais térmicas variam muito de capacidade, quer se trate de caldeiras para a indústria ou para comércio (ADENE, 2010).

Em muitos sectores industriais é comum e indispensável utilizar vapor de água como fluido de trabalho, contudo existem caldeiras construídas para funcionarem com óleos minerais ou produtos orgânicos e sintéticos. Estes fluidos são utilizados em casos específicos de temperaturas elevadas entre 170 e 350°C (Bazzo, 1992).

No caso da fábrica de revestimentos existem duas caldeiras iguais que utilizam como combustível o gás natural para aquecer um termofluido, que por sua vez alimenta as estufas de secagem. No Anexo B encontram-se as características técnicas dessas caldeiras.

➤ **Rendimento e excesso de ar das caldeiras**

No levantamento energético as caldeiras de termofluido foram analisadas determinando-se os respectivos rendimentos. Para tal, foi fornecido pela empresa Monteiro Ribas - Revestimentos a análise dos gases de escape que se encontra na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Valores obtidos na análise dos gases de escape.

Parâmetro	9L		LS 15	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
T_g (°C)	247	277	257	260
T_a (°C)	25	25	25	25
%CO ₂	8,9	9,2	9,1	9,4
CO (ppm)	0	0	0	0
%O ₂	5,3	4,8	4,9	4,5
m_{H_2O}	0	0	0	0

Pela análise da Tabela 2.1 verifica-se que os gases de combustão têm cerca de 9% de CO₂, valor recomendável, pois está entre 9 e 11%, e não existe CO (o que significa que a reacção está a ser completa).

O excesso de ar utilizado está compreendido entre os 27,3 e 33,8%. No entanto, os valores recomendados variam entre 5 e 15%, ou seja, há perdas pelos gases de combustão aumentando o custo de operação.

Com os valores da Tabela 2.1 foi possível determinar o rendimento das caldeiras, sendo estes valores apresentados na Tabela 2.2, onde também se encontram as perdas de energia.

Tabela 2.2. Valores obtidos no cálculo do rendimento das caldeiras da fábrica de revestimentos.

	9L		LS 15	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Excesso de ar	33,8	29,6	30,4	27,3
P_{gc}	10,7	11,77	11,0	10,74
P_{H₂O}	2,9	3,2	3,0	3,1
Perdas por radiação	1,8	1,4	1,8	1,4
Total das perdas	15,4	16,4	15,7	15,2
Rendimento	84,6	83,6	84,3	84,8

Segundo um estudo realizado pela ADENE em 2010, os rendimentos de caldeiras de termofluido que usam gás natural como combustível tem valores entre os 80 e 85%. Pode-se então concluir, analisando a Tabela 2.2, que as caldeiras da fábrica de revestimentos têm um bom rendimento.

O levantamento da rede de distribuição de termofluido pode ser observado no diagrama da Figura 2.1.

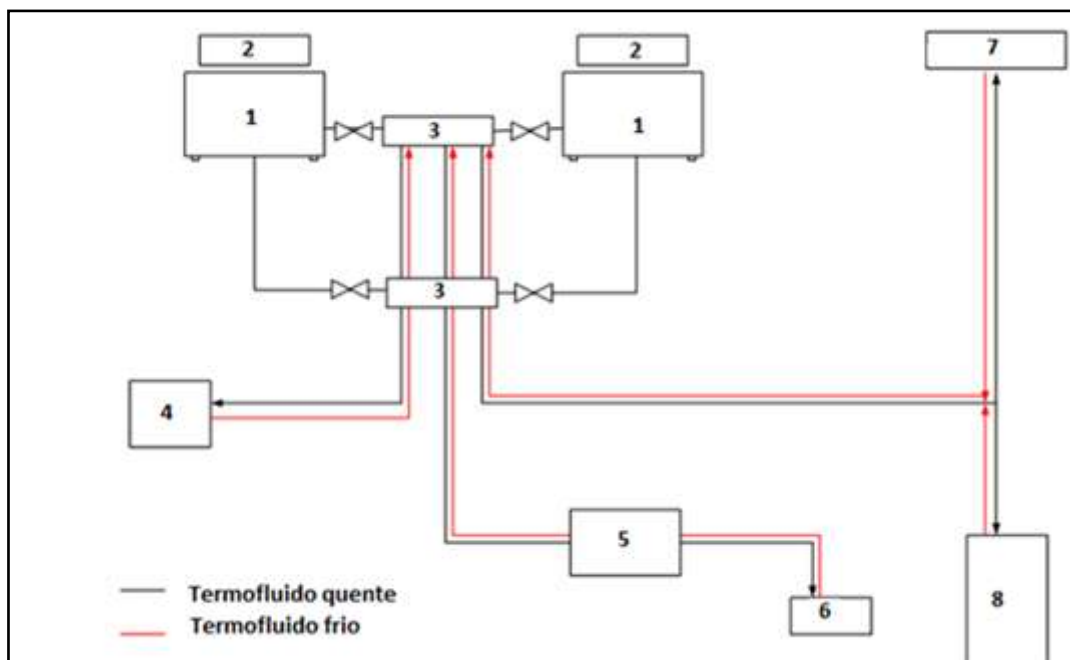


Figura 2.1. Rede de distribuição de termofluido na fábrica de revestimentos.

Legenda:

- 1 – Caldeiras;
- 2 – Recuperador de calor;
- 3 – Colectores;
- 4 – Recobrimento 2;
- 5 – Estampagem 3;
- 6 – Lacagem;
- 7 – Gravação e Estampagem (1 e 2);
- 8 – Recobrimento 1.

Na rede de distribuição de termofluido foram detectadas válvulas sem qualquer isolamento. No Anexo A, da Tabela A.1 à Tabela A.3 é possível verificar a listagem dessas mesmas válvulas. Nessas válvulas efectuaram-se medições de temperatura superficial, para posteriormente se determinar as perdas de energia, com uma câmara

termográfica, da marca Fluke e modelo Ti25. As características deste aparelho encontram-se no Anexo B.

A Figura 2.2 e Figura 2.3 foram obtidas a partir das medições efectuadas com a câmara termográfica, sendo que na Tabela 2.3 e Tabela 2.4 estão presentes as informações que se pode retirar com aparelho.

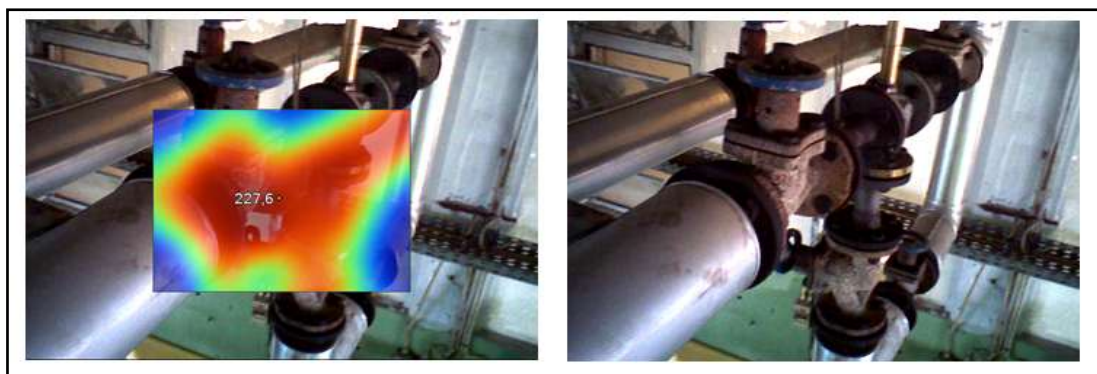


Figura 2.2. Imagens obtidas, com a câmara termográfica, na medição de temperaturas do termofluido no Recobrimento 1.

Tabela 2.3. Informações obtidas com a câmara termográfica na medição de temperaturas do termofluido no Recobrimento 1.

Temperatura mínima (°C)	44,8
Temperatura máxima (°C)	241,0
Temperatura média (°C)	170,0
Temperatura central (°C)	227,6

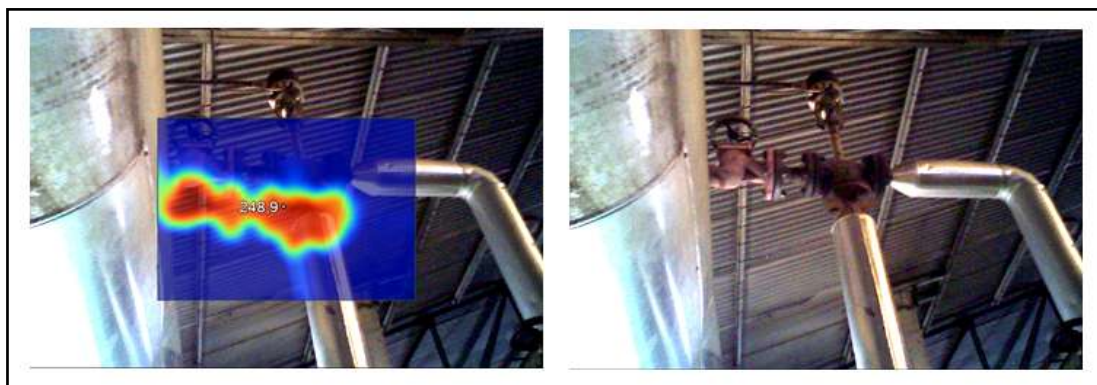


Figura 2.3. Imagens obtidas, com a câmara termográfica, na medição de temperaturas do termofluido no Recobrimento 2.

Tabela 2.4. Informações obtidas com a câmara termográfica na medição de temperaturas do termofluido no Recobrimento 2.

Temperatura mínima (°C)	54,8
Temperatura máxima (°C)	271,2
Temperatura média (°C)	98,1
Temperatura central (°C)	248,9

A perda de energia nas válvulas sem isolamento pode ser observada Figura 2.4. Os diferentes sectores da fábrica de revestimentos estão representados e nestes destaca-se a Linha R2 com cerca de 150 MWh/ano.

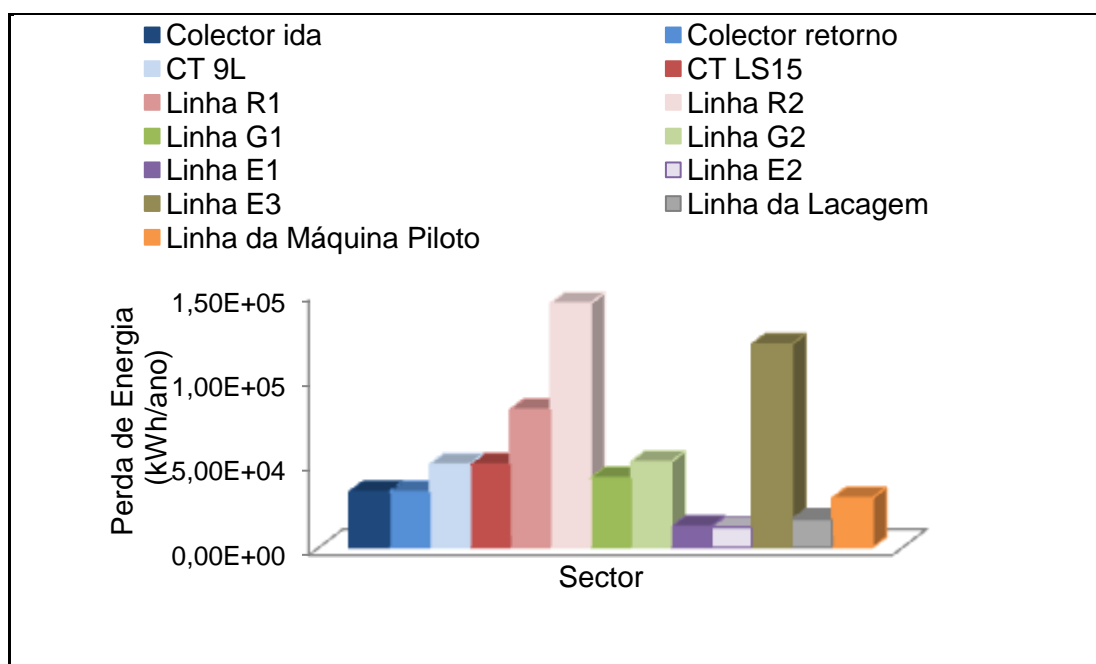


Figura 2.4. Perda de energia (kWh/ano) nas válvulas não isoladas dos vários sectores da fábrica de revestimentos.

Outros sectores que têm grande perda de energia nas válvulas são a Estampagem 3 (E3) e o Recobrimento 1 (R1) e por causa dos gastos energéticos, R1 e R2 foram alvo de estudo e melhoria neste trabalho.

2.2.2. Energia eléctrica

No sector J da fábrica de revestimentos a energia eléctrica é utilizada nos equipamentos e iluminação. Pela análise da Figura 2.5 verifica-se que a iluminação e a energia eléctrica necessária ao funcionamento dos equipamentos correspondem a 14 e 86% do consumo total de energia eléctrica, respectivamente.

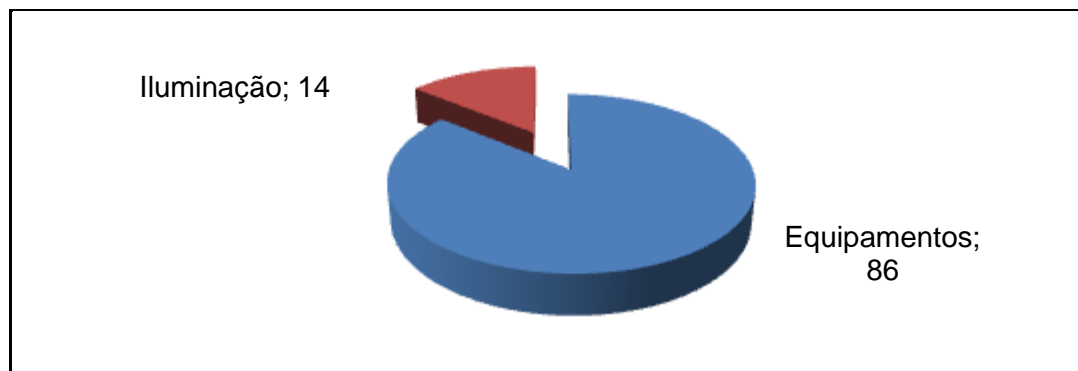


Figura 2.5. Distribuição dos consumos de energia eléctrica.

Equipamentos

A maior parte dos dispositivos mecânicos utilizados na indústria são movidos por motores eléctricos que constituem as cargas mais importantes do ponto de vista do consumo de electricidade. Em Portugal, cerca de 77% dos consumos de electricidade da indústria dizem respeito aos motores eléctricos. (Sá, 2009)

Na Figura 2.6 pode-se observar a distribuição dos consumos de energia eléctrica necessária aos equipamentos do sector J da fábrica de revestimentos e verificar que no Recobrimento e Acabamentos são os sectores de maior consumo.

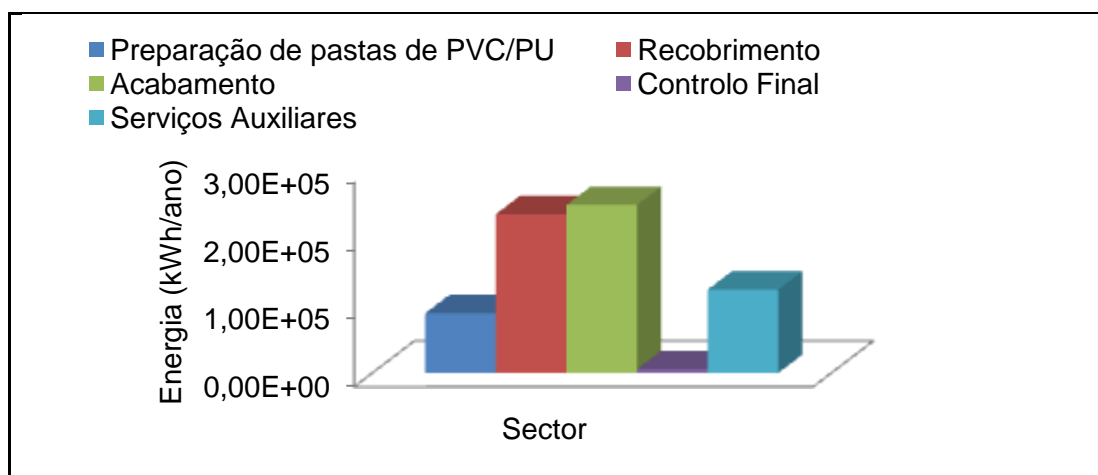


Figura 2.6. Consumo de energia eléctrica necessária aos equipamentos do sector J da fábrica de revestimentos.

Iluminação

A iluminação numa instalação industrial representa cerca de 5 a 7% do consumo global de energia eléctrica. Por este motivo, torna-se necessário a utilização de equipamentos mais eficazes que conduzam a reduções significativas de consumos

energéticos mantendo os níveis de iluminação adequados às actividades (ADENE, 2010).

Na fábrica de revestimentos foi efectuado o levantamento das características da instalação de iluminação. Este levantamento permitiu identificar armaduras com lâmpadas fluorescentes do tipo T8 e balastros normais. Os consumos de energia eléctrica foram obtidos através da potência das lâmpadas e sabendo que estas funcionam 4140 horas por ano, calculou-se o consumo de energia eléctrica que é mostrado na Figura 2.7.

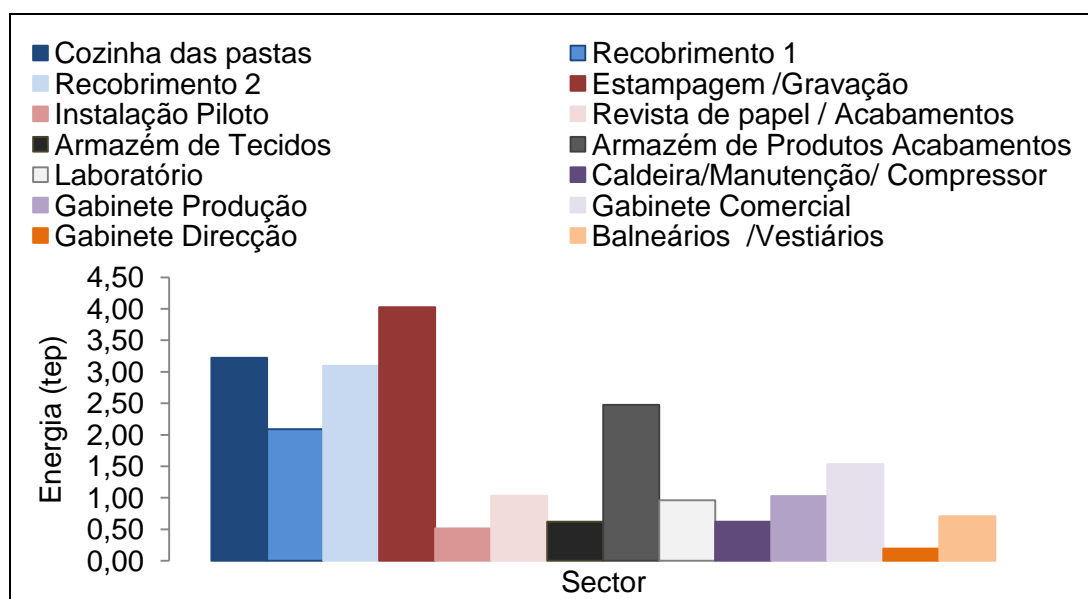


Figura 2.7. Distribuição da energia (tep) utilizada na iluminação em cada sector da fábrica de revestimentos.

Ar comprimido – Produção e distribuição

O ar comprimido é muito utilizado industrialmente, contudo o seu rendimento de produção em alguns casos é de apenas 10%, o que demonstra que o seu custo é elevado (Sá, 2009).

Uma central de ar comprimido é constituída por compressores que são accionados por motores eléctricos, sendo portanto os responsáveis pelo grande consumo de energia eléctrica (Novais, 1995).

No sector de revestimentos da fábrica de Monteiro Ribas o compressor existente é um compressor de rotativo de parafuso, com uma pressão média de 7 bar. O regime de funcionamento deste compressor é carga variável ou controlo por variação de

frequência. A utilização deste compressor permite acompanhar a oscilação do consumo de ar comprimido a cada instante, independentemente do seu valor, mantendo constante a pressão na rede de distribuição. O motor eléctrico adapta-se às oscilações dos diferentes consumos, variando a velocidade de acordo com as necessidades (Novais, 1995).

No levantamento energético efectuado à unidade de revestimentos, foi analisada a rede de distribuição de ar comprimido. Na Figura 2.8 encontra-se o diagrama da rede de distribuição de ar comprimido e no Anexo B, as características técnicas do compressor existente na fábrica de revestimentos.

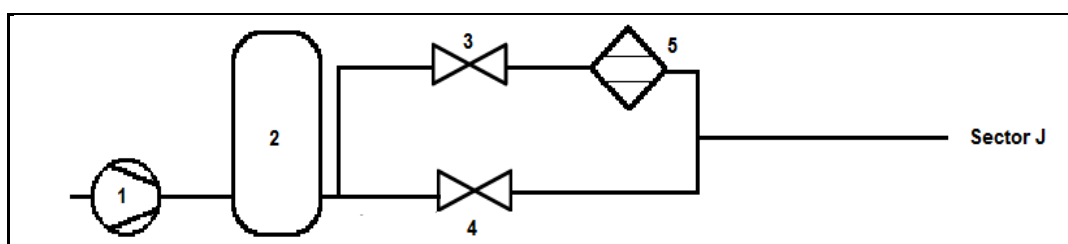


Figura 2.8. Rede de distribuição de ar comprimido da fábrica de revestimentos.

Legenda:

- 1 – Compressor;
- 2 – Reservatório de ar comprimido;
- 3 – Válvula;
- 4 – Válvula;
- 5 – Secador de ar comprimido.

No levantamento da rede de ar comprimido foram observadas algumas características importantes, nomeadamente:

- ❖ a existência de uma sala à parte onde estão instalados os compressores de forma simples e prática, com baixos custos de instalação e funcionamento;
- ❖ a existência de um secador de ar comprimido, que permite reduzir o seu ponto de orvalho conduzindo a reduções nos custos de instalação, de manutenção de válvulas e outros acessórios devido ao risco de corrosão, entre outros ;
- ❖ a existência de um reservatório de ar comprimido, que permite suprir as pontas de consumo quando estas excedem a capacidade do compressor, aumentar o arrefecimento do ar comprimido e recolher condensados e óleo.

2.3. Dados da produção

Na fábrica de revestimentos, tal como já foi referido, são produzidos artigos de napa em PU e PVC. Com os dados de produção (Anexo A.3.) e o consumo das três formas de energia fornecidos pela empresa (Anexo A.4.), efectuaram-se os cálculos necessários que permitiram obter o gráfico da Figura 2.9 que relaciona a produção (artigos de PU e PVC) com a energia total consumida no ano de 2009.

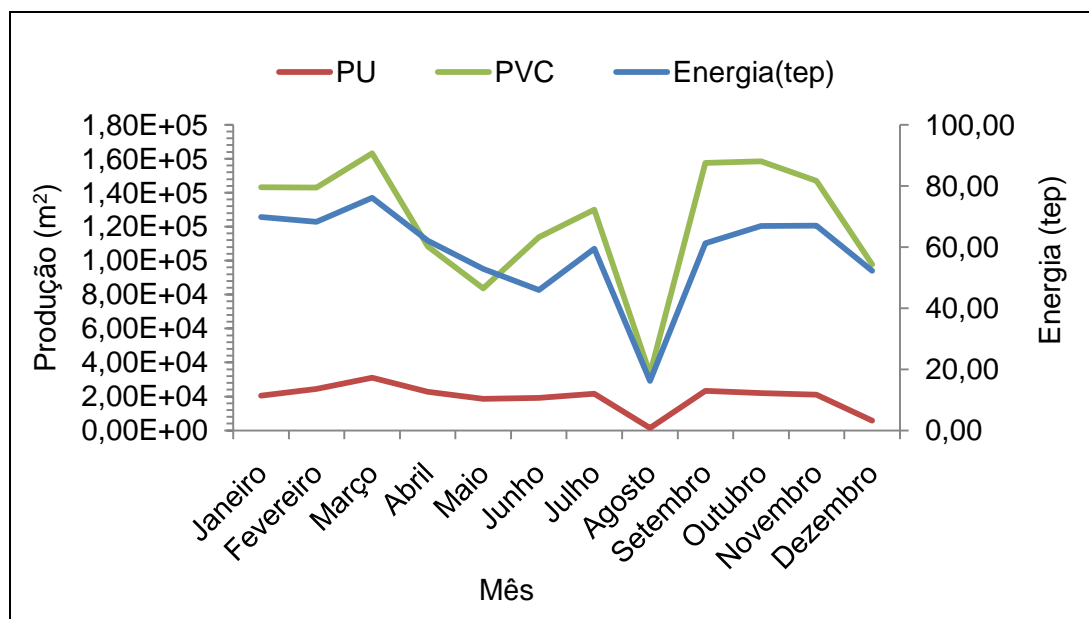


Figura 2.9. Variação da produção de PVC e PU (m²) e a energia consumida (tep) ao longo do ano de 2009.

Analisando a Figura 2.9, pode-se verificar que a quantidade de artigos produzidos em PVC é muito superior à quantidade de artigos em PU. A produção de ambos é praticamente constante ao longo do ano, à excepção do mês de Agosto, em que há uma descida muito acentuada da produção, pois corresponde ao período de férias dos trabalhadores e manutenção dos equipamentos.

2.4. Distribuição dos consumos

Seguidamente são apresentados os consumos globais anuais e mensais e cada forma de energia. Estes consumos foram determinados com dados fornecidos pela empresa Monteiro Ribas – Indústrias, S.A. podendo ser consultados todos os cálculos no Anexo E.3.

Consumos globais anuais

Tal como já foi referido anteriormente o levantamento energético ao sector de Revestimentos foi realizado com base nos consumos de 2009, fornecidos pela

empresa. Na Tabela 2.5. encontram-se os resultados para todas as formas de energia utilizadas na empresa, bem como consumos, custos e gases com efeito de estufa (GEE) anuais.

Tabela 2.5. Consumos de energia, custos e gases com efeito de estufa (GEE) na fábrica de revestimentos no ano de 2009.

Fonte	<i>m</i> (<i>t</i>)	<i>V</i> (<i>nm</i> ³)	<i>P</i> (<i>kWh</i>)	Energia (<i>tep</i>)	Energia (<i>GJ</i>)	Custo (<i>€</i>)	GEE (<i>kg CO₂ e</i>)
Gás natural	458,5	545536	-	493,8	20676,9	183.845,85	1325280,1
Água quente	-	-	-	30,0	1124,6	-	81693,8
Energia eléctrica	-	-	809970	174,1	2915,9	74.517,24	380677,8
Anual	---	---	---	697,9	24717,5	258.363,09	1787651,7

Os consumos de gás natural, água quente e energia eléctrica foram, respectivamente, 493,8, 30,0 e 174,1 tep. Pode-se concluir que a forma mais consumida é o gás natural com um custo de 183.845,85€ e emissão de 1.325.280,1 kg CO₂. No total, o sector de Revestimentos tem um consumo anual de energia igual a 697,9 tep, o que quer dizer que pelo Decreto-lei nº 71 de 15 de Abril de 2008, a empresa é considerada consumidora intensiva de energia.

O gráfico da Figura 2.10 indica a distribuição dos custos de energia em euros, podendo-se verificar que o gás natural representa 71% dos custos totais. Os restantes 29% estão relacionados com os consumos de energia eléctrica.

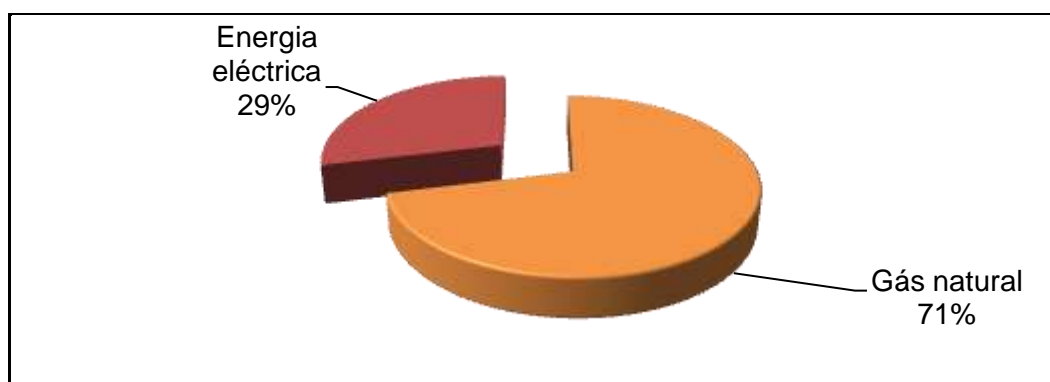


Figura 2.10. Distribuição dos custos de energia em euros na fábrica de Revestimentos.

Consumos globais mensais

Na Figura 2.11 encontra-se a representação gráfica da distribuição dos consumos mensais ao longo do ano de 2009 nas diferentes formas de energia (tep).

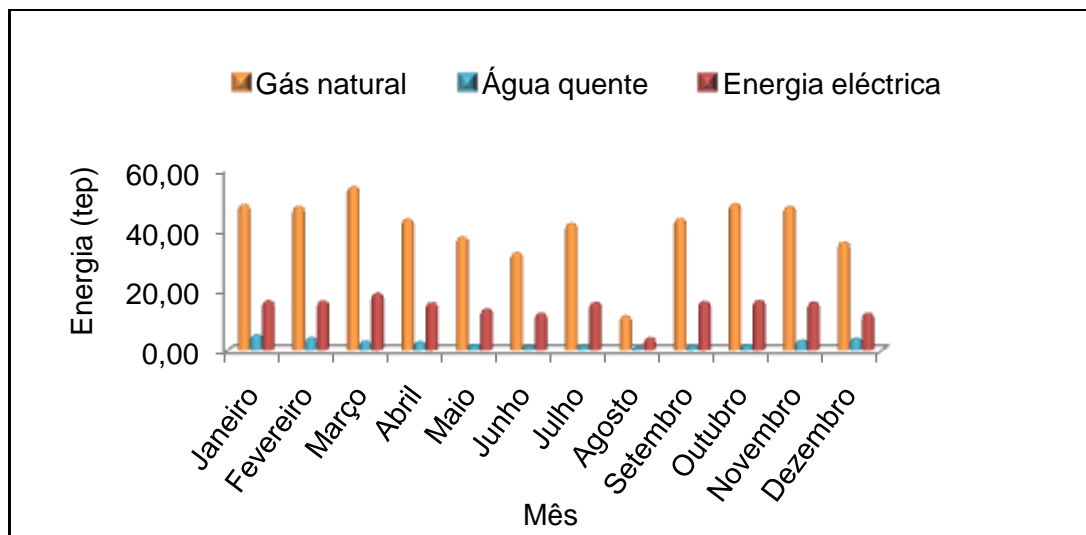


Figura 2.11. Distribuição dos gastos energéticos (tep) ao longo do ano de 2009 na fábrica de Revestimentos.

Pela análise da Figura 2.11 pode-se verificar que o gás natural é forma de energia mais utilizada no sector J, seguindo-se a energia eléctrica e a água quente. Verifica-se que a distribuição dos consumos para cada forma de energia é praticamente constante ao longo do ano, à excepção do mês de Agosto em que há uma diminuição acentuada de todos os consumos, provavelmente devido à paragem do processo.

De seguida, são apresentados os consumos mensais das três formas de energia utilizadas na fábrica de Revestimentos.

Consumo mensal de gás natural

Na Tabela 2.6 são apresentados os consumos mensais em 2009 de gás natural, em diferentes unidades, necessários ao aquecimento do termofluido na fábrica de revestimentos.

Tabela 2.6. Consumos mensais de gás natural e respectivas emissões de gases com efeito de estufa (GEE), na fábrica de revestimentos no ano de 2009.

Mês	V (m ³ (n))	m (ton)	Energia (tep)	Energia (GJ)	Custo (€)	GEE (kg CO ₂ e)
Janeiro	53458	44,93	48,4	2026,2	18015,37	129866,4
Fevereiro	52715	44,30	47,7	1998,0	17764,98	128061,5
Março	60012	50,43	54,3	2274,6	20224,07	145788,2
Abril	48106	40,43	43,5	1823,3	16211,74	116864,7
Maio	41579	34,94	37,6	1575,9	14012,14	101008,6
Junho	35885	30,16	32,5	1360,1	12093,26	87176,1
Julho	46593	39,16	42,2	1766,0	15701,86	113189,2
Agosto	12580	10,57	11,4	476,81	4239,47	30560,8
Setembro	48334	40,62	43,8	1832,0	16288,58	117418,6
Outubro	53882	45,28	48,8	2042,2	18158,26	130896,5
Novembro	52701	44,29	47,7	1997,5	17760,26	128027,5
Dezembro	39691	33,36	35,9	1504,4	13375,88	96422,0

Pela análise da Tabela 2.6 verifica-se que o consumo de gás natural é constante ao longo do ano.

Consumo mensal de água quente

Na Tabela 2.7 são apresentados os consumos mensais, em 2009, de água quente necessária ao sector J da fábrica de Revestimentos.

Tabela 2.7. Consumos mensais de água quente e respectivas emissões de gases com efeito de estufa (GEE), na fábrica de revestimentos no ano de 2009.

Mês	Energia (MWh)	Energia (tep)	Energia (GJ)	GEE (kg CO ₂ e)
Janeiro	52,9	5,1	190,4	13833,6
Fevereiro	43,7	4,2	157,3	11427,7
Março	29,8	2,9	107,3	7792,8
Abril	28,4	2,7	102,2	7426,7
Maio	17,0	1,6	61,2	4445,6
Junho	12,6	1,2	45,4	3295,0
Julho	14,1	1,4	50,8	3687,2
Agosto	7,0	0,7	25,2	1830,5
Setembro	13,5	1,3	48,6	3530,3
Outubro	16,8	1,6	60,5	4393,3
Novembro	35,1	3,4	126,4	9178,8
Dezembro	41,5	4,0	149,4	10852,4

Pela análise da Tabela 2.7 é possível verificar que o consumo de água quente varia bastante ao longo do ano, apresentando um menor consumo entre os meses de Maio e Outubro, altura em que não é necessária tanta energia para manter a temperatura ambiente nos níveis desejados.

Consumo mensal de energia eléctrica

Na Tabela 2.8 são apresentados os consumos mensais em 2009 de energia eléctrica necessária à força electromotriz dos equipamentos e à iluminação.

Tabela 2.8. Consumos mensais, custos e respectivas emissões de gases com efeito de estufa (GEE), de energia eléctrica na fábrica de revestimentos no ano de 2009.

Mês	Energia (kWh)	Energia (MWh)	Energia (GJ)	Energia (tep)	Custo (€)	GEE (kg CO ₂ e)
Janeiro	76248	76,248	274,5	16,4	7014,82	35835,8
Fevereiro	75959	75,959	273,4	16,3	6988,23	35700,0
Março	87980	87,980	316,7	18,9	8094,16	41349,7
Abril	73249	73,249	263,7	15,8	6738,91	34426,3
Maio	63409	63,409	228,3	13,6	5833,63	29801,6
Junho	57034	57,034	205,3	12,3	5247,13	26805,4
Julho	73906	73,906	266,1	15,9	6799,35	34735,1
Agosto	19097	19,097	68,8	4,1	1756,92	8975,4
Setembro	75134	75,134	270,5	16,2	6912,33	35312,2
Outubro	76835	76,835	276,6	16,5	7068,82	36111,7
Novembro	74049	74,049	266,6	15,9	6812,51	34802,3
Dezembro	57070	57,070	205,4	12,3	5250,44	26822,3

Analisando a Tabela 2.8 pode-se verificar que o consumo de energia eléctrica é constante ao longo do ano, à excepção do mês de Agosto, isto porque corresponde a um período de férias e a fábrica de Revestimentos está apenas em manutenção.

2.5. Indicadores energéticos

No âmbito deste trabalho, foram avaliados indicadores energéticos como a Intensidade Carbónica (IC) e o Consumo Específico de energia (CEE). Estes indicadores foram determinados tendo em conta os dados de produção e consumo de energia fornecidos pela empresa. Todos os cálculos efectuados podem ser consultados no Anexo E.4.

❖ Intensidade carbónica

Na Tabela 2.9 são apresentados os valores de intensidade carbónica (IC (kg CO₂e/tep)) ao longo do ano.

Tabela 2.9. Valores de Intensidade carbónica (IC) ao longo do ano de 2009.

Mês	IC (kg CO₂e/tep)
Janeiro	2570,0
Fevereiro	2567,3
Março	2561,7
Abril	2559,3
Maio	2556,9
Junho	2552,2
Julho	2551,7
Agosto	2559,2
Setembro	2553,4
Outubro	2562,0
Novembro	2567,7
Dezembro	2570,0
Anual	2561,5

A intensidade carbónica apresenta um valor praticamente constante ao longo do ano. No ano de 2009 este indicador energético tem o valor de 2561,5 kg CO₂e/tep.

❖ **Consumos específicos**

A relação dos consumos específicos de PU e PVC com a energia total consumida no ano de 2009 é representada, respectivamente, pelas Figuras 2.12 e 2.13.

Na Figura 2.12 verifica-se, tal como era teoricamente esperado, que o consumo específico varia inversamente com o aumento da produção. Pode-se ainda constatar que o consumo específico tem um valor constante ao longo do ano, à excepção dos meses de Agosto e Dezembro, que existe um aumento pelo facto de ter havido um decréscimo acentuado na produção de artigos de PU.

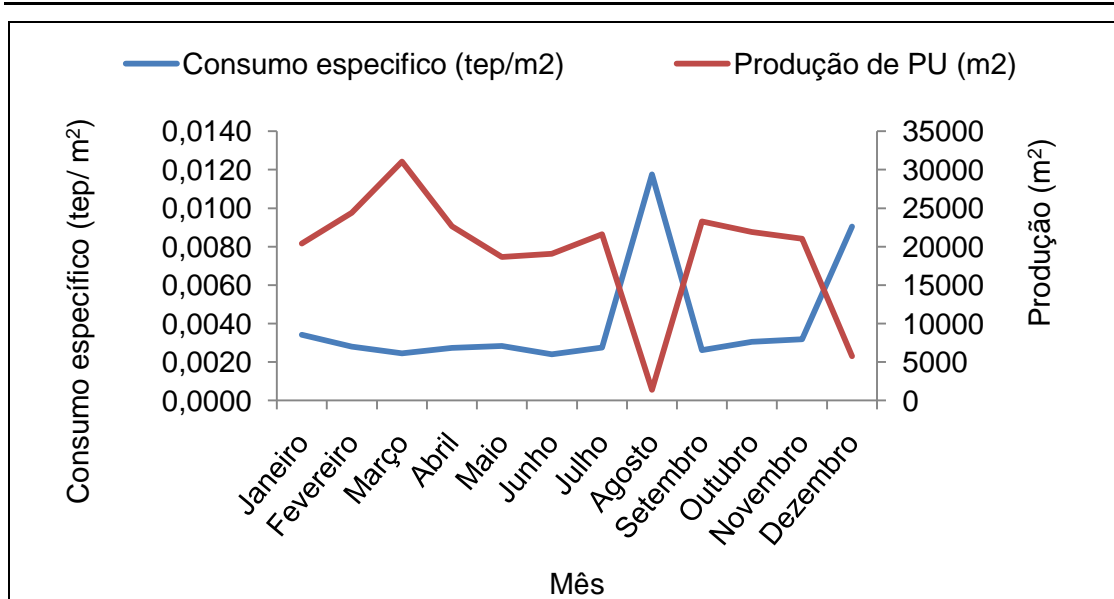


Figura 2.12. Variação do consumo específico (tep/m²) e produção de PU (m²) ao longo do ano.

Analisando a Figura 2.13 verifica-se que à semelhança do que acontece com os artigos de PU, o consumo específico diminui com o aumento da produção e vice-versa. Pode-se ainda dizer que apesar do consumo específico não ser constante ao longo do ano, esta variação é acompanhada de forma inversa pela produção.

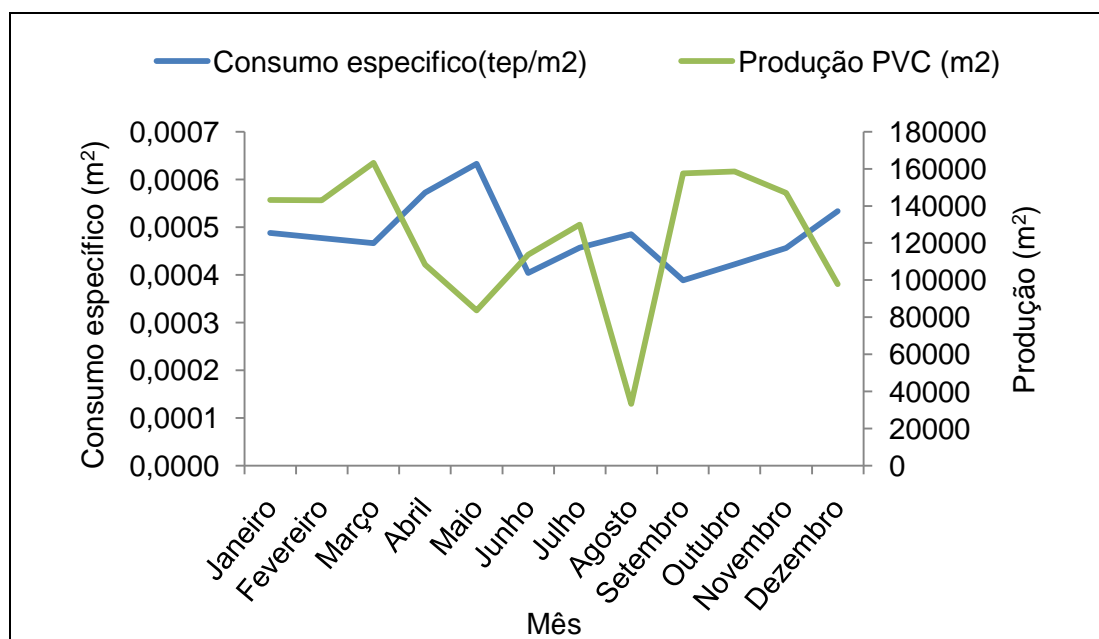


Figura 2.13. Variação do consumo específico (tep/m²) e produção de PVC (m²) ao longo do ano.

Nos gráficos da Figura 2.14 e Figura 2.15 são relacionados os consumos específicos mensais e anuais do PU e PVC, respectivamente.

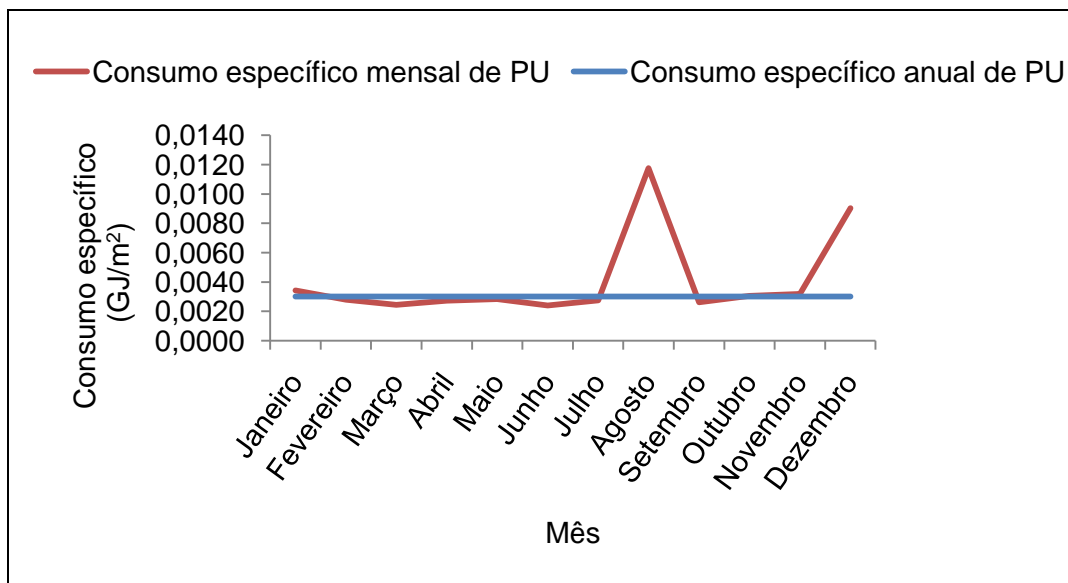


Figura 2.14. Variação dos consumos específicos anual e mensal para o PU.

Observando o gráfico da Figura 2.14, verifica-se que os consumos específicos mensal e anual são muito semelhantes, não existindo quase desvios. Contudo, no mês de Agosto existe uma grande variação relativamente ao consumo específico anual.

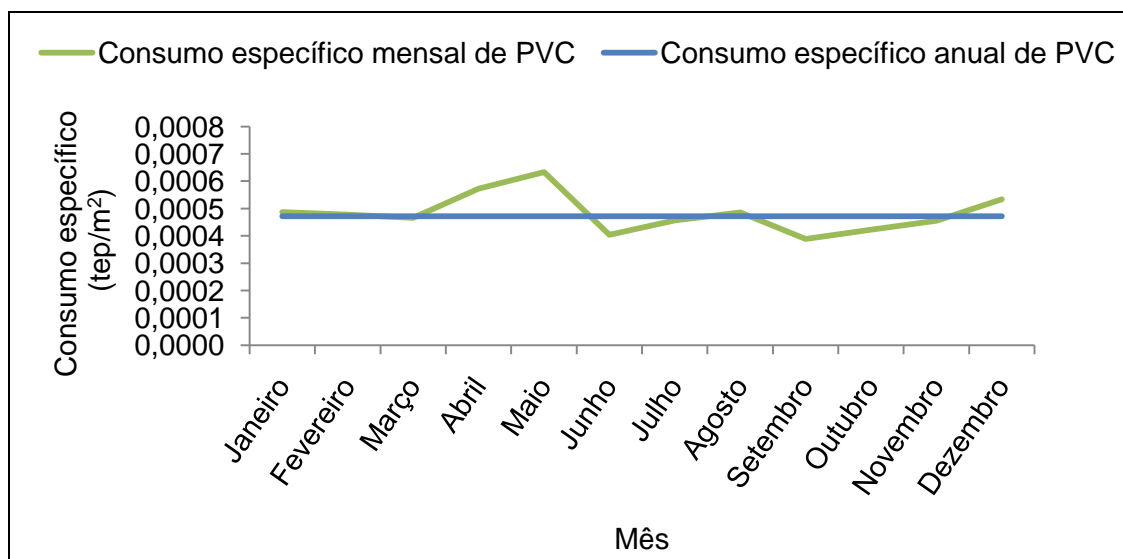


Figura 2.15. Relação entre os consumos específicos anual e mensal para o PVC.

Pela análise da Figura 2.15 verifica-se que o consumo específico de energia mensal varia significativamente em relação ao consumo específico de energia anual.

2.6. Recomendações e sugestões de melhoria

Depois de realizado o levantamento energético e analisados os resultados obtidos, foi possível elaborar uma lista com algumas recomendações, que podem tornar a fábrica de revestimentos mais eficiente do ponto de vista energético.

Sugestões de melhoria sem investimento

A iluminação de qualquer espaço deve ser estabelecida de acordo com os critérios de quantidade e qualidade da iluminação proporcionada, ou seja, o nível de iluminação deve ser adequado às tarefas a desempenhar e às características dos utilizadores.

Aproveitar ao máximo a luz natural, diminuindo a necessidade da iluminação artificial, assim como promover a limpeza de lâmpadas e luminárias, superfícies transparentes para entrada de luz natural e pintura de paredes são algumas das medidas propostas.

Sugestões de melhoria com investimento

Seguidamente são apresentadas as sugestões de melhoria com investimento e respectivos resultados, para a rede de distribuição do termofluido, iluminação e rede de ar comprimido.

❖ Rede de distribuição do termofluido

Na rede de distribuição de termofluido detectou-se um desnível de cotas, o que tem como consequência perdas de carga elevadas. O que se sugere é uma rede de distribuição mais linear de forma a minimizar as perdas de carga.

Verificou-se ainda que esta rede apresenta válvulas que não têm qualquer tipo de isolamento. Quando as peças de equipamento funcionam acima de 60° C deveriam ser isoladas. Os isolamentos térmicos são materiais que têm condutividades térmicas baixas e que retardam a transferência de calor como a lã de basalto, a lã rocha, os tijolos de silicato de cálcio e a espuma de vidro. Desta forma, a medida de melhoria a propor é a colocação de isolamento adequado.

No caso da fábrica de revestimentos o isolamento que se propõe é a lã de rocha, sendo os resultados de investimento, poupança conseguida e período de retorno apresentados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10. Valores de investimento, poupança de energia e período pay-back relativos à implementação de isolamento.

Investimento total (€)	2.481,56
Poupança (€/ano)	21.145,14
Pay-back	0,12 anos

Pela análise da Tabela 2.10. é também possível verificar que para a colocação de isolamento nas válvulas é necessário um investimento de 2.481,56 €. A implementação desta medida conduz a uma economia de 21.145,14 € por ano, ou seja, o período de retorno do investimento é de 0,12 anos.

❖ Iluminação

No sistema de iluminação a opção por lâmpadas de elevada eficiência e por equipamentos mais eficientes é fundamental. No sistema de iluminação, como medida de optimização, pode substituir-se os balastros normais por electrónicos e as lâmpadas do tipo T8 por tipo T5. Os balastros electrónicos têm algumas vantagens, nomeadamente: aumentam o rendimento do próprio balastro, aumentam o tempo de vida útil da lâmpada, diminuem os ruídos, não necessitam de arrancadores e diminuem o consumo de energia em cerca de 25% (ADENE, 2010).

Relativamente às lâmpadas T5, consegue-se obter um aumento de eficiência de cerca de 7% relativamente às lampadas T8, além de serem de menor diâmetro.

Na Tabela 2.11 são apresentados os resultados obtidos por esta sugestão, podendo também consultar-se todos os cálculos no Anexo E.5.

Tabela 2.11. Valores de investimento, poupança de energia e período pay-back relativos à implementação de balastros electrónicos.

Investimento (€)	13.048,74
Mão-de-obra (€)	825,00
Investimento Total (€)	13.873,74
Poupança económica anual (€/ano)	2.620,26
Pay-back	5 Anos

Pela análise da Tabela 2.11 verifica-se que o *pay-back* é de 5 anos, ou seja, o investimento na implementação de balastros electrónicos é viável do ponto de vista económico.

❖ **Rede de ar comprimido**

A rede de distribuição deve ser montada em anel fechado sempre que for possível, para que o fornecimento de ar comprimido se possa fazer aos sectores individuais sem que haja interrupção do abastecimento dos restantes. Isto permite fazer consertos, manutenções e a instalação de extensões, sem que o fornecimento de ar comprimido dos equipamentos seja perturbado. Na rede em anel fechado, o ar comprimido percorre distâncias curtas, o que permite que a queda de pressão seja reduzida além da tubagem de transporte ser também mais pequena para o mesmo caudal e pressão (Novais, 1995).

Capítulo 3

Reengenharia do processo de secagem

Este capítulo destina-se à reengenharia das estufas que permitem a secagem de artigos de PVC (Recobrimento 1) e de PU (Recobrimento 2) na fábrica de Revestimentos. Contudo, antes de se sugerir melhorias ao processo foi necessário conhecer muito bem o funcionamento das estufas para posteriormente efectuar as medições dos parâmetros necessárias aos resultados apresentados neste capítulo.

3.1. Medições efectuadas

Foram efectuadas medições de temperatura com uma câmara termográfica e de velocidades do ar com um anemómetro de turbina. Os resultados destas medições podem ser consultados no Anexo C.

Seguidamente é descrito o modo como foram efectuadas as medições e apresentadas as respectivas imagens.

Recobrimento 1

Tal como já foi referido, o Recobrimento 1 é constituído por três estufas, que são apresentadas nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3. A Figura 3.1 refere-se à primeira estufa que é de dupla passagem e à excepção das restantes. A pasta de PVC é colocada sobre o papel, este passa na estufa onde é aquecido até ao ponto de gelificação dessa pasta, sendo depois arrefecidos em rolos com um circuito de água de arrefecimento. Em seguida estes entram de novo na estufa para voltarem a ser aquecidos. Mais à frente a tela sai da estufa e passa pela parte inferior até entrar na segunda cabeça/estufa do Recobrimento 1. Nesta estufa existe uma zona de temperatura controlada que contém dois permutadores de calor compactos.



Figura 3.1. Primeira estufa do Recobrimento 1.

Como se pode verificar na Figura 3.1 existem duas entradas de ar no topo da estufa nas quais foi possível medir as temperaturas e velocidades do ar. Já na saída, apenas se mediu temperatura do ar. As temperaturas do termofluido também foram medidas nas duas entradas e saídas.

A imagem da segunda estufa do Recobrimento 1 é apresentada na Figura 3.2. Nesta existem dois ventiladores de ar, que se encontram na parte lateral, onde foram medidas as temperaturas e velocidades do ar à entrada. Para o termofluido foram medidas as temperaturas nas duas entradas e saídas existentes. As temperaturas de saída do ar, entrada e saída da tela também foram registadas.



Figura 3.2. Segunda estufa do Recobrimento 1.

A Figura 3.3 é relativa á terceira estufa do Recobrimento 1. Existem quatro entradas de ar, que se situam no topo, nas quais foram medidas as suas temperaturas e

velocidades. Efectuou-se também a medição das temperaturas de entrada e saída do termofluido e na saída do ar foi possível registar a temperatura.



Figura 3.3. Terceira estufa do Recobrimento 1.

Recobrimento 2

A linha de Recobrimento 2 é constituída por quatro estufas, no entanto a quarta apenas é utilizada excepcionalmente, quando se pretende produzir artigos com uma mistura de PVC e PU. Desta forma consideram-se apenas para medições dos parâmetros em análise as três primeiras estufas, onde são produzidos artigos de PU.

Na Figura 3.4 é apresentada a imagem obtida nas medições da primeira estufa do Recobrimento 2. Aqui foram efectuadas medições de temperaturas e velocidades nas quatro entradas de ar que se situam no topo.

Nesta estufa existem duas zonas de temperatura controlada onde estão quatro permutadores de calor. Em cada uma destas zonas há duas entradas de ar, onde foram registadas as temperaturas e velocidades. Existem também quatro entradas e saídas de termofluido, onde se mediram as temperaturas. Por fim, registou-se ainda a temperatura de saída do ar.



Figura 3.4. Primeira estufa do Recobrimento 2.

Na Figura 3.5 é apresentada a imagem da segunda estufa do Recobrimento 2 que é semelhante à segunda estufa do Recobrimento 1. Foram igualmente medidas a temperatura e velocidade de entrada do ar nos ventiladores que se situam lateralmente. No termofluido mediram-se as temperaturas de entrada e saída e em relação ao ar que sai da estufa só foi registada a temperatura.



Figura 3.5. Segunda estufa do Recobrimento 2.

Na Figura 3.6 é apresentada a imagem da terceira estufa do Recobrimento 2. Esta estufa tem três zonas de temperatura controlada, três entradas e saídas de termofluido nas quais foram medidas as respectivas temperaturas. Os ventiladores de ar estão no topo da estufa, local onde, com dificuldade, foi possível medir as temperaturas e velocidades do ar.



Figura 3.6. Terceira estufa do Recobrimento 2.

3.2. Resultados obtidos a partir das medições

Da Figura 3.7 até à Figura 3.9 para o Recobrimento 1 e Figura 3.10 à Figura 3.12 para o Recobrimento 2 são apresentados os resultados de um balanço energético global à estufa (ver Anexo E.6.) a partir do qual foi possível determinar as diferentes formas como a energia proveniente do termofluido é utilizado.

Pela análise da Figura 3.7 pode-se verificar que 42% da energia fornecida pelo termofluido é recebida pelo ar e 26% é fornecida à tela, sendo a restante perdida por convecção e radiação.

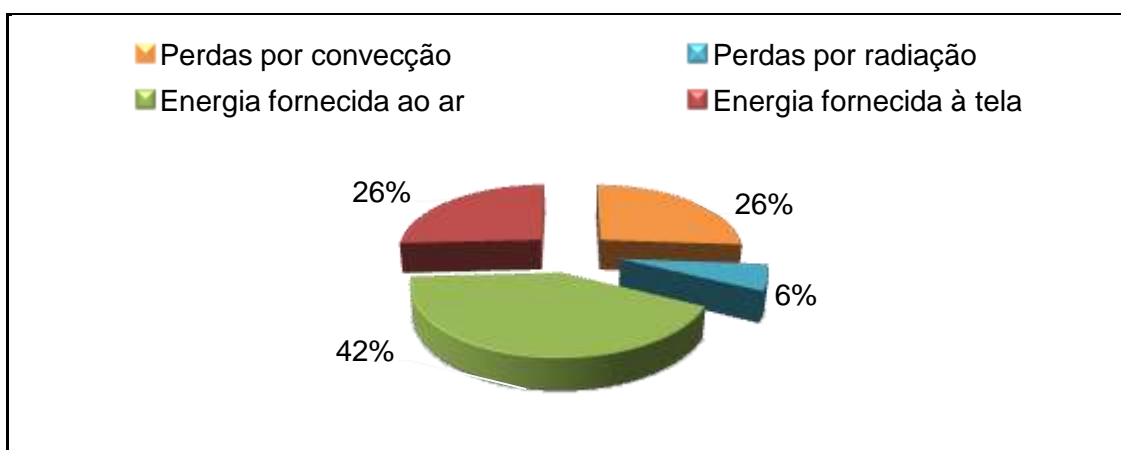


Figura 3.7. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na primeira estufa do Recobrimento 1.

Na Figura 3.8 é possível verificar que 51% da energia que o termofluido fornece é recebida pelo ar, 25% recebida pela tela e 17 e 7% perdida por convecção e radiação, respectivamente.

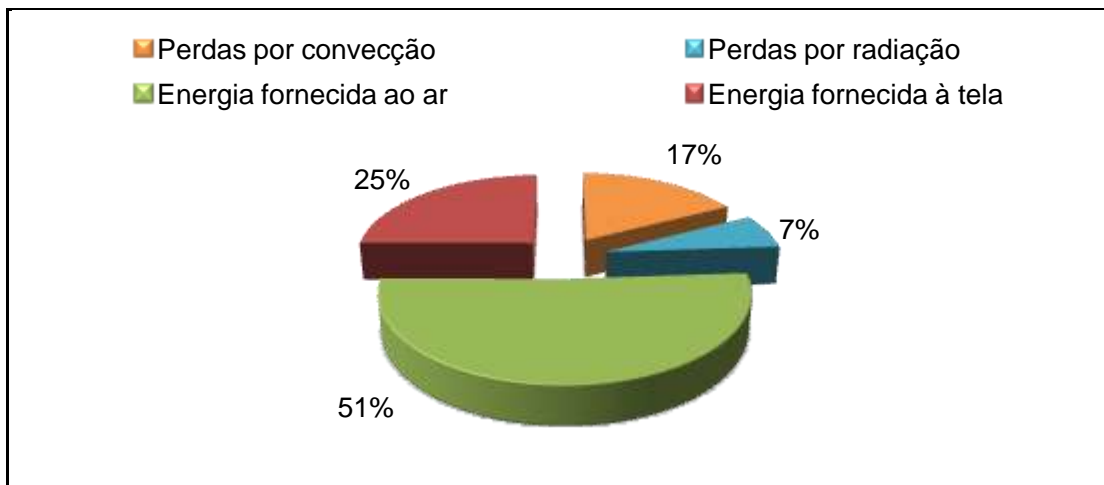


Figura 3.8. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na segunda estufa do Recobrimento 1.

Analisando a Figura 3.9 é possível constatar que a maior parte da energia fornecida pelo termofluido, 44%, é perdida por convecção, sendo apenas fornecida ao ar e à tela 39 e 6%, respectivamente.

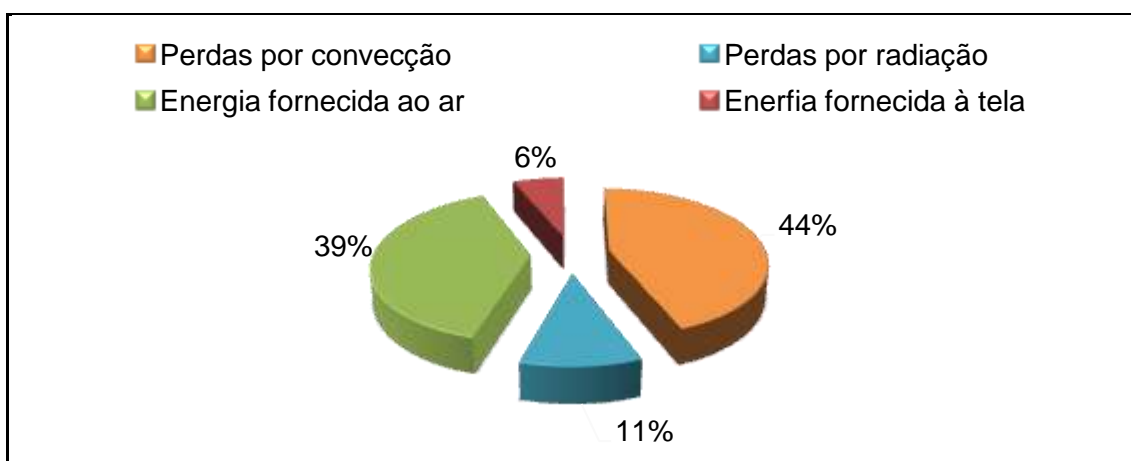


Figura 3.9. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na terceira estufa do Recobrimento 1.

Depois da análise da distribuição do calor fornecido pelo termofluido nas três estufas é possível concluir que a terceira estufa tem muitas perdas por convecção, ao contrário do que acontece nas primeira e segunda estufas. Este facto pode ser minimizado pela aplicação de isolamento adequado.

A energia recebida pelo ar é próxima nas três estufas, mas a energia fornecida à tela é muito baixa na terceira estufa. Em relação às perdas por radiação, o valor é idêntico nas três estufas.

Pela análise da Figura 3.10 pode verificar-se que a grande parte da energia cedida pelo termofluido é recebida pelo ar de secagem (51%), 2% recebida pela tela e 13% referentes à energia de vaporização dos solventes. As perdas por radiação e convecção representam 8 e 26% do calor total, respectivamente.

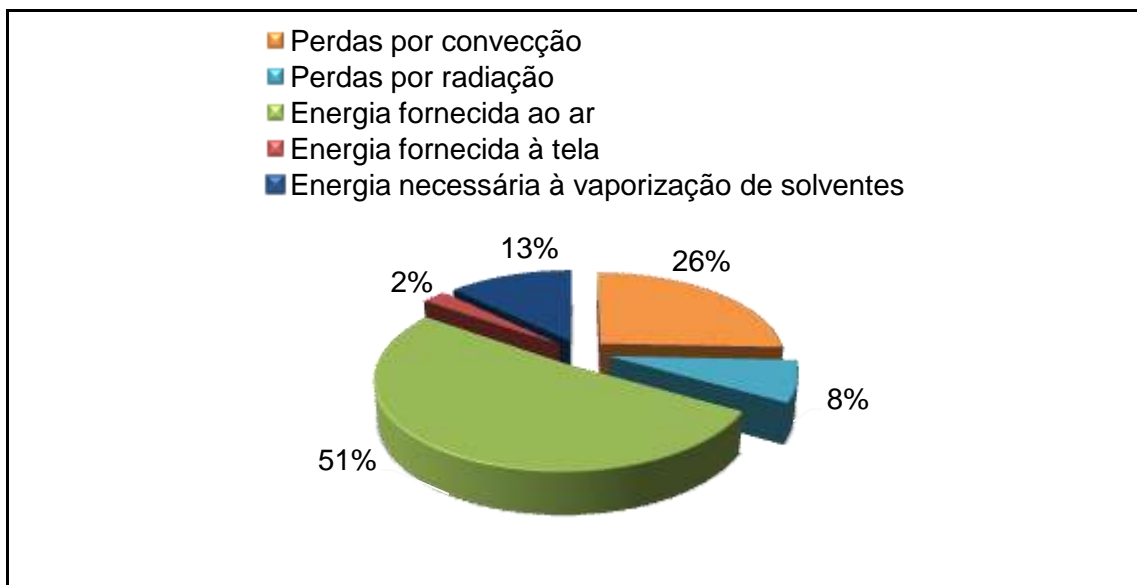


Figura 3.10. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na primeira estufa do Recobrimento 2.

Analisando a Figura 3.11 é possível verificar que na segunda estufa do Recobrimento 2 as perdas por radiação e por convecção representam 4 e 12%, respectivamente. A quantidade de energia recebida pelo ar é de 77% e a energia necessária para a evaporação dos solventes é 4%, sendo a restante recebida pela tela.

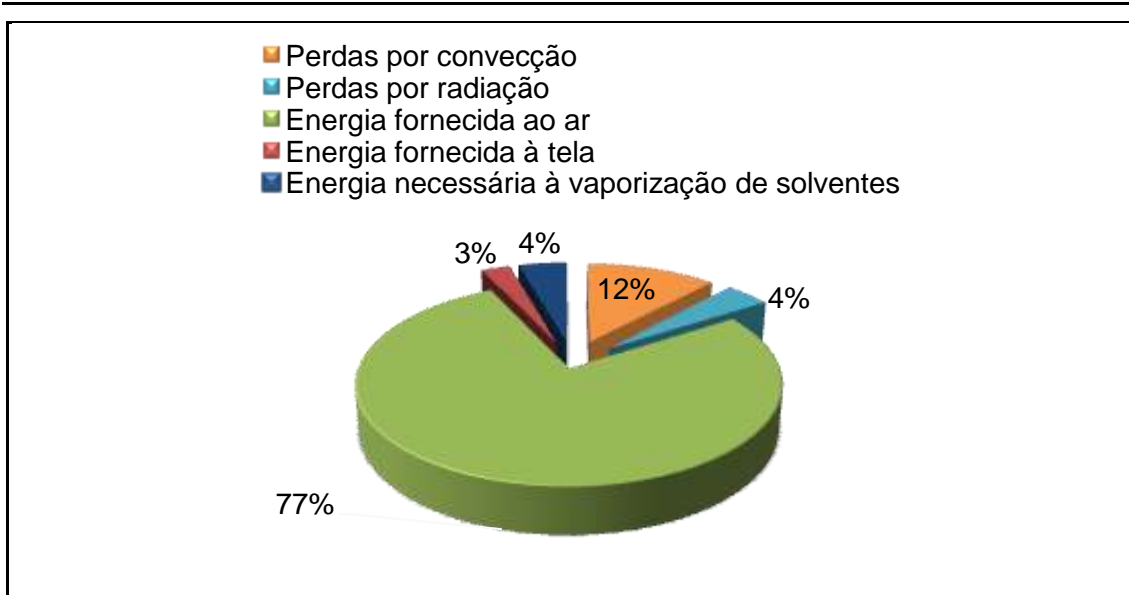


Figura 3.11. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na segunda estufa do Recobrimento 2.

Na Figura 3.12 é possível verificar o modo como a energia transferida pelo termofluido é distribuída na terceira estufa do Recobrimento 2. A energia cedida ao ar representa 76%, as perdas por radiação e convecção, 4 e 13%, respectivamente, vaporização dos solventes, 5%, e a energia cedida à tela é 2% da energia total cedida pelo termofluido.

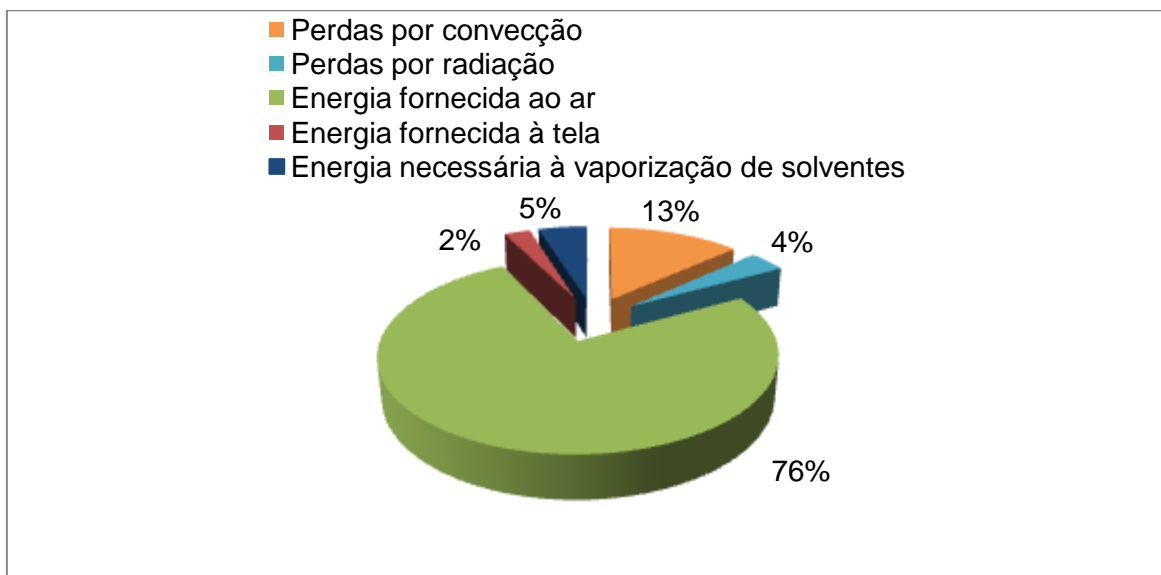


Figura 3.12. Distribuição da energia transferida pelo termofluido na terceira estufa do Recobrimento 2.

3.3. Avaliação da eficiência das estufas

O balanço energético global efectuado às estufas permitiu avaliar a eficiência das mesmas, bem como determinar a resistência de sujamento dos seus permutadores. Na Tabela 3.1 são apresentados os coeficientes globais de transferência de calor real e teórico, a eficiência energética e a resistência de sujamento para as três estufas do Recobrimento 1.

Tabela 3.1. Valores do coeficiente global de transferência de calor real e teórico, rendimento e resistência de sujamento calculados para o Recobrimento 1 e Recobrimento 2.

Estufa	Recobrimento 1			Recobrimento 2		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a
$U_{real}(W/m^2\text{°C})$	2,07	1,82	1,68	1,80	3,21	6,06
$U_{teórico}(W/m^2\text{°C})$	5,84	3,89	7,07	4,37	3,96	6,87
$\eta(\%)$	36	47	24	41	81	88
$R_i(\text{°C}/W)$	0,0034	0,0021	0,0004	0,0037	0,0005	0,0001

Pela análise da Tabela 3.1 é possível verificar que:

- ❖ Os coeficientes globais de transferência de calor reais têm valores muito próximos nas três estufas do Recobrimento 1.
- ❖ No Recobrimento 2 os coeficientes globais de transferência de calor reais, à semelhança do que acontece no Recobrimento 1, têm valores próximos que variam entre 3,96 e 6,87 $W/m^2\text{°C}$.
- ❖ Os coeficientes globais de transferência de calor teóricos têm valores baixos quando comparados com os da literatura, pois para permutadores de tubos alhetados (água – ar) o coeficiente global de transferência de calor tem valores entre os 25 e os 50 W/m^2K . (Incropera & DeWitt, 2003)
- ❖ Os rendimentos das estufas do Recobrimento 1 são baixos, sendo a terceira estufa a que apresenta o menor rendimento. No Recobrimento 2 é a primeira estufa que tem os valores mais baixos, no entanto os rendimentos das estufas 2 e 3 são de 81 e 88%, respectivamente.
- ❖ As resistências de sujamento interno são maiores na primeira estufa do Recobrimento 1 e menores na terceira estufa do Recobrimento 2.

- ❖ Tendo em conta os valores, $0,0009 \text{ m}^2 \text{ kW}$, apresentados na literatura para as resistências de sujamento com óleos (Incropera & DeWitt, 2003), as estufas 1, 2 do Recobrimento 1 e estufa 1 do Recobrimento 2 necessitam duma limpeza.

3.4. Sugestões de melhoria

Como sugestão de melhoria no processo de secagem e considerando apenas um permutador da primeira estufa do Recobrimento 1 propõe-se a implementação de um permutador de calor compacto para aquecer o ar antes de este entrar na estufa. Este permutador utiliza como fluido de aquecimento o ar que sai da estufa com temperaturas elevadas e o seu dimensionamento apresenta-se na Tabela 3.2 com um exemplo de cálculo no Anexo E.

Tabela 3.2. Resultados obtidos no dimensionamento do permutador compacto.

$Q(W)$	4499,49
$U(W/^\circ\text{m}^2C)$	85,6
$A_{\text{transferência de calor}} (m^2)$	6,80
Custo (€)	8.867,81
Poupança (€/ano)	708,88
Pay-Back (anos)	13

O investimento no permutador é de 8.867,81 € e a poupança pela implementação deste equipamento é cerca de 708,88 €/ano, com um *pay-back* de 13 anos.

Outra sugestão de melhoria consiste na recirculação de parte do ar de saída, estudaram-se as seguintes possibilidades: recircular 5% do ar conduzirá à poupança de 158,02 €/ano e recircular 25% do ar conduzirá à poupança de 790,10 €/ano. (VER Anexo E.6.2.)

Salvaguarda-se que, por estar a recircular ar com compostos indesejáveis, possa ser necessário ponderar a sua implementação.

As perdas por radiação e convecção são significativas podendo ser reduzidas pela aplicação de isolamento mais eficiente.

Capítulo 4

Conclusões

A elaboração deste trabalho permitiu concluir que o sector de Revestimentos da empresa Monteiro Ribas – Indústrias, S.A. está classificado, segundo o Decreto-lei nº 71 de 15 de Abril de 2008, como empresa Consumidora Intensiva de Energia (CIE) pois tem um consumo de energético de 697,9 tep. Desta forma, a empresa fica sujeita a registar as instalações; realizar de auditorias energéticas com uma periodicidade de oito anos e elaborar um Plano de Racionalização do Consumo de Energia, no qual deve constar a implementação de todas as medidas com um período de retorno igual ou inferior a três anos. Este plano deve ainda conter as metas para os indicadores energéticos: uma melhoria de 4% em oito anos no consumo específico e a necessidade de manter a intensidade carbónica.

Neste trabalho, durante o levantamento energético foram detectadas algumas situações que devem ser alvo de melhoria, tais como: a rede de termofluido, por apresentar válvulas sem isolamento, o sistema de iluminação, por ser ineficiente e a rede de distribuição de ar comprimido, por não ter a estrutura mais correcta.

Por todos os motivos citados sugere-se que na rede de distribuição de termofluido as válvulas sejam isoladas com lã de rocha, o investimento total é de 2.481,56 € e a poupança de 21.145,14 €/ano, o que leva a um período de retorno de 0,12 anos.

No sistema de iluminação propõe-se a substituição dos balastos normais e lâmpadas T8 por balastos electrónicos e lâmpadas T5, respectivamente, com um investimento total de 13.873,74 € e a poupança pela implementação destes equipamentos de 2.620,26 €/ano, o que conduz a um pay-back de 5 anos.

Tanto as sugestões de melhoria da estrutura da rede de termofluido como a modificação da iluminação podem ser implementadas porque o período de retorno é consideravelmente baixo.

No processo de secagem verifica-se que na distribuição da energia transferida pelo termofluido, o ar recebe entre 39 a 51%, a tela cerca de 25% e a terceira estufa apenas de 6% da energia total para o Recobrimento 1. Pode-se concluir que a tela deveria receber a energia que é fornecida para aquecer o ar, mas isto não está acontecer, pois a energia recebida é muito inferior. A energia necessária para aquecer o ar é muito superior ao que é utilizado para aquecer a tela e, por este motivo, parece

ser possível reduzir o caudal de ar que entra na estufa. Esta alteração vai ter como consequência uma diminuição da energia total e consequentemente na diminuição dos custos de energia térmica.

Ainda no Recobrimento 1, as perdas por radiação oscilam entre 6 e 11% enquanto as perdas por convecção representam cerca de 17 a 44%.

No Recobrimento 2 a energia fornecida ao ar representa cerca de 51 a 77% da energia total que o termofluido fornece. A energia cedida à tela oscila entre 2 e 3%, a necessária para evaporar os solventes oscila entre os 4 e 13%, as perdas por convecção oscilam entre 12 e 26%, enquanto que as perdas por radiação têm valores entre 4 e 8%. Ao contrário do que se passa no Recobrimento 1, a energia cedida ao ar é necessária para promover a vaporização dos solventes, portanto o caudal de ar não deve ser diminuído, caso contrário a transferência de massa não é suficiente.

Os valores obtidos para o rendimento das estufas do Recobrimento 1 foram de aproximadamente 36, 47 e 24%, para as estufas 1, 2 e 3, respectivamente.

Estes valores de rendimento são muito baixos e mostram que o coeficiente global de transferência de calor teórico é bastante superior ao experimental. Para se obter melhores rendimentos o coeficiente global de transferência de calor experimental deveria ser mais elevado e a área de transferência de calor menor, ou seja, a área de transferência de calor que está a ser utilizada é muito elevada. Conclui-se assim que para aumentar a eficiência do ponto de vista da transferência de calor, era necessário substituir os permutadores existentes por outros de menor área. Por outro lado, o que leva a baixos coeficientes globais de transferência de calor são os baixos coeficientes peliculares de transferência de calor, que são afectados pela pouca e/ou ineficiente turbulência do ar. Já no Recobrimento 2 os valores de rendimento foram superiores, tendo-se obtido valores próximos dos 41, 81 e 88% para as estufas 1, 2 e 3, respectivamente. À semelhança do que acontece no Recobrimento 1 deveria optar-se também por permutadores de calor de menor área, para que a eficiência de transferência de calor aumentasse.

As resistências de sujamento interno dos permutadores foram calculadas e os seus valores mostram que as estufas que necessitam de limpeza são as duas primeiras do Recobrimento 1 e a primeira do Recobrimento 2. Combinando estes resultados com os valores de rendimento obtidos nas estufas conclui-se que a estufa prioritária para manutenção é a primeira do Recobrimento 2.

Como sugestão de melhoria no processo de secagem propõe-se a implementação de permutadores de calor compactos para aquecer o ar antes de este entrar nas estufas. Os permutadores utilizaram como fluido quente o ar que sai das estufas.

No dimensionamento de um dos permutadores compactos para a primeira estufa do Recobrimento 1 obteve-se uma área de transferência de calor de $6,80 \text{ m}^2$ e um custo associado de 8.867,81 €, o que permite a poupança de 708,88 €/ano e um período de retorno do investimento de 13 anos. Este valor é elevado concluindo-se que o investimento não é viável.

Outra sugestão consiste na recirculação de parte do ar de saída: recircular 5% deste ar conduzirá à poupança de 158,02 €/ano e recircular 25% conduzirá à poupança de 790,10 €/ano. Salvaguarda-se que eventualmente se possa estar a recircular ar com compostos indesejáveis, sendo por isso necessário ponderar a implementação desta sugestão.

É possível ainda concluir que a implementação de todas as medidas propostas permitirá à empresa diminuir a emissão de gases com efeito de estufa em 890822,56 kgCO₂e/ano.

Bibliografia

- ADENE. (s.d.). Obtido em 17 de Maio de 2010, de www.adene.pt:
<http://horacio.no.sapo.pt/Eficiencia%20Energetica%20na%20Industria%20ADENE.pdf>.
- ADENE. (s.d.). *Relatório Final e Acção de Promoção de Eficiência Energética em Caldeiras de Vapor e de termofluido*, Obtido em 6 de Outubro de 2010, de www.adene.pt/NR/rdonlyres/A935A8EB-F0B0-4850-A3A1-3231A6BB9932/1671/Relat_Final_Accao_Geradores_Calor_vf.pdf.
- Alves, J. P., & Rodolfo, J. A. (2006). Análise do processo de gelificação de resinas e compostos de PVC em suspensão. 165-173.
- Animar. (s.d.). Obtido em 7 de Abril de 2010, de www.animar-dl.pt.
- Bazzo, E. (1992). *Geração de vapor*. Florianópolis, Brasil: DAUFSC.
- Bidoki, S., & R., W. (2009). Environmental and economical acceptance of polyvinyl chloride(PVC) coating agents. *Journal of Cleaner Production* .219-225.
- BQP Químicos. (s.d.). Obtido em 14 de Setembro de 2010, de www.bqp.pt/plastisol.html.
- Coulson, J., & Richardson, J. (1989). *Tecnologia Química, Uma Introdução ao Projecto em Tecnologia Química*. Lisboa, Volume VI: Calouste Gulbenkian.
- Decreto-Lei nº 71 de 15 de Abril de 2008.
- Dumont, J., & Guignard, J. (1991). *Le PVC et ses applications*. Paris: Editions Nathan Communication.
- Fernandes, I.(2008). *Dispersões aquosas de Poliuretano e Poliuretano-ureia, concepção do produto e metodologias de caracterização*. Tese de Mestrado em Engenharia Química. Instituto Politécnico de Bragança.
- Himmelblau, D. (1998). *Engenharia Química - Princípios e Cálculos*. Rio de Janeiro: EDITORA PRENTICE - HALL DO BRASIL LTDA.
- Incropera, P., F., & DeWitt, D. P. (2003). *Fundamentos de transferência de calor e massa* (5ª Edição). LTC - Editora.
- Instituto do PVC*. (s.d.). Obtido em 13 de Maio de 2010, de www.institutodopvc.org/reciclagem/interf/pdf/meio_ambiente.pdf_PVC.

Jr., Antonio Rodolfo; R., Nunes Luciano. (2002). *Braskem S.A.* Obtido em 7 de Outubro de 2010, de www.albag.com.br/images/Tecnologia_do_PVC.pdf.

Monteiro Ribas - S.A. . (s.d.). Obtido em 10 de Outubro de 2010, de www.mri.pt.

Monteiro Ribas – S.A. (Abril de 2008). Guia de acolhimento.

Novais, J. (1995). *Ar comprimido industrial - Produção, tratamento e distribuição* (1ª edição). Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Ozisik, M. N. (1985). *Transferência de Calor- um texto básico*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A..

Penínsulagás. (s.d.). Obtido em 15 de Setembro de 2010, de www.peninsulagas.com/content/view/25/39/1/2.

Peters, M., & Timmerhaus, K. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. New York: Mc.Graw-Hill International Editions.

Portugalisol - Isolamento térmico (2010).

Sá, A. F. (2009). *Gestão de energia e eficiência energética*. Porto: Publindústria.

Science Tech Entrepreneur (2009). *Artificial leather, Real comfort*. Obtido em 22 de Setembro de 2010, de www.techno-preneur.net/information-desk/sciencetech-magazine/2009/june09/Artificial-leather.pdf.

Silva, M. (2008). *Moldes protótipos para a produção de peças em rim*. Tese de Mestrado em Engenharia dos polímeros. Universidade do Minho, Guimarães.

ZETKAMA - Válvulas Industriais. (s.d.). Obtido em 23 de Outubro de 2010, de www.pinhol.pt/fotos/editor2/zetskama234.pdf.

Anexos

A. Levantamento energético - Tabelas

Neste Anexo são apresentadas as tabelas com os resultados do levantamento energético.

A.1. Energia térmica

Nas Tabela A.1, Tabela A.2 e Tabela A.3 são apresentados os resultados obtidos no cálculo das perdas de calor nas válvulas não isoladas.

Tabela A.1. Resultados calculados para as perdas de calor nas válvulas não isoladas dos colectores da caldeira e Recobrimento 1.

Local	Qt	Tipo de válvula	L (m)	D (m)	A (m ²)	h (W/m ² K)	R _a D	Nu	β (k-1)	v (m ² /s)	α (m ² /s)	Pr	K (W/mK)	Perdas de energia	
														W	kWh/ano
Colector ida	2	DN 150	1,60	0,29	0,753	13,15	1,09E8	55,9	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	7879,2	32619,72
Colector retorno	2													7879,2	32619,72
CT 9L	3													11818,7	48929,59
CT LS15	3													11818,7	48929,59
Linha R1	2	DN 125	1,22	0,250	0,479	13,73	7,63E7	50,2	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,03	4321,6	17891,53
	5	DN 40	1,03	0,150	0,130	27,03	1,65E7	31,6	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,042	4783,6	19804,24
	4	DN 40 3 vias												4847,7	20069,49
	4	DN 32	1,16	0,140	0,117	31,77	1,34E7	29,7	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	3929,9	16269,91
	1	DN 25	1,07	0,115	0,084	34,17	7,42E6	25,0	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	752,5	3115,25
	1	DN 32 3 vias	1,16	0,140	0,117	31,77	1,34E7	29,7	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	982,5	4067,48

Tabela A.2. Resultados calculados para as perdas de calor nas válvulas não isoladas do Recobrimento 2 e Gravação 1.

Local	Qt	Tipo de válvula	L (m)	D (m)	A (m ²)	h (W/m ² K)	R _a D	Nu	β(k-1)	v (m ² /s)	α (m ² /s)	Pr	K (W/mK)	Perdas de energia	
														W	kWh/ano
Linha R2	1	DN 80	1,03	0,200	0,258	17,85	3,77E7	40,5	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	1644,9	6810,08
	1	DN 15	1,47	0,095	0,069	49,14	4,04E6	20,9	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	1989,3	8235,84
	2	DN 50 3 vias	0,96	0,165	0,151	24,01	2,12E7	34,0	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	2387,1	9882,40
	14	DN 32	1,16	0,140	0,117	32,39	1,29E7	29,4	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	16306,9	67510,67
	5	DN 32 3 vias	1,16	0,140	0,117	32,39	1,29E7	29,4	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	5823,9	24110,95
	4	DN 50	0,96	0,165	0,151	12,72	9,09E8	108,0	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0588	3094,2	12810,10
	2	DN 40 3 vias	1,03	0,150	0,130	27,56	1,59E7	31,2	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	2325,6	9628,01
Linha G1	1	DN 40	1,03	0,150	0,130	27,56	1,59E7	31,2	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	1137,3	4708,45
	2	DN 100	1,12	0,22	0,352	15,27	5,20E7	44,6	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	3408,4	14110,60
	3	DN 50	0,96	0,165	0,151	23,55	2,19E7	34,4	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	3004,6	12438,92
	1	DN 50 3 vias	0,96	0,165	0,151	23,55	2,19E7	34,4	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	1001,5	4146,31
	2	DN 15	1,47	0,095	0,069	48,18	4,19E6	21,1	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	1654,9	6851,41
1	DN 15 3 vias	1,47	0,095	0,069	48,18	4,19E6	21,1	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	827,5	3425,71	

Tabela A.3. Resultados calculados para as perdas de calor nas válvulas não isoladas da Gravação 1 e 2, Estampagem 1,2 e 3, Lacagem e Máquina Piloto.

Local	Qt	Tipo de válvula	L (m)	D (m)	A (m ²)	h (W/m ² K)	R _a D	Nu	β (K ⁻¹)	v (m ² /s)	α (m ² /s)	Pr	k (W/mK)	Perdas de energia	
														(W)	kWh/ano
Linha G2	5	DN 50	0,96	0,165	0,151	23,55	2,19E7	34,4	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	5007,6	20731,53
	1	DN 100	1,12	0,22	0,352	15,27	5,20E7	44,6	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	1704,2	7055,30
	1	DN 25	1,07	0,115	0,084	34,17	7,42E6	25,0	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	752,5	3115,25
	5	DN 20	1,24	0,105	0,078	39,43	5,65E6	23,0	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	3921,7	16236,04
	1	DN 20 3 vias	1,24	0,105	0,078	39,43	5,65E6	23,0	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	784,3	3247,21
Linha E1	2	DN 32	1,16	0,140	0,117	31,77	1,34E7	29,7	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	1965,0	8134,95
	1	DN 32 3 vias	1,16	0,140	0,117	31,77	1,34E7	29,7	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	982,5	4067,48
Linha E2	2	DN 40	1,03	0,150	0,130	27,03	1,65E7	31,6	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	1913,5	7921,70
	1	DN 40 3 vias	1,03	0,150	0,130	27,03	1,65E7	31,6	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	956,7	3960,85
Linha E3	2	DN 80	1,03	0,200	0,258	17,85	3,77E7	40,5	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	3289,9	13620,16
	4	DN 20	1,24	0,105	0,078	40,22	5,45E6	22,8	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	3708,1	15351,37
	1	DN 20 3 vias	1,24	0,105	0,078	40,22	5,45E6	22,8	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	927,0	3837,84
	15	DN 32	1,16	0,140	0,117	32,39	1,29E7	29,4	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	17471,7	72332,86
	3	DN 32 3 vias	1,16	0,140	0,117	32,39	1,29E7	29,4	2,37E-3	2,89E-5	4,21E-5	0,688	0,0353	3494,3	14466,57
Linha da Lacagem	3	DN 50	0,96	0,165	0,151	23,55	2,19E7	34,4	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	3004,6	12438,92
	1	DN 50 3 vias	0,96	0,165	0,151	23,55	2,19E7	34,4	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	1001,5	4146,31
Linha da Máquina Piloto	1	DN 50	0,96	0,165	0,151	23,55	2,19E7	34,4	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	1001,5	4146,31
	6	DN 25	1,07	0,115	0,084	34,17	7,42E6	25,0	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	4514,9	18691,51
	2	DN 25 3 vias	1,07	0,115	0,084	34,17	7,42E6	25,0	2,46E-3	2,71E-5	3,94E-5	0,690	0,0342	1505,0	6230,50

A.2. Energia eléctrica

Da Tabela A.4 à Tabela A.7 são apresentados os equipamentos existentes na da fábrica de revestimentos e respectivas características.

Tabela A.4. Equipamentos existentes na cozinha das pastas de PU e PVC e respectivas características (tipo de accionamento, horas de funcionamento, potência nominal e energia anual consumida).

Sector	Equipamento	Quantidade	Tipo de accionamento	Funcionamento (h/ano)	Potência Nominal (kW)	Energia anual consumida	
						(kWh/ano)	(tep/ano)
Preparação de pastas de PVC/PU	Agitador PVC Mirales - A1	1	Motor AC	1485	18,85	16570,80	3,56
	Agitador PVC Spangenberg 1059 - A2	1	Motor AC	1485	19,35	17010,34	3,66
	Máquina de enfardar	1	Motor AC	248	1,10	161,49	0,03
	Agitador PVC Spangenberg - 691 - A8	1	Motor AC	1238	1,10	806,16	0,17
	Dispensor Spangenberg - 1058 - D3	1	Motor AC	24	5,55	78,85	0,02
	Moinho Spangenberg - 690 - M1	1	Motor AC	1485	7,50	6593,16	1,42
	Moinho Mirales - 791 - M2	1	Motor AC	1485	11,00	9669,96	2,08
	Moinho Mirales - 909 - M3	1	Motor AC	1485	7,50	6593,16	1,42
	Moinho Mirales - 1629 - M4	1	Motor AC	1485	30,75	27031,94	5,81
	Agitador PU Oliver Batle - A5	1	Motor AC	495	3,50	1025,60	0,22
	Agitador PU M. Ribas - A6	1	Motor AC	495	4,00	1172,12	0,25
Agitador PU DraisWerke - A7	1	Motor AC	495	3,50	1025,60	0,22	

Tabela A.5. Equipamentos existentes no sector de recobrimento e respectivas características (tipo de accionamento, horas de funcionamento, potência nominal e energia anual consumida).

Sector	Equipamento	Quantidade	Tipo de accionamento	Funcionamento (h/ano)	Potência nominal (kW)	Energia anual consumida	
						(kWh/ano)	(tep/ano)
Recobrimento	Máquina Piloto	1	Var. velocidade - Conversor AC/DC	1733	10,00	10258,98	2,21
	Máquina de Recobrimento Olbrich	1	Motor AC+ Conversor AC/DC	1645	72,60	70698,16	15,20
	Máquina de Recobrimento Matex	1	Motor AC + Conversor AC/DC	2481	103,80	152450,80	32,78

Tabela A.6. Equipamentos existentes nos serviços auxiliares e respectivas características (tipo de accionamento, horas de funcionamento, potência nominal e energia anual consumida).

Sector	Equipamento	Quantidade	Tipo de accionamento	Funcionamento (h/ano)	Potência nominal (kW)	Energia anual consumida	
						(kWh/ano)	(tep/ano)
Serviços Auxiliares	Compressor IRN 37	1	Var. Velocidade - Conversor Freq.	3960	37,00	86736,62	31,50
	Ventilador Telhado	12	Motor AC	1440	0,75	639,34	0,23
	Caldeiras CSC - 1700000 (kcal/h)	2	Motor AC	3960	15,00	35163,50	12,77

Tabela A.7. Equipamentos existentes no sector de acabamento e controlo final e respectivas características (tipo de accionamento, horas de funcionamento, potência nominal e energia anual consumida).

Sector	Equipamento	Quantidade	Tipo de accionamento	Funcionamento (h/ano)	Potência nominal	Energia consumida	
						(kWh/ano)	(tep/ano)
Acabamento	Máquina de Gravação 1	1	Var. velocidade - Conversor AC/DC	1908	28,08	31716,19	6,82
	Máquina Gravação 2	1	Var. velocidade - Conversor AC/DC	1731	105,60	108209,80	23,27
	Máquina de estampagem 1	1	Motor AC	1975	10,12	11831,87	2,54
	Máquina de Estampagem 2	1	Var. velocidade - Conversor AC/DC	1800	10,12	10783,47	2,32
	Máquina de Esmerilar - Zurlan	1	Motor AC	25	21,20	313,75	0,07
	Máquina de Lacagem	1	Motor AC	90	14,25	759,21	0,16
	Máquina de Estampagem	1	Var. velocidade - Conversor AC/DC	3640	38,65	83283,02	17,91
Controlo Final	Máquina de Revistar papel	1	Var. velocidade - Conversor AC/DC	743	2,25	989,64	0,21
	Máquina de Revistar telas	1	Var. velocidade - Conversor AC/DC	743	1,46	642,17	0,14
	Máquina de Medir/Revistar C1-C4	4	Motor AC	245	1,10	159,54	0,03
	Máquinas de Medir/Revistar C5/C6	2	Var. velocidade - Conversor Freq.	2000	3,10	3670,26	0,79

Na Tabela A.8 e Tabela A.9 são apresentadas as características da iluminação existente na fábrica de revestimentos.

Tabela A.8. Características da instalação da iluminação.

Sector	Nº Luminárias	Nº Lâmpadas	Potência (W)	Potência _{total} (W)	Energia	
					kWh/ano	tep/ano
Cozinha das pastas	25	50	58	2900	12006,0	2,58
	10	20	36	720	2980,8	0,64
Recobrimento 1	16	32	58	1856	7683,8	1,65
	1	1	58	58	240,1	0,05
	6	12	36	432	1788,5	0,38
Recobrimento 2	30	60	58	3480	14407,2	3,10
Estampagem /Gravação	4	4	58	232	960,5	0,21
	32	64	58	3712	15367,7	3,30
	8	16	36	576	2384,6	0,51
Instalação Piloto	5	10	58	580	2401,2	0,52

Tabela A.9. Características da instalação da iluminação.

Sector	Nº Luminárias	Nº Lâmpadas	Potência (W)	Potência total (W)	Energia	
					kWh/ano	tep/ano
Instalação Piloto	5	10	58	580	2401,2	0,52
Revista de papel / Acabamentos	10	20	58	1160	4802,4	1,03
Controlo Final	23	46	58	2668	11045,5	2,37
Armazém de Tecidos	6	12	58	696	2881,4	0,62
Armazém de Produtos Acabamentos	24	48	58	2784	11525,8	2,48
Laboratório	15	30	36	1080	4471,2	0,96
Caldeira Manutenção Compressor	6	12	58	696	2881,4	0,62
Gabinete Produção	16	32	36	1152	4769,3	1,03
Gabinete Comercial	24	48	36	1728	7153,9	1,54
Gabinete Direcção	3	12	18	216	894,2	0,19
Balneários Vestiários	11	44	18	792	3278,9	0,70

A.3. Dados da produção

Na fábrica de revestimentos são produzidos artigos em PU e PVC. A produção, em m² e ml, destes mesmos artigos no ano de 2009 encontra-se na Tabela A.10.

Tabela A.10. Produção da fábrica de revestimentos no ano de 2009.

Mês	PU		PVC	
	ml	m ²	ml	m ²
Janeiro	14566	20392,4	102341	143277,4
Fevereiro	17417	24383,8	102148	143007,2
Março	22196	31074,4	116600	163240,0
Abril	16189	22664,6	77410	108374,0
Maiο	13338	18673,2	59702	83582,8
Junho	13628	19079,2	81223	113712,2
Julho	15425	21595,0	92851	129991,4
Agosto	982	1374,8	23785	33299,0
Setembro	16634	23287,6	112498	157497,2
Outubro	15638	21893,2	113209	158492,6
Novembro	15026	21036,4	104953	146934,2
Dezembro	4124	5773,6	69880	97832,0
Anual	165163,0	231228,2	1056600,0	1479240,0

A.4. Distribuição dos consumos

Na Tabela A.11 e Tabela A.12 encontram-se os consumos de energia e repartição dos consumos/custos respectivamente.

Tabela A.11. Consumos de energia (gás natural, água quente e energia eléctrica), no ano de 2009

Mês	Energia (tep)			
	Gás natural	Água quente	Energia eléctrica	Total
Janeiro	48,39	5,08	16,39	69,86
Fevereiro	47,71	4,20	16,33	68,24
Março	54,32	2,86	18,92	76,09
Abril	43,54	2,73	15,75	62,02
Maió	37,63	1,63	13,63	52,90
Junho	32,48	1,21	12,26	45,95
Julho	42,17	1,35	15,89	59,42
Agosto	11,39	0,67	4,11	16,16
Setembro	43,75	1,30	16,15	61,20
Outubro	48,77	1,61	16,52	66,90
Novembro	47,70	3,37	15,92	66,99
Dezembro	35,92	3,98	12,27	52,18
Anual	493,77	29,99	174,14	697,90

Tabela A.12. Repartição dos consumos e custos das diferentes formas de energia utilizadas no sector J.

Forma de energia	Custo (€)	Custo (%€)
Gás natural	183845,85	71,2
Água quente	---	---
Energia eléctrica	74517,24	28,8
Total	258363,09	100

A.5. Indicadores energéticos

Na Tabela A.13 são apresentados os consumos específicos relativos aos artigos de PU e PVC, ano de 2009.

Tabela A.13. Valores de consumo específico de energia (CEE) calculados para os artigos em PU e PVC, no ano de 2009.

Mês	CEE PU (tep/m²)	CEE PVC (tep/m²)
Janeiro	0,0034	0,0005
Fevereiro	0,0028	0,0005
Março	0,0024	0,0005
Abril	0,0027	0,0006
Maio	0,0028	0,0006
Junho	0,0024	0,0004
Julho	0,0028	0,0005
Agosto	0,0118	0,0005
Setembro	0,0026	0,0004
Outubro	0,0031	0,0004
Novembro	0,0032	0,0005
Dezembro	0,0090	0,0005

B. Características técnicas dos equipamentos

Neste Anexo são apresentadas as características dos equipamentos auxiliares (caldeiras, compressor e permutadores) e instrumentos de medida.

B.1. Equipamentos auxiliares

Seguidamente são apresentados da Tabela B.1 à Tabela B.8 as características dos equipamentos auxiliares da fábrica de revestimentos.

Tabela B.1. Características técnicas das caldeiras existentes na fábrica de revestimentos.

Característica	Caldeira 1	Caldeira 2
Nome	CSC Portugal	CSC Portugal
Modelo	9L	LS15
Ano	1972	1978
Potência (kcal/h)	1700000	1700000
Temperatura máxima (°C)	320	320
Economizador	Externo	Externo
Unidade de chama		
Marca	WEISHAAPT	WEISHAAPT
Modelo	G8/1-D	G8/1-D
Tipo	2 Chamas	2 Chamas
Combustível	Gás natural	Gás natural
Chaminé	Individual em aço	Individual em aço

Tabela B.2. Características técnicas do compressor existente na fábrica de revestimentos

Característica	
Marca	Ingersoll-Rand
Modelo	Nirvana N37
Tipo	Parafuso em banho de óleo
Quantidade	1
Ano	2005
Potência do motor (kW)	37
Capacidade (m ³ /min)	6,6
Consumo específico nominal (kWh/m ³)	0,093
Regulação	Velocidade variável
Arrefecimento	Ar

Na Tabela B.3. são apresentadas as características das três estufas do Recobrimento 1 da fábrica de revestimentos.

Tabela B.3. Características das estufas do Recobrimento 1.

Estufa	1^a	2^a	3^a
Comprimento (m)	3,20	8,40	8,0
Largura (m)	2,70	3,0	3,20
Altura (m)	2,10	1,70	1,80
Número de zonas com temperatura controlada	1	2	2
Número de permutadores	2	4	4

Na Tabela B.4. são apresentadas as características das quatro estufas do Recobrimento 2 da fábrica de revestimentos.

Tabela B.4. Características das estufas do Recobrimento 2.

Estufa	1^a	2^a	3^a	4^a
Comprimento (m)	6,0	6,0	12,0	12,0
Largura (m)	2,70	3,0	2,70	3,20
Altura (m)	1,80	1,70	1,80	1,80
Número de zonas com temperatura controlada	2	2	3	2
Número de permutadores	4	4	6	4

Na Tabela B.5 são apresentadas as características dos dois permutadores da primeira estufa do Recobrimento 1 da fábrica de revestimentos.

Tabela B.5. Características dos dois permutadores da primeira estufa do Recobrimento 1.

Características dos permutadores	
Tipo de permutador	Compacto de tubos cilíndricos com alhetas individuais
Número de tubos	42
Disposição dos tubos	Duas filas com 9 tubos
	Três filas com 8 tubos
Número de passagens do termofluido nos tubos	3
Comprimento do tubo (m)	1,80
Diâmetro externo s/ alheta (m)	0,0215
Diâmetro externo c/ alheta (m)	0,040
Número de alhetas	200
Espaçamento entre alhetas (m)	0,003
Espessura da alheta (m)	0,006

Na Tabela B.6 são apresentadas as características dos permutadores da segunda estufa do Recobrimento 1 e da segunda estufa do Recobrimento 2.

Tabela B.6. Características dos permutadores da segunda estufa do Recobrimento 1 e da segunda estufa do Recobrimento 2.

Características dos permutadores	
Tipo de permutador	Compacto de tubos cilíndricos com alhetas individuais
Número de tubos	54
Disposição dos tubos	9 Tubos/ fila
	6 Filas
Número de passagens do termofluido nos tubos	1
Comprimento do tubo (m)	0,850
Diâmetro externo s/ alheta (m)	0,025
Diâmetro externo c/ alheta (m)	0,060
Número de alhetas	106,3
Espaçamento entre alhetas (m)	0,002
Espessura da alheta (m)	0,006

Na Tabela B.7 são apresentadas características dos permutadores na terceira estufa do Recobrimento 1 e quarta estufa do Recobrimento 2.

Tabela B.7. Características dos permutadores na terceira estufa do Recobrimento 1 e quarta estufa do Recobrimento 2.

Características dos permutadores	
Tipo de permutador	Compacto de tubos com forma elíptica com alhetas individuais de secção rectangular
Número de tubos	57
Disposição dos tubos	3 Tubos/ fila
	19 Filas
Número de passagens do termofluido nos tubos	4
Comprimento do tubo (m)	1,60
Diagonal maior (m)	0,040
Diagonal menor (m)	0,014
Número de alhetas	624
Espaçamento entre alhetas (m)	0,003
Espessura da alheta (m)	0,006

Na Tabela B.8 são apresentadas características dos permutadores da primeira e terceira estufas do Recobrimento 2.

Tabela B.8. Características dos permutadores da primeira e terceira estufas do Recobrimento 2.

Características dos permutadores	
Tipo de permutador	Compacto de tubos cilíndricos com alhetas individuais
Número de tubos	36
Disposição dos tubos	9 Tubos/ fila
	4 Filas
Número de passagens do termofluido nos tubos	3
Comprimento do tubo (m)	1,80
Diâmetro externo s/ alheta (m)	0,021
Diâmetro externo c/ alheta (m)	0,040
Número de alhetas	300
Espaçamento entre alhetas (m)	0,003
Espessura da alheta (m)	0,006

B.2. Instrumentação de medida

Os instrumentos de medida foram utilizados nas medições de temperatura e efectuadas no sector J da fábrica de revestimentos. As características deste equipamento encontram-se na Tabela B.9.

Tabela B.9. Características da câmara termográfica utilizada nas medições efectuadas no sector J da fábrica de revestimentos.

Características	
Modelo da câmara	Ti25
Fabricante	Fluke
Número de série da câmara	Ti25-08031091
Descrição da lente	20mm
Número de série da lente	-
Versão DSP	1.0.7
Versão OCA	1.0.7.0

C. Medições efectuadas

Neste Anexo são apresentados os valores obtidos nas medições efectuadas no Recobrimento 1 e 2.

Na Tabela C.1 e Tabela C.2 são apresentados os valores das medições efectuadas na primeira estufa do Recobrimento 1 para as temperaturas e velocidades do ar respectivamente.

Tabela C.1. Medição de temperatura na primeira estufa do Recobrimento 1.

Fluido	Local de medição	T (°C)	Média das temperaturas (°C)
Parede	Vertical	46,9	45,2
		46,7	
		40,4	
		37,6	
		54,3	
Ar	Entrada	41,2	41,0
		37,1	
		44,8	
Ar	Saída	125,0	116,0
		103,3	
		110,1	
		125,4	
Parede	Topo	78,6	72,7
		65,2	
		73,2	
		73,6	
Termofluido	Saída	212,3	212,3
	Entrada	236,3	232,8
		241,0	
		221	
Tela	Entrada	25,0	25,0
	Saída	150,0	150,0
Estufa	Interior	150,0	

Tabela C.2. Medição de velocidade na primeira estufa do Recobrimento 1.

Entrada	$v(m/s)$	$D(m)$	$A(m^2)$	$\dot{m}(m^3/s)$	$\dot{m}_{médio}(m^3/s)$	$\dot{m}_{total}(m^3/s)$
1ª	1,9	0,28	0,038	0,072	0,072	0,14
2ª	2,0	0,275	0,037	0,075	0,073	
	1,9			0,071		

Na Tabela C.3 e Tabela C.4 e são apresentados os valores das medições efectuadas na segunda estufa do Recobrimento 1 para as temperaturas e velocidades do ar respectivamente.

Tabela C.3. Medição de temperatura na segunda estufa do Recobrimento 1.

Fluido	Local de medição	T (°C)	Média das temperaturas (°C)
Termofluido	Entrada	238,5	227,3
		250,5	
		225,4	
		222,9	
		209,4	
		222,9	
	221,2		
	Saída	197	198,2.
199,4			
Ar	Entrada	36,4	34,9
		33,3	
Ar	Saída	103,6	103,0
		88,1	
		89,5	
		130,6	
Parede	Lateral	32,8	47,6
		43,8	
		46	
		49,6	
		45,2	
Tela	Entrada	40,0	40,0
	Saída	150,0	150,0
Estufa	Interior	150,0	

Tabela C.4. Medição de velocidade na segunda estufa do Recobrimento 1.

Entrada	$v(m/s)$	$D(m)$	$A(m^2)$	$\dot{m}(m^3/s)$	$\dot{m}_{médio}(m^3/s)$	$\dot{m}_{total}(m^3/s)$
1ª	2,4	0,21	0,035	0,083	0,08	0,25
	2,2			0,077		
	2,6			0,090		
2ªa	5,0	0,21	0,035	0,173	0,16	0,25
	4,5			0,156		

Na Tabela C.5 e Tabela C.6 são apresentados os valores das medições efectuadas na terceira estufa do Recobrimento 1 para as temperaturas e velocidades do ar respectivamente.

Tabela C.5. Medição de temperatura na terceira estufa do Recobrimento 1.

Fluido/local	Local de medição	T (°C)	Média das temperaturas (°C)
Ar	Entrada	32,3	40,9
		40,2	
		50,7	
		36,9	
		44,6	
	Saída	127,6	115,2
125,9			
92,1			
Parede	Lateral	78,2	83,6
		102,3	
		70,3	
	Topo	75,1	76,1
		86,1	
		67,2	
Termofluido	Entrada	246,6	241,6
		234,7	
		243,5	
	Saída	200,2	200,2
Tela	Entrada	40,0	40,0
	Saída	195,0	195,0
Estufa	Interior		195,0

Tabela C.6. Medição de velocidade na terceira estufa do Recobrimento 1.

Entrada	$v(m/s)$	$D(m)$	$A(m^2)$	$\dot{m}(m^3/s)$	$\dot{m}_{m\u00e9dio}(m^3/s)$	$\dot{m}_{total}(m^3/s)$
1 ^a	0,50	0,40	0,1782	0,089	0,10	0,32
	0,60			0,107		
	0,70			0,125		
	0,40			0,071		
2 ^a	0,30			0,053	0,05	
	0,40			0,071		
	0,10			0,018		
3 ^a	0,7			0,125	0,13	
	0,60			0,107		
	0,90			0,160		
4 ^a	0,30			0,053	0,04	
	0,20			0,036		

Na Tabela C.7 e Tabela C.8 são apresentados os valores das medições efectuadas na primeira estufa do Recobrimento 2 para as temperaturas e velocidades do ar respectivamente.

Tabela C.7. Medição de temperatura na primeira estufa do Recobrimento 2.

Fluido	Local de medição	T (°C)	M\u00e9dia das temperaturas (°C)
Ar	Entrada	39,8	41,9
		46,1	
		40,4	
		41,3	
	Sa\u00edda	55,1	61,2
		62,6	
		58,4	
		68,8	
Parede	Lateral	41,3	48,1
		46,2	
		57,1	
		47,8	
Termofluido	Entrada	190,3	226,8
		262,2	
		260,6	
	Sa\u00edda	180,2	178,9
		187,4	
Tela	Entrada	25,0	25,0
	Sa\u00edda	80,0	80,0
Estufa	Interior		80,0

Tabela C.8 Medição de velocidade na primeira estufa do Recobrimento 2.

Entrada de ar	$v(m/s)$	$D(m)$	$A(m^2)$	$\dot{m}(m^3/s)$	$\dot{m}_{médio}(m^3/s)$	$\dot{m}_{total}(m^3/s)$
1ª	1,5	0,28	0,0616	0,092	0,073	0,56
	0,9			0,054		
2ª	3,0			0,185	0,188	
	3,1			0,191		
3ª	2,4			0,148	0,114	
	1,3			0,080		
4ª	3,5			0,216	0,185	
	2,7			0,166		
	2,8	0,172				

Na Tabela C.9 e Tabela C.10 são apresentados os valores das medições efectuadas na segunda estufa do Recobrimento 2 para as temperaturas e velocidades do ar respectivamente.

Tabela C.9. Medição de temperatura na segunda estufa do Recobrimento 2.

Fluido	Local	T (°C)	Média das temperaturas (°C)
Ar	Saída	90,3	86,5
		82,7	
	Entrada	36,0	36,0
Parede	Lateral	52,6	54,5
		53	
		58	
Termofluido	Entrada	265,1	265,2
		265,3	
	Saída	178,9	178,9
Tela	Entrada	40,0	40,0
	Saída	150,0	150,0
Estufa	Interior	150,0	

Tabela C.10. Medição de velocidade na segunda estufa do Recobrimento 2.

Entrada de ar	$v(m/s)$	$D(m)$	$A(m^2)$	$\dot{m}(m^3/s)$	$\dot{m}_{médio}(m^3/s)$	$\dot{m}_{total}(m^3/s)$
1ª	8,5	0,21	0,035	0,294	0,303	0,86
	9,0			0,312		
2ª	16,0			0,554	0,606	
	19,0			0,658		

Tabela C.12. Medição de velocidade na terceira estufa do Recobrimento 2.

Entrada de ar	$v(m/s)$	D (m)	A (m ²)	\dot{m} (m ³ /s)	$\dot{m}_{\text{médio}}$ (m ³ /s)	\dot{m}_{total} (m ³ /s)
1 ^a	3,5	0,28	0,0616	0,22	0,23	1,38
	4			0,25		
2 ^a	1,4			0,09	0,10	
	1,8			0,11		
3 ^a	1,6			0,10	0,10	
	1,8			0,11		
4 ^a	4,5			0,28	0,28	
5 ^a	6			0,37	0,37	
6 ^a	4,7			0,29	0,30	
	5			0,31		

D. Resultados

Neste Anexo são apresentados os resultados obtidos nas recomendações de melhoria e na reengenharia do processo de secagem.

Tabela D.1. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.

Local	Qt.	Tipo de válvula	L (m)	D (m)	A (m ²)	h (W/m ² K)	R _a D	Nu	β (K ⁻¹)	ν (m ² /s)	α (m ² /s)	Pr	K (W/m K)	Perda energia (W)	Poupança energia	
															W	€/ano
Colector ida	2	DN 150	1,60	0,285	0,753	6,41	2,91E7	37,6	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	209,3	7669,88	1042,90
Colector retorno	2													209,3	7669,88	1042,90
CT 9L	3													313,9	11504,83	1564,35
CT LS15	3													313,9	11504,83	1564,35
Linha R1	2	DN 125	1,22	0,250	0,479	6,84	1,96E7	33,4	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	139,2	4182,40	568,69
	5	DN 40	1,03	0,150	0,130	13,61	4,24E6	21,3	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	160,0	4623,66	628,70
	4	DN 40 3 vias												157,9	4689,79	637,69
	4	DN 32	1,16	0,140	0,117	16,03	3,44E6	20,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	132,3	3797,59	516,37
	1	DN 25	1,07	0,115	0,084	17,32	1,91E6	16,9	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	25,5	726,97	98,85
	1	DN 32 3 vias	1,16	0,140	0,117	16,03	3,44E6	20,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	33,1	949,40	129,09

Tabela D.2. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.

Local	Qt.	Tipo de válvula	L (m)	D (m)	A (m ²)	h (W/m ² K)	R _a D	Nu	β (K ⁻¹)	ν (m ² /s)	α (m ² /s)	Pr	K (W/m K)	Perda energia (W)	Poupança energia	
															W	€/ano
Linha R2	1	DN 80	1,03	0,200	0,258	8,76	1,00E7	27,4	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	44,9	1600,09	217,57
	1	DN 15	1,47	0,095	0,069	24,55	1,08E6	14,4	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	534,9	1454,39	197,76
	2	DN 50 3 vias	0,96	0,165	0,151	11,83	5,64E6	23,1	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	66,5	2320,54	315,53
	14	DN 32	1,16	0,140	0,117	16,03	3,44E6	20,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	463,2	15843,74	2154,33
	5	DN 32 3 vias	1,16	0,140	0,117	16,03	3,44E6	20,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	165,4	5658,48	769,40
	4	DN 50	0,96	0,165	0,151	83,15	1,76E8	65,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	779,3	2314,89	314,76
	2	DN 40 3 vias	1,03	0,150	0,130	13,61	4,24E6	21,3	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	115,0	2210,63	300,59
	1	DN 40	1,03	0,150	0,130	13,61	4,24E6	21,3	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	32,0	1105,31	150,29

Tabela D.3. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.

Local	Qt.	Tipo de válvula	L (m)	D (m)	A (m ²)	h (W/m ² K)	R _a D	Nu	β (K ⁻¹)	ν (m ² /s)	α (m ² /s)	Pr	K (W/m K)	Perda energia (W)	Poupança energia	
															W	€/ano
Linha G1	2	DN 100	1,12	0,22	0,352	7,63	1,34E7	29,8	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	110,6	3297,79	448,41
	3	DN 50	0,96	0,165	0,151	11,83	5,64E6	23,1	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	99,8	2904,79	394,97
	1	DN 50 3 vias	0,96	0,165	0,151	11,83	5,64E6	23,1	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	33,3	968,26	131,66
	2	DN 15	1,47	0,095	0,069	24,55	1,08E6	14,4	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	56,9	1598,03	217,29
	1	DN 15 3 vias	1,47	0,095	0,069	24,55	1,08E6	14,4	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	28,5	799,01	108,64
Linha G2	5	DN 50	0,96	0,165	0,151	11,83	5,64E6	23,1	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	166,3	4841,32	658,29
	1	DN 100	1,12	0,22	0,352	7,63	1,34E7	29,8	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	55,3	1648,89	224,21
	1	DN 25	1,07	0,115	0,084	17,32	1,91E6	16,9	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	25,5	726,97	98,85
	5	DN 20	1,24	0,105	0,078	20,04	1,45E6	15,6	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	133,8	3787,96	515,06
	1	DN 20 3 vias	1,24	0,105	0,078	20,04	1,45E6	15,6	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	26,8	757,59	103,01

Tabela D.4. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.

Local	Qt.	Tipo de válvula	L (m)	D (m)	A (m ²)	h (W/m ² K)	R _a D	Nu	β (K ⁻¹)	ν (m ² /s)	α (m ² /s)	Pr	K (W/m K)	Perda energia (W)	Poupança energia	
															W	€/ano
Linha E1	2	DN 32	1,16	0,140	0,117	16,03	3,44E6	20,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	66,2	1898,80	258,19
	1	DN 32 3 vias	1,16	0,140	0,117	16,03	3,44E6	20,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	33,1	949,40	129,09
Linha E2	2	DN 40	1,03	0,150	0,130	13,61	4,24E6	21,3	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	64,0	1849,47	251,48
	1	DN 40 3 vias	1,03	0,150	0,130	13,61	4,24E6	21,3	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	32,0	924,73	125,74
Linha E3	2	DN 80	1,03	0,200	0,258	8,76	1,00E7	27,4	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	89,7	3200,18	435,14
	4	DN 20	1,24	0,105	0,078	20,04	1,45E6	15,6	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	107,0	3601,03	489,64
	1	DN 20 3 vias	1,24	0,105	0,078	20,04	1,45E6	15,6	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	26,8	900,26	122,41
	15	DN 32	1,16	0,140	0,117	16,03	3,44E6	20,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	496,3	16975,44	2308,21
	3	DN 32 3 vias	1,16	0,140	0,117	16,03	3,44E6	20,0	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	99,3	3395,09	461,64

Tabela D.5. Resultados calculados para as perdas e poupança de energia após a aplicação de isolamento.

Local	Qt.	Tipo de válvula	L (m)	D (m)	A (m ²)	h (W/m ² K)	R _a D	Nu	β (K ⁻¹)	ν (m ² /s)	α (m ² /s)	Pr	K (W/m K)	Perda energia (W)	Poupança energia	
															W	€/ano
Linha da Lagem	3	DN 50	0,96	0,165	0,151	11,83	5,64E6	23,1	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	99,8	2904,79	394,97
	1	DN 50 3 vias	0,96	0,165	0,151	11,83	5,64E6	23,1	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	33,3	968,26	131,66
Linha da Máquina Piloto	1	DN 50	0,96	0,165	0,151	11,83	5,64E6	23,1	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	33,3	968,26	131,66
	6	DN 25	1,07	0,115	0,084	17,32	1,91E6	16,9	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	153,0	4361,83	593,09
	2	DN 25 3 vias	1,07	0,115	0,084	17,32	1,91E6	16,9	0,003	1,64E-5	2,33E-5	0,71	0,026	51,0	1453,94	197,70

Da Tabela D.6 à Tabela D.9 encontram-se os resultados obtidos para a reengenharia do processo de secagem.

Tabela D.6 Valores obtidos nos cálculos efectuados às três estufas do Recobrimento 1

	ESTUFA 1		ESTUFA 2		ESTUFA 3	
	Parede vertical	Parede horizontal	Parede vertical	Parede Horizontal	Parede vertical	Parede horizontal
$\beta(K^{-1})$	0,0032	0,0031	0,0032	0,0032	0,0031	0,0031
$v(m^2/s)$	1,60E-05	1,76E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,82E-05	1,78E-05
L (m)	2,10	3,20	8,40	3,00	1,80	8,00
$g(m^2/s)$	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80
$T_{sup}(^{\circ}C)$	45,2	72,7	47,6	47,6	83,6	76,1
$T_{\infty}(^{\circ}C)$	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
$T_m(K)$	308,1	321,8	309,3	309,3	327,3	323,6
Pr	0,71	0,70	0,71	0,71	0,70	0,70
$\alpha(m^2/s)$	2,37E-5	2,57E-5	2,39E-5	2,39E-5	2,65E-5	2,60E-5
$k(W/mk)$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
R_{aL}	1,57E10	1,05E11	1,10E12	5,03E10	2,11E10	1,72E12
Nu	290,9	707,9	1142,1	553,8	319,4	1795,5
h ($W/m^2^{\circ}C$)	3,73	6,17	3,67	4,98	5,03	6,29
$Q_{conv}(W)$	6947,57		7400,87	6057,33	28352,97	
$Q_{rad}(W)$	1628,41		2304,18	2304,18	6660,50	
$Q_{ar}(W)$	11130,34		18421,70	17849,99	25263,16	
$Q_{tela}(W)$	6866,13		8694,00	8694,00	3992,63	
$Q_{gelificação}(W)$	631,75		897,75	897,75	330,75	
$Q_{termofluido}(W)$	26572,44		36820,75	34905,51	64269,26	
$\dot{m}_{termofluido}(kg/s)$	0,0133		0,0016		0,0075	
$v(m/s)$	0,068		0,006		0,026	
Re	1024,99		100,07		408,48	
Gz	255,65		63,80		122,54	
Pr	25,65		25,81		25,69	
N_{um}	11,80		7,43		9,24	
h_i ($W/m^2^{\circ}C$)	86,54		46,21		63,61	

Tabela D.7. Valores obtidos nos cálculos efectuados às três estufas do Recobrimento 1 (continuação).

	ESTUFA 1		ESTUFA 2		ESTUFA 3	
	Parede vertical	Parede horizontal	Parede vertical	Parede Horizontal	Parede vertical	Parede horizontal
A_{\min} (m ²)	0,56		0,11		0,05	
v_{\max} (m/s)	0,26		2,35		6,71	
Re	489		7041		19154	
Nu	12,38		67,38		127,13	
h_e (W/m ² °C)	9,32		79,24		63,73	

Tabela D.8 Valores obtidos nos cálculos efectuados às três estufas do Recobrimento 2.

	ESTUFA 1	ESTUFA 2	ESTUFA 3
	Parede vertical	Parede vertical	Parede vertical
β (K ⁻¹)	0,0032	0,0032	0,0032
v (m ² /s)	1,61E-5	1,65E-5	1,66E-5
L (m)	2,00	2,00	2,00
g (m ² /s)	9,8	9,8	9,8
T_{sup} (°C)	48,1	54,5	56,0
T_{∞} (°C)	25,0	25,0	25,0
T_m (K)	309,6	312,8	313,5
Pr	0,71	0,71	0,71
α (m ² /s)	2,39E-5	2,44E-5	2,45E-5
k (W/mk)	0,03	0,03	0,03
R_{aL}	1,52E10	1,84E10	1,90E10
Nu	287,6	305,7	309,1
h (W/m ² °C)	3,88	4,16	4,22
Q_{conv} (W)	6028,26	7354,89	16138,12
Q_{rad} (W)	1777,75	2514,00	4554,46
Q_{ar} (W)	12088,48	47755,14	91980,26
Q_{tela} (W)	587,81	1624,22	3124,69
$Q_{\text{solventes}}$ (W)	3008,52	2738,61	5886,57
$Q_{\text{termofluido}}$ (W)	23090,82	61986,85	121684,10
$\dot{m}_{\text{termofluido}}$ (kg/s)	0,0031	0,0011	0,006

Tabela D.9. Valores obtidos nos cálculos efectuados às três estufas do Recobrimento 2 (continuação).

	ESTUFA 1	ESTUFA 2	ESTUFA 3
	Parede vertical	Parede vertical	Parede vertical
$v(\text{m/s})$	0,017	0,004	0,035
Re	219,70	74,70	525,76
Gz	53,73	50,85	126,80
Pr	25,9	27,6	25,5
N_{um}	7,02	6,89	9,34
h_i ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	54,86	41,40	69,80
A_{min} (m^2)	1,31	0,11	1,96
v_{max} (m/s)	0,46	8,97	0,78
Re	477	9981	1282
Nu	12,2	83,8	22,7
h_e ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	8,88	43,24	18,35

E. Exemplo de cálculo

Neste Anexo, são apresentados os exemplos de cálculo de cada um dos resultados apresentados.

E.1. Energia térmica

Neste item é apresentado o exemplo de cálculo para determinar a perda de energia nas válvulas não isoladas e o rendimento das caldeiras.

Perda de energia nas válvulas

O exemplo que se segue refere-se à perda de energia nas duas válvulas não isoladas do colector de ida de termofluido. As correlações utilizadas no cálculo das perdas de energia nas válvulas têm como fonte: Incropera & DeWitt, 2003 .

Estas válvulas são em aço e são do tipo DN 150.

Considere-se que o calor é perdido por radiação e convecção na válvula que está à temperatura T_{sup} para o ambiente que está à temperatura T_{∞} . Na radiação considera-se um pequeno corpo num grande espaço. Para determinar a perda de energia nas válvulas utiliza-se a Equação E.1

$$Q_{perdido} = h \cdot A \cdot (T_{sup} - T_{\infty}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{sup}^4 - T_{\infty}^4)$$

Equação E.1

Para tal é necessário determinar a área de transferência de calor (A), através da Equação E.2

$$A = \pi \times D \times L$$

Equação E.2

Em que A é a área externa e L é o comprimento equivalente da válvula. Contudo o comprimento equivalente não é conhecido portanto vai admitir-se que a válvula é constituída por dois cilindros, tal como se pode verificar na Figura E.1.

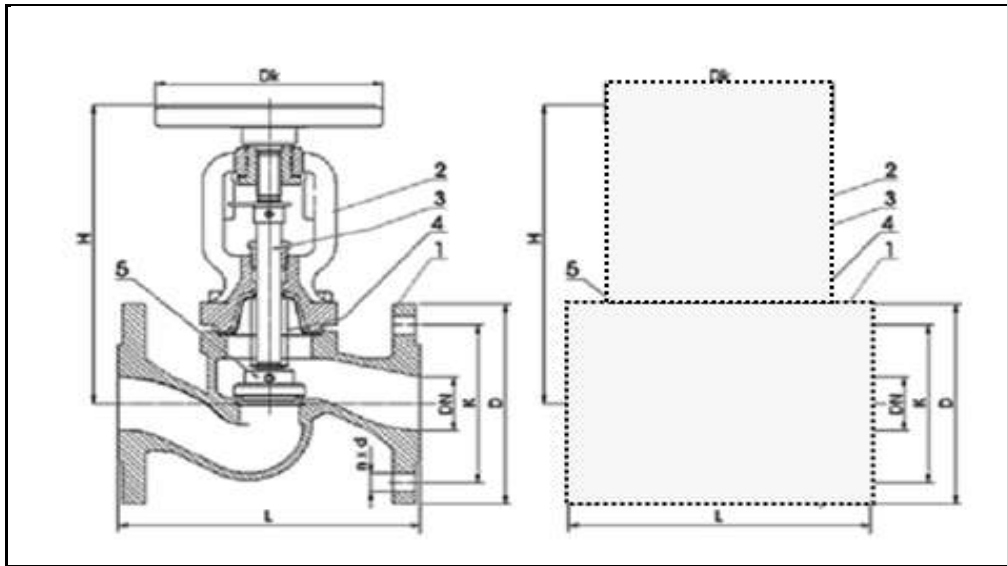


Figura E.1. Representação esquemática de uma válvula.

Desta forma, a área de transferência de calor utilizada no cálculo das perdas de energia é determinada pela Equação E.3.

$$A = \pi \times D \times L + \pi \times D_k \times \left(H - \frac{D}{2} \right)$$

Equação E.3

As dimensões são as que constam na Figura E.1 e têm diferentes valores conforme o tipo de válvula (Ver Tabela E.1).

Tabela E.1. Dimensões de diferentes tipos de válvulas. (ZETKAMA - Válvulas Industriais)

DN (mm)	L (mm)	DK = H (mm)	D (mm)	DN (mm)
DN15	130	125	95	15
DN20	150	125	105	20
DN25	160	125	115	25
DN32	180	150	140	32
DN40	200	150	150	40
DN50	230	150	165	50
DN80	310	200	200	80
DN100	350	250	220	100
DN125	400	300	250	125
DN150	480	400	285	150

No caso do colector de ida de termofluido as válvulas são do tipo DN 150, ou seja, a área de transferência de calor pode ser calculada substituindo as respectivas dimensões na Equação E.3.

$$A = \pi \times 285 \times 10^{-3} \times 480 \times 10^{-3} + \pi \times 400 \times 10^{-3} \times \left(400 - \frac{285}{2}\right) \times 10^{-3} = 0,753 \text{ m}^2$$

Para determinar as perdas de energia também é necessário estimar o coeficiente pelicular de transferência de calor externo, utilizando a Equação E.4

$$Nu = \frac{h D}{k}$$

Equação E.4

Em que D é o diâmetro da válvula e k a condutividade térmica da válvula.

Considera-se um cilindro longo horizontal, sendo o número de Nusselt (Nu) determinado pela correlação desenvolvidas por *Churchill* e *Chu* que se encontra na Equação E.5.

$$Nu = \left(060 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2$$

Equação E.5

Para determinar o número de Nusselt (Nu) é necessário conhecer previamente o número de Rayleigh (Ra_L), que é calculado pela Equação E.6.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{sup} - T_{\infty})L^3}{\alpha\nu}$$

Equação E.6

Em que L é uma dimensão característica representado, neste caso, pelo diâmetro externo da válvula designado a cima como DN .

Substituindo as propriedades do ar, obtém-se:

$$Ra_L = \frac{9,8 \times 2,37 \times 10^{-3} (544,2 - 298) \times (285 \times 10^{-3})^3}{4,21 \times 10^{-5} \times 2,89 \times 10^{-5}} = 1,09 \times 10^8$$

Substituindo todos os valores na Equação E.5, obtém-se o número de Nusselt (Nu):

$$Nu = \left(060 + \frac{0,387 \cdot (1,09 \times 10^8)^{1/6}}{[1 + (0,688)^{9/16}]^{8/27}} \right)^2 = 55,9$$

Depois de determinar o número de Nusselt é possível estimar o coeficiente pelicular de transferência de calor externo pela substituição de todos os valores na Equação E.4.

$$55,9 = \frac{h \times 285 \times 10^{-3}}{0,053}$$

$$h = 13,15 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Por fim, é possível determinar a perda de energia nas válvulas substituindo todos os valores na Equação E.1

$$Q_{perdido} = [13,15 \times 0,753 \times (544,2 - 298) + 0,44 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot (544,2^4 - 298^4)] \times 2$$

$$Q_{perdido} = 7879,2 \text{ W}$$

Como a fábrica de revestimentos trabalha 4140h/ano, pode-se determinar a energia perdida num ano:

$$Q_{perdido} = 7879,2 \text{ W} \times 4140 \frac{\text{h}}{\text{ano}} \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 32 \ 619,72 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}}$$

Rendimento da caldeira

O cálculo do rendimento vai exemplificado para a caldeira 9L com a capacidade mínima.

Foi necessário a análise dos gases de escape que se encontra Tabela 2.1 do Capítulo 2.

O método utilizado no cálculo do rendimento das caldeiras é o Método Indirecto, obtido através da Equação E.7.

$$\eta = 100 - \sum \text{Perdas}$$

Equação E.7

As perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes (P_{cv}) e associadas ao combustível nas cinzas de fundo (P_{cf}) são zero, porque não foi detectado monóxido de carbono (CO) na análise aos gases de escape.

As perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustão (P_{gc}) são calculadas pela Equação E.8.

$$P_{gc} = \frac{K(T_g - T_a) \cdot (1 - \frac{P_{cv} + P_{cf}}{100})}{CO_2}$$

Equação E.8

Contudo, é necessário calcular o valor da constante que depende do combustível (K), através da Equação E.9

$$K = \frac{255C}{PCI}$$

Equação E.9

Calculou-se o valor da percentagem em peso de carbono presente no combustível, através da Equação E.10.

$$\%C = \frac{m_c}{m_{gás\ natural}} \times 100$$

Equação E.10

Soube-se que a composição de gás natural é a que se encontra na Tabela E.2.

Tabela E.2. Composição do gás natural. (Penínsulagás)

Componente	Fracção molar (y_i)	Massa molar (M_i)
CH ₄	0,865	16,05
C ₂ H ₆	0,094	30,08
C ₃ H ₈	0,026	44,11
C ₄ H ₁₀	0,011	58,14
C ₅ H ₁₂	0,001	72,17
N ₂	0,003	28,02

$$m_{gás\ natural} = \sum_n^{i=1} y_i \cdot M_i$$

$$m_{gás\ natural} = 0,865 \times 16,05 + 0,094 \times 30,08 + 0,026 \times 44,11 + 0,011 \times 58,14 + 0,001 \times 72,17 + 0,003 \times 28,02 = 18,65\ g$$

$$m_c = \sum_n^{i=1} y_i \cdot M(C)$$

$$m_c = 0,865 \times 12,01 + 0,094 \times 12,01 \times 2 + 0,026 \times 12,01 \times 3 + 0,011 \times 12,01 \times 4 + 0,001 \times 12,01 \times 5$$

$$m_C = 14,17 \text{ g}$$

Substituindo na Equação E.10, obtém-se a percentagem em carbono

$$\%C = \frac{14,17}{18,65} \times 100 = 75,97$$

Sabendo a percentagem de carbono (%C) e que o poder calorífico inferior (PCI) do gás natural é 45097,57 kJ/kg, pode-se calcular o valor da constante que depende do combustível (K), através da Equação E.9.

$$K = \frac{255 \times 75,97}{45097,57} = 0,43$$

Substituindo todos os valores é possível calcular as perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustão (P_{gc}) através da Equação E.8.

$$P_{gc} = \frac{0,43 \times ((247,5 - 25) \cdot (1 - 0))}{8,9} = 10,7$$

As perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão são calculadas pela Equação E.11.

$$P_{H_2O} = \frac{(m_{H_2O} + 9H) \cdot (210 - 4,2 \cdot T_a + 2,1 \cdot T_g)}{PCI}$$

Equação E.11

Contudo, é necessário determinar a percentagem de hidrogénio no gás natural pela Equação E.12

$$\% H = \frac{m_H}{m_{gás\ natural}} \times 100$$

Equação E.12

$$m_H = \sum_n^{i=1} y_i \cdot M(H)$$

$$m_H = 0,865 \times 1,01 \times 4 + 0,094 \times 1,01 \times 6 + 0,026 \times 1,01 \times 8 + 0,011 \times 1,01 \times 10 + 0,001 \times 1,01 \times 12 = 4,40 \text{ g}$$

Substituindo na Equação E.12, obtém-se a percentagem de hidrogénio no combustível

$$\% H = \frac{4,40}{18,65} \times 100 = 23,58$$

Substituindo todos os valores na Equação E.11. é possível determinar as perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão.

$$P_{H_2O} = \frac{(0 + 9 \times 23,58) \cdot (210 - 4,2 \times 25 + 2,1 \times 247,5)}{45097,57} = 2,9$$

Como a caldeira da fábrica de revestimentos não trabalha na capacidade nominal as perdas por radiação e convecção são calculadas através da Equação E.13.

$$\% \text{ Perdas radiação . convecção} = \frac{\text{Carga nominal}}{\text{Carga real}}$$

Equação E.13

Sabendo que a capacidade máxima é de:

$$Q_v = 1,7 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

Convertendo para unidades SI a capacidade máxima fica:

$$Q_v = 1,7 \times 10^6 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{4,18 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \times \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} = 1,97 \times 10^6 \text{ J/s}$$

$$Q_v = 1,97 \times 10^6 \text{ W} \times \frac{1 \text{ MW}}{10^6 \text{ W}} = 1,97 \text{ MW}$$

Sabendo que quando a caldeira trabalha no mínimo a carga real corresponde a 57% do valor nominal, ou seja,

$$\text{Carga real} = 0,57 \times 1,97 \times 10^6 = 1,13 \times 10^6 \text{ W}$$

$$\% \text{ Perdas radiação . convecção} = \frac{1,13 \times 10^6}{1,97 \times 10^6} = 1,8$$

Depois de calculadas as perdas pode-se determinar o rendimento da caldeira através da Equação E.7.

$$\eta = 100 - (10,7 + 2,9 + 1,8) = 84,6\%$$

Excesso de ar

A percentagem de excesso de ar é determinada pela Equação E.14

$$\%Excesso\ de\ ar = \frac{\% O_2}{21 - \% O_2}$$

Equação E.14

Substituindo a percentagem de oxigénio (% O_2), cujo valor se encontra na Tabela 2.1, obtém-se:

$$\%Excesso\ de\ ar = \frac{5,3}{21 - 5,3} = 33,8$$

E.2. Produção

Neste item é apresentado o exemplo de cálculo para determinar a produção de artigos de PV e PU na fábrica de revestimentos.

Artigos em PU

O exemplo de cálculo para a produção de artigos de PU apresentado refere-se ao mês de Janeiro em que foram produzidos 14566 ml (este valor encontra-se na Tabela A.10 do Anexo A.3.). Para o cálculo da produção em m^2 foi utilizada a Equação E.15 tendo em consideração que o factor de conversão é igual a 1,4.

$$\text{Produção (m}^2\text{)} = \text{Produção(ml)} \times 1,4 \text{ (m}^2\text{/ml)}$$

Equação E.15

Substituindo os respectivos valores na Equação E.15, obtém-se:

$$\text{Produção de PU} = 14566 \times 1,4 = 20392,4 \text{ m}^2$$

Artigos em PVC

O exemplo de cálculo para a produção de artigos de PVC apresentado refere-se ao mês de Janeiro em que foram produzidos 102341 ml (este valor encontra-se na Tabela A.10 do Anexo A.3.) Para o cálculo da produção em m^2 foi utilizada a Equação E.15 tendo em consideração que o factor de conversão é igual a 1,4, obtendo-se:

$$\text{Produção de PVC} = 102341 \times 1,4 = 143277,4 \text{ m}^2$$

E.3. Distribuição dos consumos

Gás natural

O exemplo de cálculo para o gás natural apresentado refere-se ao mês de Janeiro em que o consumo de gás natural foi de 53458 m^3 (este valor encontra-se na

Tabela 2.6 do Subcapítulo 2.4.). Nas conversões efectuadas foram utilizados os factores de conversão da Tabela G.1 do Anexo G, de acordo com o Despacho 17313 de 26 de Junho de 2008.

❖ **Cálculo da massa de gás natural**

Para converter o consumo de gás natural de volume em massa utiliza-se a Equação E.16, e considerando que:

$$\rho_{\text{gás natural}} = 0,8404 \text{ kg/m}^3\text{N}$$

$$\rho(\text{kg/m}^3) = \frac{m}{V}$$

Equação E. 16

Substituindo na Equação E.16, obtém-se:

$$m(\text{gás natural}) = 53458 \times 0,8404 = 44926,10 \text{ kg}$$

$$m(\text{gás natural}) = \frac{44926,10}{1000} = 44,93 \text{ ton}$$

❖ **Conversão da massa gás natural em tep**

Para converter o consumo de gás natural de massa (kg) para energia (tep), utilizou-se a Equação E.17, tendo em conta o Factor de Conversão (FC) correspondente que se encontra na Tabela G.1 do Anexo G.

$$\text{Consumo (tep)} = m(\text{ton}) \times \text{FC(tep/ton)}$$

Equação E. 17

Substituindo os respectivos valores na Equação E.17, obtém-se:

$$\text{Consumo de gás natural} = 44,93 \times 1,077 = 48,4 \text{ tep}$$

❖ **Cálculo do custo do consumo de gás natural em euros (€)**

Para calcular o custo (€) associado ao consumo de gás natural utilizou-se a Equação E.18, tendo em conta que o custo por kg se encontra na Tabela G.1 do Anexo G.

$$\text{Custo (€)} = m(\text{kg}) \times \text{Custo(€/kg)}$$

Equação E. 18

Substituindo os respectivos valores na Equação E.18, obtém-se:

$$\text{Custo do gás natural(€)} = 44926,10 \times 0,401 = 18015,37\text{€}$$

❖ **Cálculo da emissão de gases com efeito de estufa (GEE):**

No cálculo da emissão de gases com efeito de estufa (GEE) utilizou-se a Equação E.19 e o factor de emissão (FE) que se encontra na Tabela G.1 do Anexo G.

$$\text{GEE}(\text{kg CO}_2\text{e}) = \text{Consumo (tep)} \times \text{FE}(\text{kg CO}_2\text{e/tep})$$

Equação E.19

Substituindo os respectivos valores na Equação E.19, obtém-se:

$$\text{GEE} = 48,39 \times 2684 = 129866,4 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Água quente

O exemplo de cálculo para a água quente apresentado refere-se ao mês de Janeiro em que o consumo de água quente foi de 52,9 MWh (este valor pode ser consultado na Tabela 2.7 do subcapítulo 2.4). Nas conversões efectuadas foram utilizados os factores de conversão da Tabela G.2 do Anexo G, de acordo com o Despacho 17313 de 26 de Junho de 2008.

❖ **Conversão do consumo, de água quente, de MWh para tep**

Para converter o consumo de água quente de MWh para tep, utilizou-se a Equação E.20, tendo em conta o factor de conversão correspondente que se encontra na Tabela C.2

$$\text{Consumo (tep)} = \text{Consumo (MWh)} \times \text{FC}(\text{tep/MWh})$$

Equação E.20

Substituindo os respectivos valores na Equação E.20, obtém-se:

$$\text{Consumo de água quente} = 52,9 \times 0,096 = 5,1 \text{ tep}$$

❖ **Cálculo da emissão de gases com efeito de estufa (GEE):**

No cálculo da emissão de gases com efeito de estufa (GEE), utilizou-se a Equação E.19 e o Factor de Emissão (FE) para a água quente que se encontra na Tabela G.2 do Anexo G.

$$\text{GEE}(\text{kg CO}_2\text{e}) = \text{Consumo (tep)} \times \text{FE}(\text{kg CO}_2\text{e/tep})$$

Substituindo os respectivos valores na Equação E.19, obtém-se:

$$\text{GEE} = 5,1 \times 2724 = 13833,6 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Energia eléctrica

O exemplo de cálculo para a energia eléctrica apresentado refere-se ao mês de Janeiro em que o consumo de energia eléctrica foi de 76248 kWh. Nas conversões efectuadas foram utilizados os factores de conversão da Tabela G.3 do Anexo G, de acordo com o Despacho 17313 de 26 de Junho de 2008.

❖ Conversão do consumo, de energia eléctrica, de kWh para MWh

Para converter o consumo de água quente de kWh para MWh utilizou-se a Equação E.21

$$\text{Consumo (MWh)} = \frac{\text{Consumo (KWh)}}{1000}$$

Equação E.21

Substituindo os respectivos valores na Equação E.21, obtém-se:

$$\text{Consumo de E. E.} = \frac{76248}{1000} = 76,248 \text{ MWh}$$

❖ Conversão do consumo, de energia eléctrica, de kWh para tep

Para converter o consumo de energia eléctrica (E.E.) de kWh para tep utilizou-se Equação E.22, tendo em conta o Factor de Conversão (FC) correspondente que se encontra na Tabela G.3 do Anexo G.

$$\text{Consumo (tep)} = \text{Consumo (kWh)} \times \text{FC(tep/kWh)}$$

Equação E.22

Substituindo os respectivos valores na Equação E.22, obtém-se:

$$\text{Consumo de E. E.} = 76248 \times 0,000215 = 16,4 \text{ tep}$$

❖ Cálculo do custo do consumo de energia eléctrica em euros (€)

Para calcular o custo (€) associado ao consumo de energia eléctrica utilizou-se a Equação E.23, tendo em conta que o custo por se encontra na Tabela G.3 do Anexo G.

$$\text{Custo (€)} = \text{Consumo (kWh)} \times \text{Custo(€/kWh)}$$

Equação E.23

Substituindo os respectivos valores na Equação E.23, obtém-se:

$$\text{Custo} = 76248 \times 0,092 = 7014,82€$$

❖ Cálculo da emissão de gases com efeito de estufa (GEE):

No cálculo da intensidade carbónica utilizou-se a Equação E.19 e o factor de emissão (FE) que se encontra na Tabela G.3 do Anexo G.

$$\text{GEE}(\text{kg CO}_2\text{e}) = \text{Consumo (tep)} \times \text{FE}(\text{kg CO}_2\text{e/tep})$$

$$\text{GEE} = 16,4 \times 2186 = 35835,8\text{kg CO}_2\text{e}$$

E.4. Cálculo dos indicadores energéticos

Seguidamente são apresentados os exemplos de cálculo dos indicadores energéticos: consumo específico e intensidade carbónica.

Consumo específico de energia (CEE)

Os consumos específicos de energia apresentam-se de seguida sendo calculados para os artigos de PU e de PVC.

Para determinar os consumos específicos recorre-se à Equação 1.4.

$$\text{Consumo específico} = \frac{\text{Energia (tep)}}{\text{Produção}(\text{m}^2)}$$

Contudo é necessário determinar a energia total no mês de Janeiro, através da Equação E.24.

$$\text{Energia}(\text{tep}) = \text{Consumo de Gás natural} + \text{Consumo de E. E.} + \text{Consumo água quente}$$

Equação E.24

$$\text{Energia} = 48,4 + 5,1 + 16,4 = 69,9 \text{ tep}$$

❖ Artigos de PU

O exemplo de cálculo para o consumo específico de energia para artigos de PU apresentado refere-se ao mês de Janeiro em que foram produzidos 20392,4 m² (este valor encontra-se na Tabela A.10 do Anexo A.3.) e gastos 69,9 tep, em energia. Para este cálculo foi utilizada a Equação 1.4, na qual foram substituídos os respectivos valores, obtendo-se:

$$\text{Consumo específico de energia dos artigos em PU} = \frac{69,9}{20392,4} = 0,0034 \text{ tep/m}^2$$

❖ Artigos de PVC

O exemplo de cálculo para o consumo específico de energia para artigos de PVC apresentado refere-se ao mês de Janeiro em que foram produzidos 143277,4 m² (este valor encontra-se na Tabela A.10 do Anexo A.3.) e gastos 69,9 tep, em energia. Para

este cálculo foi utilizada a Equação 1.4, na qual foram substituídos os respectivos valores, obtendo-se:

$$\text{Consumo específico de energia dos artigos em PVC} = \frac{69,9}{143277,4} = 0,0005 \text{ tep/m}^2$$

Intensidade carbónica (IC)

O exemplo de cálculo que se segue refere-se ao mês de Janeiro, para tal utilizou-se a Equação 1.3,

$$IC = \frac{\text{GEE}(\text{kg CO}_2)}{\text{Energia (tep)}}$$

Sabendo que:

$$\text{GEE}(\text{ gás natural}) = 129866,4 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$\text{GEE}(\text{ água quente}) = 13833,6 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$\text{GEE}(\text{ E. E. }) = 35835,8 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$\text{Consumo total de energia} = 69,86 \text{ tep}$$

Substituindo os valores na Equação 1.3, obtém-se:

$$IC = \frac{129866,4 + 13833,6 + 35835,8}{69,89} = 2570,0 \text{ kgCO}_2\text{/tep}$$

E.5. Recomendações e sugestões de melhoria

Seguidamente são apresentados os exemplos de cálculo referentes ao estudo económico da implementação das recomendações de melhoria na iluminação e no isolamento das válvulas da rede de distribuição de termofluido.

Iluminação

Como sugestão de melhoria, foi estudada a implementação de balastros electrónicos, apresentando-se Equação E.25 a forma de calcular o pay-back do investimento.

$$\text{Pay - back} = \frac{\text{Investimento (€)}}{\text{Poupança económica (€/ano)}}$$

Equação E.25

É necessário calcular o investimento a efectuar com a implementação dos balastros electrónicos, através da Equação E.26.

$$Investimento = \sum_n^{i=0} n^{\circ} \text{ luminárias} \times \text{Custo unitário}(\text{€}) + \text{Mão-de-obra}$$

Equação E.26

Sabendo que as luminárias com potência de 58, 36 e 18W têm o custo de 51,80 €, 40,88 € e 29,68 €, respectivamente, pode calcular-se o investimento através da Equação E.26.

$$Investimento = 181 \times 51,80 + 1 \times 27,90 + 79 \times 40,88 + 14 \times 29,69 + 825,00$$

$$Investimento = 13.873,74\text{€}$$

A poupança económica é calculada pela Equação E.27

$$\text{Poupança económica} (\text{€/ano}) = \text{Poupança energética} (\text{kWh/ano}) \times \text{Custo} (\text{€/kWh})$$

Equação E.27

Para tal é necessário calcular previamente a poupança energética, através da Equação E.28 e sabendo que a implementação desta medida tem economia de 25%.

$$\text{Poupança energética} (\text{kWh/ano}) = \text{Energia consumida} \times 0,25$$

Equação E.28

Substituindo na Equação E.28, obtém-se:

$$\text{Poupança energética} (\text{kWh/ano}) = 113\,924,50 \times 0,25 = 28.481,13$$

Desta forma pode calcular-se a poupança económica substituindo os valores na Equação E.27.

$$\text{Poupança económica} = 28\,481,13 \times 0,092 = 2\,620,26 \text{ €/ano}$$

Por fim, é possível calcular o pay-back através da Equação E.25, obtendo-se.

$$\text{Pay-back} = \frac{13.873,74}{2.620,26} = 5 \text{ anos}$$

Isolamento das válvulas

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos quando se estudou a possibilidade de implementação de isolamento das válvulas.

Para determinar o período pay-back é necessário recorrer à Equação E.25.

$$\text{Pay-back} = \frac{\text{Investimento} (\text{€})}{\text{Poupança económica} (\text{€/ano})}$$

Contudo é essencial determinar a poupança de energia, sendo necessário determinar as perdas de energia com o isolamento, da mesma forma que se efectuou para as perdas de energia sem isolamento (ver Anexo E), mas com a temperatura de superfície de 40°C. Efectua-se a soma da energia total perdida em todos os sectores (válvulas com isolamento Anexo D da Tabela D.1 à Tabela D.5 e válvulas sem isolamento Anexo A da Tabela A.1 à Tabela A.3) e obtém-se:

$$Q_{perdido\ c/isolamento} = 6016,81\ W$$

$$Q_{perdido\ s/isolamento} = 161526,23\ W$$

Para determinar a energia economizada pela colocação de isolamento nas válvulas utiliza-se a Equação E.29.

$$Poupança = Q_{perdido\ s/isolamento} - Q_{perdido\ c/isolamento}$$

Equação E.29

Com os valores de calor perdido com e sem isolamento acima apresentados obtém-se:

$$Poupança = 161526,23 - 6016,81 = 155509,42\ W$$

Para determinar a energia economizada durante um ano utiliza-se a Equação E.30.

$$Poupança(J/ano) = Poupança\ (J/s) \times Tempo(s/ano)$$

Equação E.30

Sabendo que a empresa funciona 4140 horas por ano, obtém-se:

$$Poupança = 155509,42 \times 4140 \times 3600 = 2,32 \times 10^{12}\ J/ano$$

É necessário calcular quanto se vai economizar com este investimento, através Equação E.31.

$$Poupança\ (\text{€/ano}) = \frac{Poupança\ (J/ano) \times Custo_{GN}\ (\text{€}) \times \eta_{caldeira}}{PCI_{GN}\ (J/kg)}$$

Equação E.31

Sabendo que:

$$Custo_{GN} = 0,401\ \text{€/kg}\ (\text{Anexo G, Tabela G.1})$$

$$PCI_{GN} = 4,5 \times 10^7\ J/kg\ (\text{Penínsulagás})$$

$$\eta_{caldeira} = 84\% \ (\text{Média dos rendimentos apresentados na Tabela 2.2 do Capítulo 2})$$

Substitui-se na Equação E.31 e obtém-se:

$$Poupança = \frac{2,32 \times 10^{12} \times 0,401}{4,5 \times 10^7 \times 0,86} = 21.145,14 \text{ €/ano}$$

Para determinar o investimento total, consultou-se fornecedores de isolamento térmico que forneceram os preços que se encontram na Tabela E.3.

Tabela E.3. Preços do isolamento de válvulas. (Portugalisol, 2010)

Tipo de válvula	Preço (€/ml)
DN150	27,30
DN125	22,17
DN100	20,96
DN80	19,55
DN50	17,93
DN40	14,11
DN32	13,70
DN25	13,40
DN20	10,68
DN15	10,38

O exemplo de cálculo que é apresentado refere-se às dez válvulas não isoladas do tipo DN 150. Para determinar o preço de isolamento utiliza-se a Equação E.32, sabendo que o comprimento equivalente de uma válvula do tipo DN 150 é 1,60 m (ver Tabela A.1 do Anexo A).

$$Preço \text{ de isolamento (€)} = Preço(€/ml) \times L(ml)$$

Equação E.32

Em que L é o comprimento equivalente da válvula (poder ser consultado no Anexo D, Tabela D.1). Substituindo na Equação E.32 o preço de isolamento de uma válvula DN 150, que se encontra na Tabela E.3, obtém-se:

$$Preço \text{ de isolamento} = 27,30 \times 1,60 = 43,65 \text{ €}$$

Para o preço das camisas que cobrem a válvula admite-se que este é 25% do preço do isolamento. Este pode ser calculado pela Equação E.33.

$$Preço \text{ da camisa} = Preço \text{ de isolamento} \times 25\%$$

Equação E.33

Como o preço de isolamento é 43,65€, o preço das camisas obtido é:

Preço da camisa=43,65×0,25=10,91€

O custo total para isolar as dez válvulas do tipo DN 150 pode ser calculado Equação E.34.

$$\text{Preço total} = (\text{Preço de isolamento} + \text{Preço da camisa}) \times N^{\circ} \text{ de válvulas}$$

Equação E.34

$$\text{Preço total} = (43,65 + 10,91) \times 10 = 382,15\text{€}$$

O preço de isolamento foi calculado da mesma forma para as restantes válvulas, obtendo-se um custo total de 2.481,56€. O período pay-back através da Equação E.25.

$$\text{Pay - back} = \frac{\text{Investimento (€)}}{\text{Poupança económica (€/ano)}}$$

Desta forma é possível determinar o período pay-back:

$$\text{Pay - back} = \frac{2.481,56}{21.145,14} = 0,12 \text{ anos}$$

E.6. Reengenharia do processo de secagem

Neste item é apresentado o exemplo de cálculo para determinar a energia total transferida pelo termofluido, os coeficientes globais de transferência de calor teórico e real, a eficiência da estufa e a resistência de sujamento interno. Todas as correlações apresentadas têm como fonte *Incropera & DeWitt, 2003*.

Energia que o termofluido fornece

O balanço global de energia em estado estacionário à estufa é traduzido pela Equação E.35.

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{sistema}} = \sum [m(h + E_c + E_p)]_e - \sum [m(h + E_c + E_p)]_s + \sum (Q + W)$$

Equação E.35

Considera-se estado estacionário, despreza-se as variações de energia cinética, potencial e assume-se que não existe trabalho, resultando a Equação E.36.

$$\sum [m(h)]_e - \sum [m(h)]_s + \sum (Q) = 0$$

Equação E.36

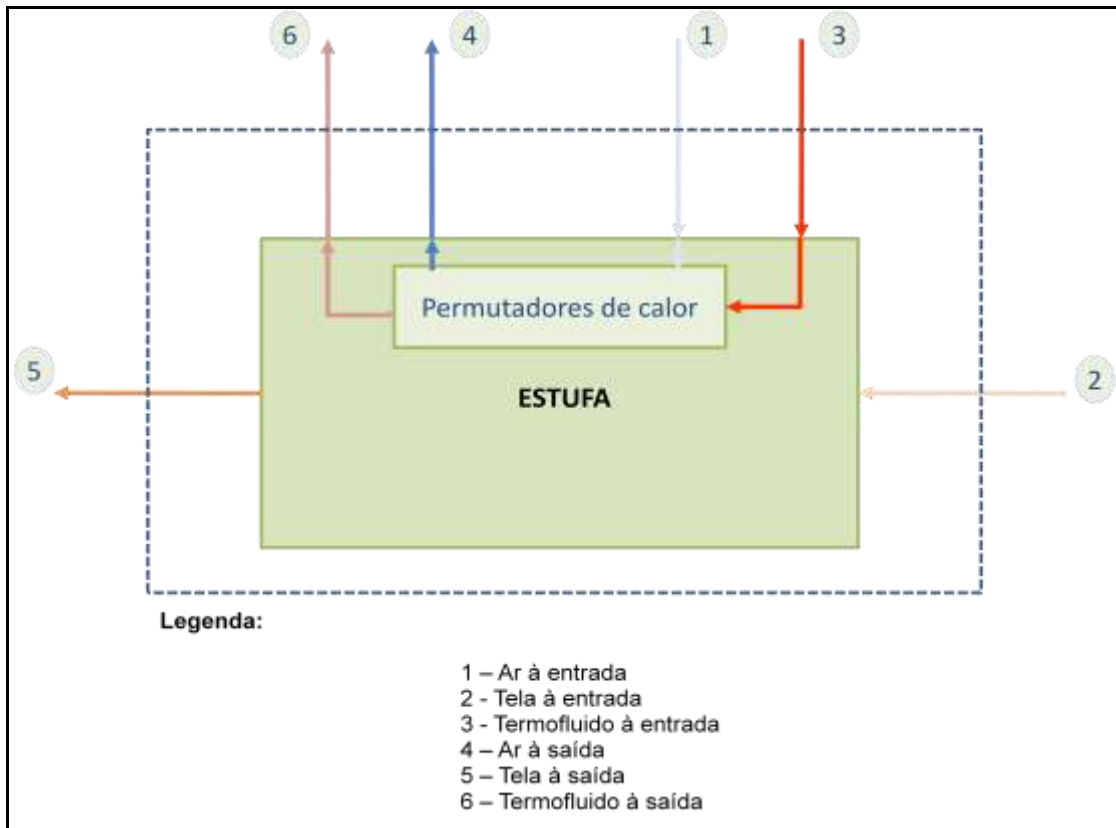


Figura E.2. Esquema representativo das estufas da fábrica de revestimentos.

Tendo em conta a Figura E.2 a Equação E.36 pode ser escrita tal como se pode verificar na Equação E.37.

$$\begin{aligned} & (m_{ar\ seco,e} \times h_{ar,e} + m_{tela,e} \times h_{tela,e} + m_{H_2O,e} \times h_{H_2O,e} + m_{termofluido,e} \times h_{termofluido,e}) - \\ & (m_{ar\ seco,s} \times h_{ar,s} + m_{tela,e} \times h_{tela,s} + m_{H_2O,s} \times h_{H_2O,s} + m_{termofluido,s} \times h_{termofluido,s}) + \\ & (-Q_{perdido\ convecção} - Q_{perdido\ radiação} - Q_{gelificação}) \end{aligned}$$

Equação E.37

Considerando que as massas se mantêm constantes, obtém-se a Equação E.38 a partir da Equação E.37.

$$\begin{aligned} & (m_{ar\ seco,e} \times (h_{ar,e} - h_{ar,s}) + m_{tela,e} \times (h_{tela,e} + h_{tela,s}) + m_{H_2O,e} \times (h_{H_2O,e} + h_{H_2O,s}) + \\ & m_{termofluido,e} \times (h_{termofluido,e} - h_{termofluido,s}) + (-Q_{perdido\ convecção} - Q_{perdido\ radiação} - Q_{gelificação})) \end{aligned}$$

Equação E.38

Como não é possível saber o caudal de termofluido, a energia pode ser determinado tal como se apresenta na Equação E.39.

$$Q_{\text{termofluido}} = Q_{\text{ar}} + Q_{\text{tela}} + Q_{\text{perdido por convecção}} + Q_{\text{perdido por radiação}} + Q_{\text{gelificação}}$$

Equação E.39

Desta forma para determinar a energia transferida pelo termofluido é necessário calcular: a energia transferida ao ar (Q_{ar}), a energia transferida à tela (Q_{tela}) e a energia perdida por convecção ($Q_{\text{perdido por convecção}}$) e convecção ($Q_{\text{perdido por radiação}}$).

❖ Energia perdida por convecção

Para o cálculo da energia perdida por convecção (Q_{conv}), utiliza-se a Equação E.40:

$$Q_{\text{conv}} = 4 h_{\text{placa v}} A_{\text{placa v}} (T_{\text{placa v}} - T_{\infty}) + 2 h_{\text{placa h}} A_{\text{placa h}} (T_{\text{placa h}} - T_{\infty})$$

Equação E.40

É necessário calcular previamente os coeficientes peliculares de transferência de calor para a placa vertical e horizontal.

❖ Cálculo do coeficiente pelicular de transferência de calor exterior para parede vertical

Para o cálculo do coeficiente pelicular de transferência de calor utiliza-se a Equação E.4.

$$Nu = \frac{h D}{k}$$

Contudo é necessário calcular previamente o número de nusselt (\bar{Nu}_L) pela correlação desenvolvida por *Churchill* e *Chu* para toda a faixa de Ra_L . Esta é apresentada na Equação E.41.

$$\bar{Nu}_L = \left[0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2$$

Equação E.41

Em que o número de Rayleigh (Ra_L) é calculado pela Equação E.6

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{sup} - T_{\infty})L^3}{\alpha\nu}$$

Sendo L a dimensão característica que representa a altura da estufa, no caso primeira estufa do Recobrimento 1 é 2,1 m (Anexo B, Tabela B.3). As propriedades do ar à temperatura média, encontram-se na Tabela F.1 e Anexo F obtém-se:

$$Ra_L = \frac{9,8 \times 0,0032(45,2 - 25,0) \times 2,1^3}{2,37 \times 10^{-5} \times 1,60 \times 10^{-5}} = 1,57 \times 10^{10}$$

Substituindo todos os valores na Equação E.41, obtém-se o número de Nusselt:

$$\overline{Nu}_L = \left[0,825 + \frac{0,387 \times (1,57 \times 10^{10})^{1/6}}{\left[1 + (0,492/0,71)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 = 290,9$$

Por fim, o coeficiente pelicular de transferência de calor para a placa vertical é calculado substituindo todos os valores na Equação E.4:

$$h = \frac{2590,9 \times 0,03}{2} = 3,73 \text{ W/(m}^2 \text{ °C)}$$

- ❖ Cálculo do coeficiente pelicular de transferência de calor exterior para parede horizontal

Para o cálculo do coeficiente pelicular de transferência de calor utiliza-se a Equação E.42

$$\overline{Nu}_L = 0,15Ra_L^{1/3}$$

Equação E.42

Para tal é necessário o cálculo do número de Rayleigh (Ra_L) que é calculado pela Equação E.6.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{sup} - T_{\infty})L^3}{\alpha\nu}$$

Em que L é a dimensão característica e representa o comprimento da estufa, no caso da primeira é 3,2 m (ver Anexo B, Tabela B.3). As propriedades físicas do ar à temperatura média de 324 K que se encontram na Tabela F.1 do Anexo F.

Substituindo os respectivos valores, obtém-se:

$$Ra_L = \frac{9,8 \times 0,0031(72,7 - 25) \times 3,2^3}{2,57 \times 10^{-5} \times 1,8 \times 10^{-5}} = 1,05 \times 10^{11}$$

Com o valor do número de Rayleigh (Ra_L) calculado é possível calcular o número de Nusselt ($\bar{N}u_L$) através da Equação E.42:

$$\bar{N}u_L = 0,15 \times (1,05 \times 10^{11})^{1/3} = 707,9$$

Por fim, o coeficiente pelicular de transferência de calor para a placa vertical é calculado substituindo todos os valores na Equação E.4:

$$h = \frac{707,9 \times 0,03}{3,2} = 6,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Desta forma já é possível o calcular o calor perdido por convecção, utilizando a Equação E.40:

$$Q_{conv} = (2 \times 3,73 \times 6,72 + 2 \times 5,67) \times (45,2 - 30,0) + (6,17 \times (2 \times 8,64 + 2 \times 5,4)) \times (72,7 - 25,0)$$

$$Q_{conv} = 6947,57 \text{ W}$$

❖ Energia perdida por radiação

Para calcular a energia perdida por radiação., utiliza-se a Equação E.43:

$$Q_{radiação} = \varepsilon \sigma [(2 A_{sup\ vertical} + 2 A_{sup\ lateral})(T_{sup\ vertical}^4 - T_{\infty}^4) + 2 A_{sup\ horizontal}(T_{sup\ horizontal}^4 - T_{\infty}^4)]$$

Equação E.43

Substituindo as temperaturas que se encontram na Tabela C.1 do Anexo C e tendo em consideração que:

$$\varepsilon = 0,17$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$$

$$T_{\infty} = 298 \text{ K}$$

$$A_{sup\ lateral} = 5,67 \text{ m}^2$$

$$A_{sup\ horizontal} = 8,64 \text{ m}^2$$

É possível determinar o calor perdido por radiação, substituindo todos os valores na Equação E.43 e obtendo-se:

$$Q_{\text{radiação}} = 0,17 \times 5,67 \times 10^{-8} \\ \times [(2 \times 6,72 + 2 \times 5,67) \times (318,2^4 - 298^4) + 2 \times 8,64 \\ \times (345,65^4 - 298^4)]$$

$$Q_{\text{radiação}} = 1228,41 \text{ W}$$

❖ Energia transferida ao ar de secagem

Para o cálculo da energia transferida ao ar de secagem utiliza-se a Equação E.44.

$$Q_{\text{ar}} = \dot{m}_{\text{ar seco}} \times C_{p_{\text{ar}}} \times (T_{\text{ar s}} - T_{\text{ar e}}) + \dot{m}_{\text{ar seco}} \times y_e \times C_{p_{\text{vapor}}} \times (T_{\text{ar s}} - T_{\text{ar e}})$$

Equação E.44

Para determinar a energia transferida ao ar de secagem é necessário conhecer a humidade específica (y_e) do ar à saída da estufa. Considera-se que o ar tem uma humidade relativa (y_r) de 60% e entra na estufa 40,9°C (105,8°F) (esta temperatura encontra-se na Tabela C.5 do Anexo C). Com estes dados vai-se ao diagrama de humidades que se encontra na Figura E.3 e retira-se a humidade molar (y_m).

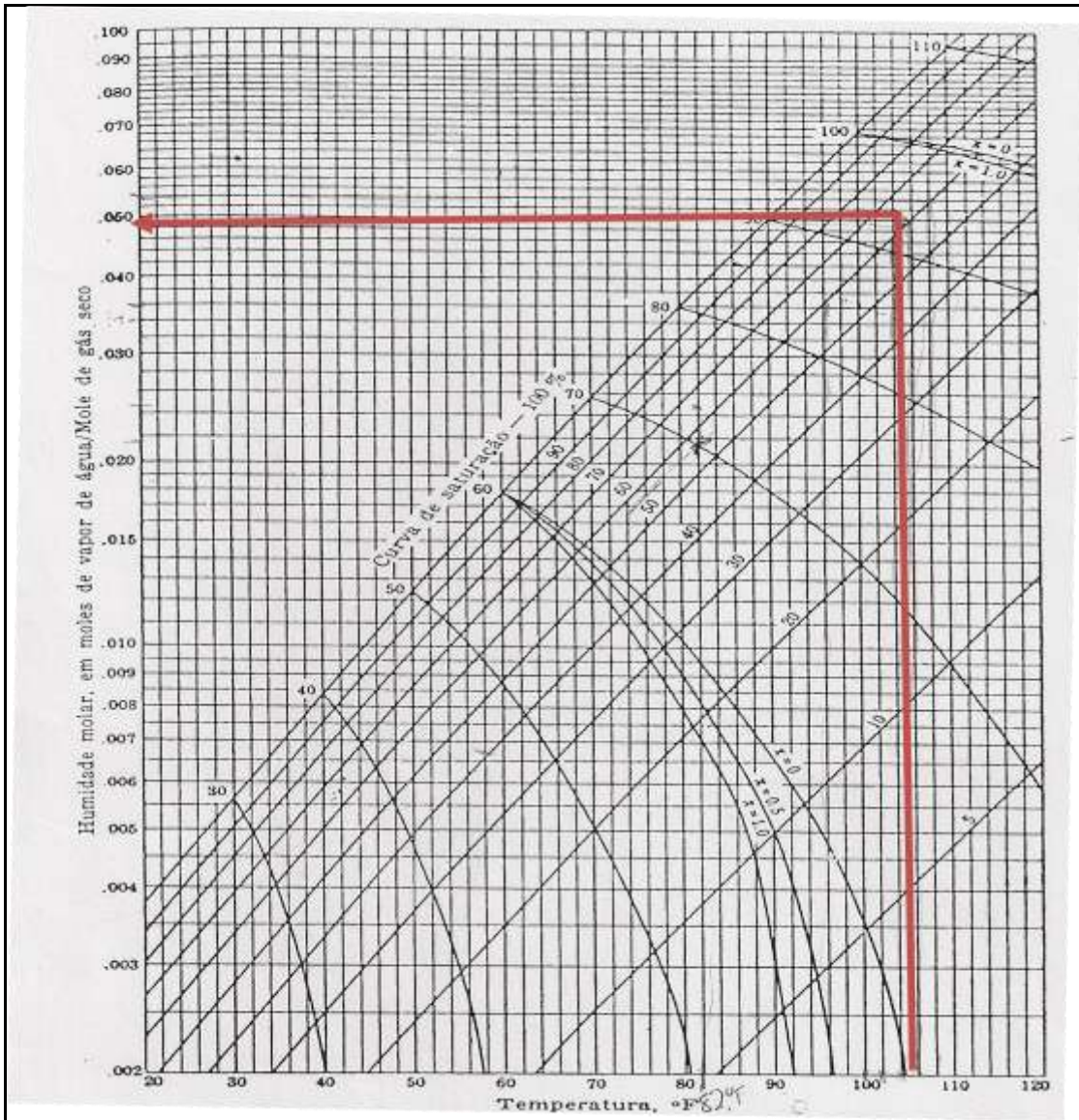


Figura E.3. Diagrama de humidades

Obtém-se uma humidade molar de 0,05 moles de vapor de água/ mol de gás seco, contudo é necessário converter para humidade específica, através da Equação E.45.

$$y_e = y_m \times \frac{M(H_2O)}{M(AR)}$$

Equação E.45

Sabendo que a massa molar da água e do ar são 29 g/mol e 18 g/mol respectivamente, obtém-se a humidade específica do ar.

$$y_e = 0,05 \times \frac{18}{29} = 0,031 \text{ g H}_2\text{O/g AR}$$

Com a humidade do ar é possível determinar o caudal de ar seco através da Equação E.46.

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \dot{m}_{ar}(1 - y_e)$$

Equação E.46

$$\dot{m}_{ar\ seco} = 0,14(1 - 0,031) = 0,139 \text{ kg/s}$$

Substituindo as temperaturas que se encontram na Tabela C.1 do Anexo C e tendo na Equação E.44, obtém-se:

$$Q_{ar} = 0,139 \times 1007,2 \times (116,0 - 41,0) + 0,139 \times 0,031 \times 1922,8 \times (116,0 - 41,0)$$

$$Q_{ar} = 11130,34 \text{ W}$$

❖ Energia transferida à tela

Para calcular a energia transferida à tela, utiliza-se a Equação E.47

$$Q_{tela} = \dot{m}_{tela} \times C_{p_{tela}} \times (T_{tela\ s} - T_{tela\ e}) + Q_{gelificação}$$

Equação E.47

Contudo é necessário calcular o caudal de tela (\dot{m}_{tela}) a partir da Equação E.48, tendo em conta que:

$$v_{tapete} (m/s) = 0,12$$

$$m_{tela} (g/m^2) = 190$$

$$largura_{tela} = 1,5$$

$$\dot{m}_{tela} = v_{tapete} \times m_{tela} \times largura_{tela}$$

Equação E.48

Substituindo os valores na Equação E.48, obtém-se:

$$\dot{m}_{tela} = 0,12 \times 190 \times 1,5 = 33,25 \text{ g/s}$$

$$\dot{m}_{tela} = \frac{33,25}{1000} = 0,03325 \text{ kg/s}$$

Depois de determinar a massa de tela é necessário calcular o calor de gelificação, para tal recorre-se Figura E.4, sabendo que a temperatura no interior da estufa é de 150°C (esta temperatura pode ser consultada na Tabela C.5 do Anexo C).

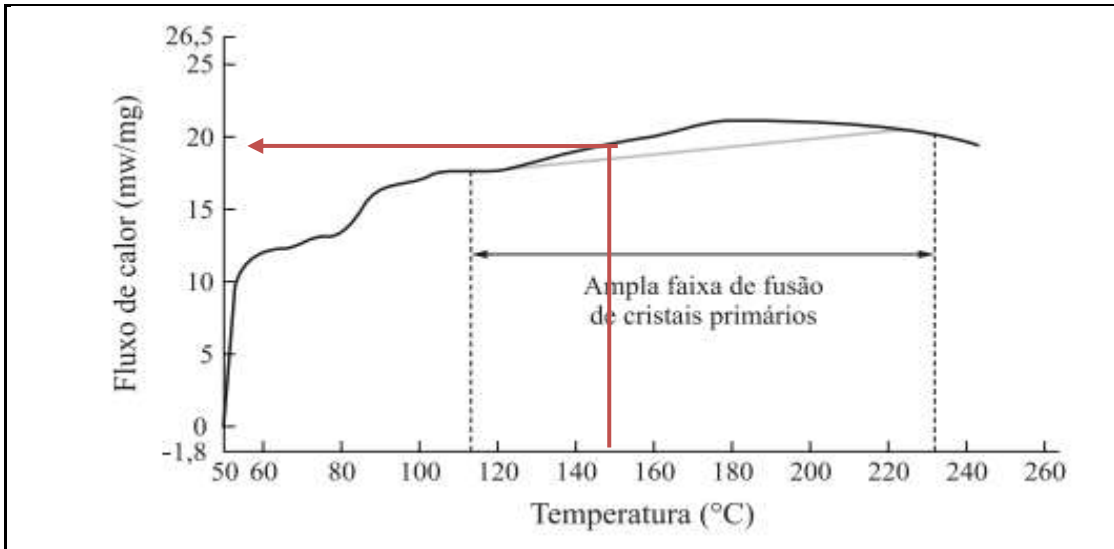


Figura E.4. Variação do fluxo e calor de gelificação com a temperatura (°C). (Alves & Rodolfo, 2006)

Para a temperatura de 150°C obtém-se o fluxo de calor de gelificação de 19 mW/mg , o que permite calcular o calor de gelificação, pela Equação E.49.

$$Q_{gelificação} = Fluxo\ de\ calor(W/g) \times \dot{m}_{tela}$$

Equação E.49

É necessário converter o fluxo de calor para unidades S.I. e da seguinte forma:

$$Fluxo\ de\ calor(W/g) = 19 \frac{mW}{mg} \times \frac{1W}{1000\ mW} \times \frac{1000mg}{1g} = 19$$

$$Q_{gelificação} = 19 \times 33,25 = 631,75W$$

Finalmente, recorrendo à Equação E.47 e substituindo pelas temperaturas que se encontram na Tabela C.1 do Anexo B é possível determinar a energia transferida à tela:

$$Q_{tela} = 0,03325 \times 1500 \times (150,0 - 25,0) + 631,75 = 6866,13\ W$$

A energia que o termofluido transfere é calculada substituindo todos os valores na Equação E.39.

$$Q_{termofluido} = 6947,57 + 1628,41 + 11130,34 + 6866,13 = 26572,44W$$

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor real (U_{real})

Para determinar o coeficiente global de transferência de calor real (U) recorre-se à Equação E.50:

$$Q = U \times A \times \Delta T_{lm} \times F$$

Equação E.50

Em que Q é a energia fornecida pelo termofluido, A é a área externa dos permutadores e F o factor de correcção das temperaturas.

❖ Cálculo da área externa

Para calcular a área externa dos tubos utiliza-se a Equação E.51, contudo é necessário calcular previamente a área da parede nua ($A_{parede\ nua}$) e a área das alhetas (A_a) através da Equação E.52 e Equação E.53, respectivamente.

$$A_e = A_{parede\ nua} + \eta \times A_a$$

Equação E.51

$$A_{parede\ nua} = \pi D_{e\ s/alheta} \times (L_{tubo} - na \times t) \times NP \times NT \times N_{passagens}$$

Equação E.52

$$A_a = \pi \left[\left(\frac{D_{e\ c/alheta}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{e\ s/alheta}}{2} \right)^2 \right] \times NF \times na \times NT \times NP \times N_{passagens} + \pi D_{e\ c/alheta} \times t \times na \times NT \times NP \times N_{passagens}$$

Equação E.53

Para determinar a área da parede nua e a área das alhetas é necessário utilizar as características dos permutadores que se encontram na Tabela B.5 do Anexo Tabela B.5. Características dos dois permutadores da primeira estufa do Recobrimento 1.B.

$$A_{parede\ nua} = \pi \times 0,0215 \times (1,8 - 200 \times 0,006) \times 4 \times 14 \times 3 = 6,81 m^2$$

$$A_a = \pi \left[\left(\frac{0,0400}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,0215}{2} \right)^2 \right] \times 2 \times 200 \times 14 \times 4 \times 3 + \pi \times 0,0400 \times 0,002 \times 200 \times 14 \times 2 \times 3 = 85,38 m^2$$

❖ Cálculo da eficiência das alhetas

Para determinar a eficiência das alhetas é necessário determinar os seguintes parâmetros ξ e a que se encontram na Equação E.54 e Equação E.55, respectivamente

$$\xi = \left(L + \frac{1}{2}t\right) \sqrt{\frac{h}{k t}}$$

Equação E.54

Para determinar ξ e a é necessário conhecer as características das alhetas, que são apresentadas na Tabela B.5 do Anexo B. Substituindo todos os valores na Equação E.54, tem-se:

$$\xi = \left(9,25 \times 10^{-3} + \frac{1}{2} \times 6,0 \times 10^{-3}\right) \sqrt{\frac{9,32}{59,0 \times 6,0 \times 10^{-3}}} = 0,063$$

$$a = \frac{r_2 + \frac{1}{2}t}{r_1}$$

Equação E.55

Substituindo todos os valores na Equação E.55, obtém-se:

$$a = \frac{0,020 + \frac{1}{2} \times 6,0 \times 10^{-3}}{0,011} = 2,14$$

Com os parâmetros ξ e a recorre-se à Figura E.5 e retira-se a eficiência das alhetas que é igual a 99,99%.

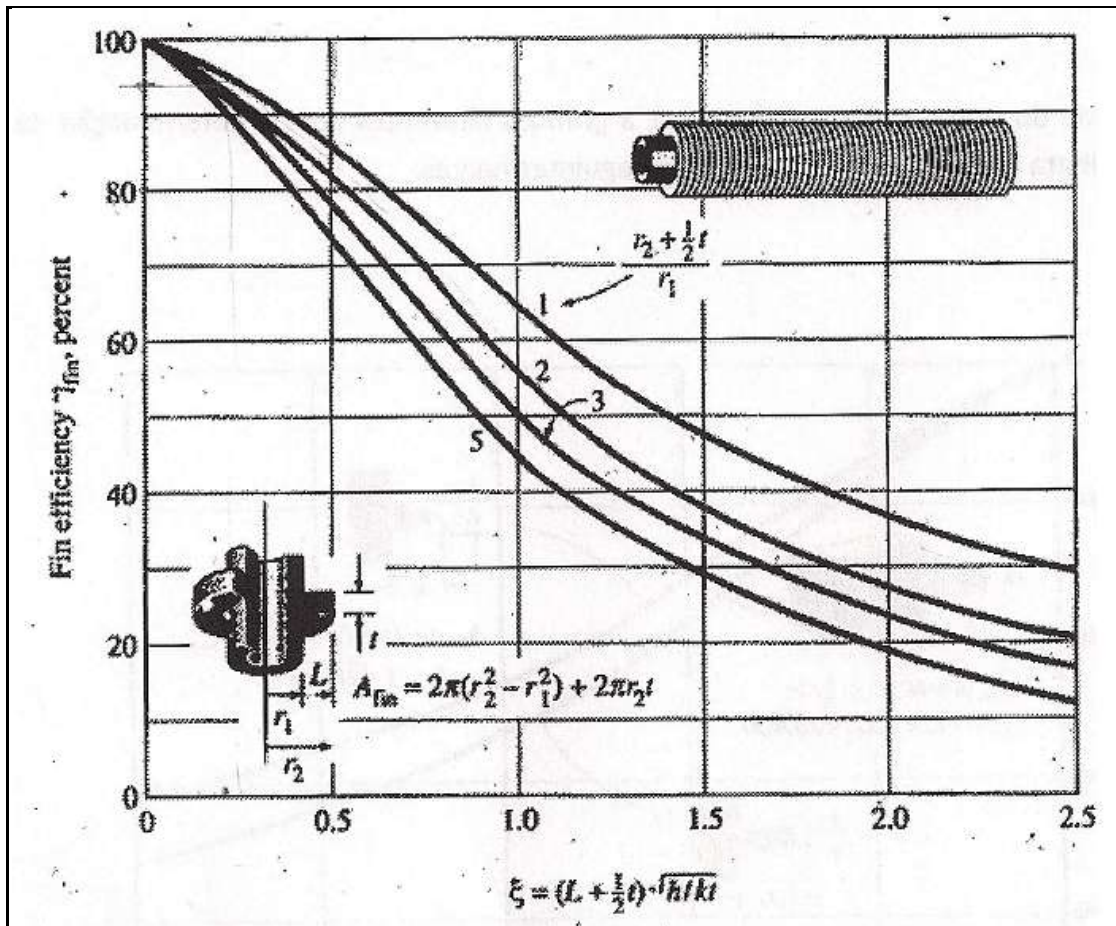


Figura E.5. Eficiência de alhetas cilíndricas (Ozisik, M, 1985).

Substituindo na Equação E.51 a área da parede nua e área das alhetas obtém-se a área externa.

$$A_e = 6,81 + 0,999 \times 85,38 = 92,11 \text{ m}^2$$

❖ **Cálculo da média logarítmica das temperaturas**

A diferença média logarítmica das temperaturas é calculada através da Equação E.56.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{qe} - T_{fs}) - (T_{qs} - T_{fe})}{\ln \left[\frac{(T_{qe} - T_{fs})}{(T_{qs} - T_{fe})} \right]}$$

Equação E.56

Substituindo na Equação E.56 as temperaturas para o termofluido e para o ar que se encontram na Tabela C.1 do Anexo B obtém-se:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(232,8 - 116,0) - (212,3 - 41,0)}{\ln \left[\frac{(232,8 - 116,0)}{(212,3 - 41,0)} \right]} = 142,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para tal é necessário determinar o factor de correcção F , determinando R e P através da Equação E.57 e Equação E.58.

$$R = \frac{T_e - T_s}{t_s - t_e}$$

Equação E.57

Substituindo as temperaturas para o termofluido e para o ar que se encontram na Tabela C.1 do Anexo B obtém-se o valor de R :

$$R = \frac{41,0 - 116,0}{212,3 - 232,8} = 3,66$$

$$P = \frac{t_s - t_e}{T_e - t_e}$$

Equação E.58

Substituindo as temperaturas para o termofluido e para o ar que se encontram na Tabela C.1 do Anexo B obtém-se o valor de P :

$$P = \frac{116 - 41,0}{41,0 - 232,8} = 0,11$$

Como os valores de R e P , e sabendo que os fluidos estão em fluxo cruzado retira-se da Figura E.6 o factor de correcção de temperaturas.

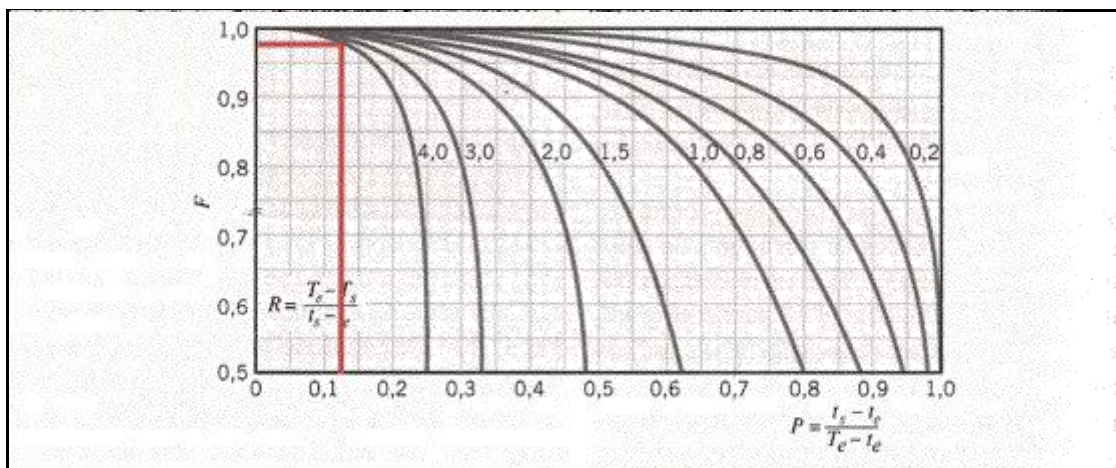


Figura E.6. Factor de correcção de temperaturas com correntes cruzadas e os dois fluidos não misturados. (Incropera & DeWitt, 2003)

O valor do factor de correcção é de 0,98.

Por fim é possível calcular o coeficiente global de transferência de calor real (U_{real}) através da Equação E.50, obtendo-se:

$$U_{\text{real}} = \frac{269298,92}{92,11 \times 142,3 \times 0,98} = 2,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor real ($U_{\text{teórico}}$)

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor teórico ($U_{\text{teórico}}$) através da Equação E.59.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i \times A_i} + \frac{1}{h_e \times A_e} + \frac{\Delta x}{k \times A_{lm}}$$

Equação E.59

Utilizando a área externa na Equação E.59 e considerando que a condução através da parede é desprezável, obtém-se a Equação E.60:

$$\frac{1}{U_{\text{teórico}}} = \frac{A_e}{h_i \times A_i} + \frac{1}{h_e}$$

Equação E.60

É necessário estimar os coeficientes de transferência de calor interno (h_i) e externo (h_e).

❖ Cálculo do coeficiente pelicular de transferência de calor no interior de tubos

Para calcular o coeficiente pelicular de transferência de calor no interior de tubos, recorre-se à Equação E.4.

$$Nu = \frac{h D}{k}$$

Em que D é o diâmetro interno do tubo, k é a condutividade térmica do termofluido (ver Anexo F, Figura F.1) e o número de Nusselt (Nu), em regime laminar é estimado pela correlação de *Dittus-Boelter*, sendo apresentada na Equação E.61.

$$Nu = 1,86 \times Gz^{1/3}$$

Equação E.61

Para tal é necessário calcular (Gz)

$$Gz = Re \times Pr \times \left(\frac{L}{D_i}\right)$$

Equação E.62

É necessário calcular o número de Reynolds (Re) e número de Prandtl (Pr) através da Equação E.63 e da Equação E.64, respectivamente.

$$Re = \frac{\rho v D_i}{\mu}$$

Equação E.63

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

Equação E.64

Para calcular o número de Reynolds (Re) é necessário determinar a velocidade do termofluido (v) pela Equação E.65.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A}$$

Equação E.65

Em que \dot{m} é o caudal de termofluido e A é a área de escoamento do termofluido. Contudo primeiro calcula-se o caudal de termofluido pela Equação E.66:

$$Q_{\text{termofluido}} = \dot{m}_{\text{termofluido}} \times C_{p_{\text{termofluido}}} \times (T_{\text{termofluido e}} - T_{\text{termofluido s}})$$

Equação E.66

Substituindo as temperaturas do termofluido (Anexo C Tabela C.1) e a energia transferida pelo termofluido, obtém-se:

$$269298,92 = \dot{m}_{\text{termofluido}} \times 3,344 \times (233,8 - 212,3)$$

$$\dot{m}_{\text{termofluido}} = 378,6 \text{ g/s}$$

Para determinar a velocidade do termofluido é também necessário conhecer a área de escoamento (A_{esc}) através da Equação E.67.

$$A_{esc} = \pi \frac{D_i^2}{4}$$

Equação E.67

Pode-se então calcular-se a área de escoamento, sabendo que o diâmetro interno é 0,0175m.

$$A = \pi \times \frac{(0,0175)^2}{4} = 0,0175m^2$$

Depois de conhecido o caudal de termofluido e a área de escoamento determina-se a velocidade do termofluido através da Equação E.65.

$$v = \frac{0,0133}{815 \times 0,000241} = 0,068 \text{ m/s}$$

Depois de conhecida a velocidade do termofluido é possível determinar o número de Reynolds (Re) e sabendo que as propriedades do termofluido se encontram Anexo F (consultar da Figura F.1 à Figura F.3) substitui-se na Equação E.63 as propriedades do termofluido à temperatura média (222,5°C).

$$Re = \frac{815 \times 0,068 \times 0,0175}{9,47 \times 10^{-4}} = 1024,99$$

O número de Prandtl (Pr) é determinado substituindo as propriedades físicas do termofluido à temperatura média na Equação E.64.

$$Pr = \frac{3,344 \times 1,06 \times 10^{-3}}{1,34 \times 10^{-4}} = 26,43$$

Substituindo todos os valores na Equação E.62 determina-se (Gz)

$$Gz = 1024,99 \times 25,65 \times \left(\frac{1,8}{0,0175} \right) = 255,65$$

O número de Nusselt (Nu) é calculado recorrendo à Equação E.61

$$Nu = 1,86 \times (255,65)^{1/3} = 11,80$$

Finalmente através da Equação E.4. é possível calcular o coeficiente de transferência de calor interno obtendo-se:

$$h_i = \frac{11,80 \times 0,128}{0,0175} = 86,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

❖ Cálculo do coeficiente de transferência de calor no exterior de tubos

O coeficiente de transferência de calor no exterior de tubos (h_e), para o escoamento é perfeitamente perpendicular aos tubos e é determinado pela Equação E.4.

$$Nu = \frac{h D}{k}$$

Neste caso, D é o diâmetro externo, k a condutividade térmica do ar (ver Anexo F Tabela F.1) e o número de Nusselt (Nu) é estimado pela correlação desenvolvida por *Hilpert* que se encontra na Equação E.68.

$$Nu = a \times Re_0^m \times Pr^{0,33} \times F_N$$

Equação E.68

Em que o número de Reynolds é determinado pela Equação E.63 mas com a velocidade máxima ($v_{m\acute{a}xima}$) do fluido entre os tubos, esta pode ser calculada pela através da Equação E.65.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A}$$

Em que \dot{m} é o caudal de ar, A é a área mínima e v é a velocidade máxima. Para calcular a velocidade máxima é necessário determinar a área mínima de escoamento (A_{min}) através da Equação E.69.

$$A_{min} = A_{total} - A_{proj}$$

Equação E.69

Em que a área total (A_{total}) e a área projectada (A_{proj}) são determinadas pela Equação E.70 e pela Equação E.71.

$$A_{total} = \left(\delta \times \left(\frac{NT}{fila} + 2 \right) + \left(\frac{NT}{fila} \right) \times D_{e\ s/alheta} \right) \times L_{tubo} \times NP$$

Equação E.70

$$A_{proj} = \frac{NT}{fila} \times D_{e\ s/alheta} \times L_{tubo} \times NP + \frac{NT}{fila} \times (D_{e\ c/alheta} - D_{e\ s/alheta}) \times t \times na \times NP$$

Equação E.71

Para determinar a área total e a área projectada é necessário conhecer as características dos permutadores que se encontram na Tabela B.5 do Anexo B.

$$A_{total} = (0,0243 \times (9 + 2) + 9 \times 0,0215) \times 1,8 \times 2 = 1,66 \text{ m}^2$$

$$A_{proj} = 9 \times 0,0215 \times 1,8 \times 2 + 9 \times (0,040 - 0,0215) \times 0,006 \times 200 \times 2 = 1,10 \text{ m}^2$$

Substituindo na Equação E.69 a área total e a área projectada obtém-se a área mínima.

$$A_{min} = 1,66 - 1,10 = 0,56 \text{ m}^2$$

Depois de determinar a área mínima é possível determinar a velocidade máxima através da Equação E.65, sabendo que o caudal de ar se encontra na Tabela C.2 do Anexo B e é 0,14 kg/s.

$$v_{m\acute{a}xima} = \frac{0,14}{0,991 \times 0,56} = 0,26 \text{ m/s}$$

Depois de conhecida a velocidade máxima do ar é possível determinar o número de Reynolds (Re) e sabendo que as propriedades do ar se encontram na Tabela F.1 do Anexo F substitui-se na Equação E.63 as propriedades do ar à temperatura média (78,5°C).

$$Re = \frac{0,991 \times 0,26 \times 0,0400}{2,09 \times 10^{-5}} = 489$$

Com o número de Reynolds é possível pela Tabela E.4 conhecer os parâmetros **a** e **m** para posteriormente calcular o número de Nusselt.

Tabela E.4. Parâmetros a e m para tubos desalinhados e para diferentes intervalos do número de Reynolds.

Re	Tubos desalinhados	
	a	m
10 – 300	1,309	0,360
300 – 2×10^5	0,273	0,635
2×10^5 – 2×10^6	0,124	0,700

Como os tubos estão desalinhados e o número de Reynolds é 489 os parâmetros **a** e **m** são 0,273 e 0,635, respectivamente.

Para determinar o número de Nusselt utiliza-se a Equação E.68 em que o número de Prandlt (Pr), encontra-se na Tabela F.1 do Anexo F, que deve ser determinado à temperatura média do ar.

$$Nu = 0,273 \times (489)^{0,635} \times (0,700)^{0,33} \times 1 = 12,38$$

Por fim, é possível determinar o coeficiente de transferência de calor externo através da Equação E.4.

$$h_e = \frac{12,38 \times 0,030}{0,0400} = 9,32 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Para determinar o coeficiente global de transferência de calor teórico é necessário previamente calcular a área interna de transferência de calor através da Equação E.72.

$$A_i = \pi \times D_i \times L_{tubo} \times N^{\circ}Passagens \times NT \times NP \times N^{\circ}Passagens \text{ na estufa}$$

Equação E.72

Substituindo as características dos tubos, que se encontram na Tabela B.5 do Anexo B, obtém-se a área interna.

$$A_i = \pi \times 0,0175 \times 1,8 \times 3 \times 14 \times 2 \times 2 = 16,6 \text{ m}^2$$

Conhecendo os coeficientes de transferência de calor interno e externo e as respectivas áreas é possível determinar o coeficiente global de transferência de calor teórico, através da Equação E.60:

$$\frac{1}{U_{teórico}} = \frac{A_e}{h_i \times A_i} + \frac{1}{h_e}$$

$$\frac{1}{U_{teórico}} = \frac{92,11}{86,5 \times 16,6} + \frac{1}{9,32}$$

$$U_{teórico} = 5,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

❖ Cálculo da Resistência de sujamento interna (R_i)

O coeficiente global de transferência de calor real pode ser calculado segundo a Equação E.73.

$$\frac{1}{U_{real}A} = \frac{1}{h_i \times A_i} + \frac{1}{h_e \times A_e} + R_i$$

Equação E.73

Se subtrairmos Equação E.59 à Equação E.73 obtém-se

$$\frac{1}{U_{teórico}A} - \frac{1}{U_{real}A} = \frac{1}{h_i \times A_i} + \frac{1}{h_e \times A_e} + R_i - \frac{1}{h_i \times A_i} + \frac{1}{h_e \times A_e}$$

Considerando a área externa dos tubos obtém-se os coeficientes globais de transferência de calor teórico e real, que permitem calcular a resistência de sujamento interna (R_i):

$$\frac{1}{U_{teórico}} - \frac{1}{U_{real}} = R_i$$

Equação E.74

Substituindo os respectivos valores obtém-se a resistência de sujamento interna:

$$R_i = \frac{\frac{1}{5,8} - \frac{1}{2,1}}{92,11} = 0,0034 \text{ °C/W}$$

Cálculo do rendimento da estufa

O rendimento da estufa é determinado através da Equação E.75

$$\eta = \frac{U_{\text{real}}}{U_{\text{teórico}}} \times 100$$

Equação E.75

Substituindo o coeficiente global de transferência de calor real (U_{real}) e teórico ($U_{\text{teórico}}$), obtém-se:

$$\eta = \frac{2,1}{5,8} \times 100 = 35\%$$

E.6.1. Dimensionamento do permutador de calor

O permutador a projectar é um permutador compacto com alhetas circulares e tem como objectivo aproveitar o calor do ar que sai da estufa para aquecer o ar ambiente que entra na estufa. Os fluidos circulam em fluxo cruzado, sendo que o ar ambiente (fluido frio) circula no exterior dos tubos, e no interior dos tubos circula ar que sai da estufa (fluido quente). Todas as correlações apresentadas têm como fonte *Incropera & Dewitt, 2003*.

Na Tabela E.5 são apresentadas as condições estabelecidas para dimensionar o permutador de calor.

Tabela E.5. Condições estabelecidas para dimensionar o permutador de calor.

	$m(\text{kg/s})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$	$T_s(^{\circ}\text{C})$
Fluido Frio	0,139	41,0	?
Fluido Quente	0,139	116,0	84,0

Com os dados da Tabela E.5 é possível determinar a energia cedida pelo fluido quente (Q_q), através da Equação E.76

$$Q = m \times Cp \times (T_e - T_s)$$

Equação E.76

Em que m é o caudal, Cp é a capacidade calorífica, T_e a temperatura de entrada e T_s a temperatura de saída, todos referentes ao fluido quente. Substituindo todos estes valores obtém-se:

$$Q_q = 0,139 \times 1011,1 \times (116,0 - 84,0) = 4499,49 \text{ W}$$

Como é desconhecida a temperatura do fluido frio à saída do permutador vai assumir-se que toda a energia cedida pelo fluido quente (Q_q) é toda recebida pelo fluido frio, para se poder calcular esta temperatura através da Equação E.77.

$$Q_q = \dot{m}_f \times Cp_f \times (T_{fs} - T_{fe})$$

Equação E.77

Substituindo os valores da Tabela E.5 e as propriedades físicas do ar, que se encontram na Tabela F.1 do Anexo F, na Equação E.77 Equação E.51 obtém-se a temperatura do fluido frio (T_{fs}).

$$4499,49 = 0,139 \times 1008,0 \times (T_{fs} - 41,0)$$

$$T_{fs} = 73,1^\circ\text{C}$$

Seguidamente é necessário arbitrar um valor para o Coeficiente Global de transferência de calor no interior dos tubos (U_i) tendo este o valor de $85,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$. Este valor permitiu calcular a área interna, através da Equação E.50:

$$Q = U \times A \times \Delta T_{lm} \times F$$

Para tal é necessário determinar a diferença logaritmica média de temperaturas (ΔT_{lm}) através da Equação E.56.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{qe} - T_{fs}) - (T_{qs} - T_{fe})}{\ln \left[\frac{(T_{qe} - T_{fs})}{(T_{qs} - T_{fe})} \right]}$$

Substituindo as temperaturas para os dois fluidos, obtém-se:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(116,0 - 73,1) - (84,0 - 41,0)}{\ln \left[\frac{(116,0 - 73,1)}{(84,0 - 41,0)} \right]} = 42,9^\circ\text{C}$$

O factor de correcção das temperaturas (F) é obtido determinando R e P através da Equação E.57 e Equação E.58, respectivamente.

$$R = \frac{T_e - T_s}{t_s - t_e}$$

$$P = \frac{t_s - t_e}{T_e - t_e}$$

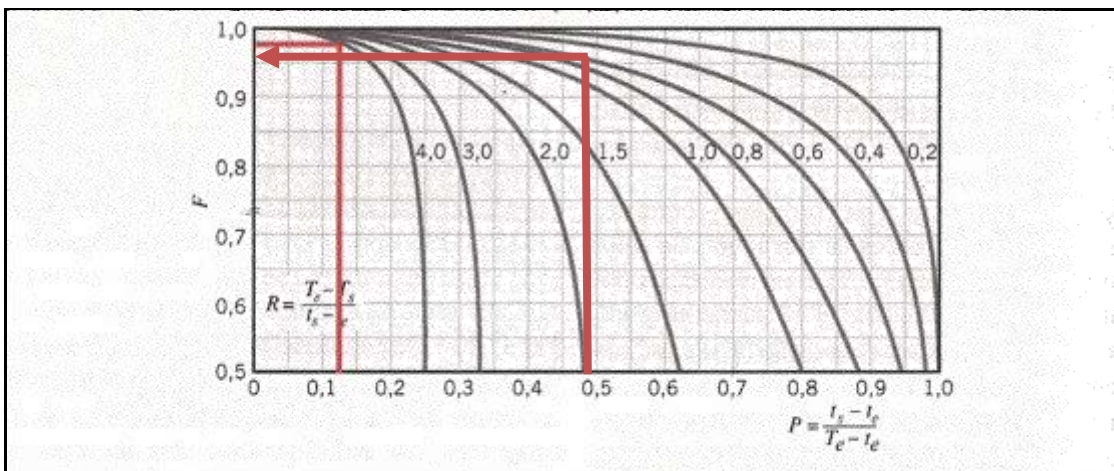
Substituindo as temperaturas para o termofluido e para o ar que se encontram na Tabela C.1 do Anexo B obtém-se o valor de R :

$$R = \frac{41,0 - 73,1}{84,0 - 116,0} = 1,00$$

Substituindo as temperaturas para o termofluido e para o ar que se encontram na Tabela C.1 do Anexo B obtém-se o valor de P :

$$P = \frac{84,0 - 116,0}{41,0 - 116,0} = 0,43$$

Com os valores de R e P e sabendo que os fluidos estão em fluxo cruzado retira-se do gráfico da Figura E.6 o factor de correcção de temperaturas correntes cruzadas e os dois fluidos não misturados.



O valor do factor de correcção é de 0,96.

Substituindo na Equação E.51 o factor de correcção, a diferença logaritmica média de temperaturas (ΔT_{lm}) e o calor cedido pelo fluido quente, obtém-se a área interna.

$$4499,49 = 85,0 \times A \times 42,9 \times 0,96 \Leftrightarrow A_i = 1,28 \text{ m}^2$$

❖ Cálculo do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos

Para o cálculo do coeficiente pelicular de transferência de calor no interior dos tubos (hi) utiliza-se a Equação E.4.

$$Nu = \frac{h \times D}{k}$$

Para tal é necessário determinar o número de Nusselt, pela Equação E.78.

$$Nu = 0,021 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,33}$$

Equação E.78

Para determinar o número de Nusselt foi necessário arbitrar alguns parâmetros tais como: o comprimento (L) e a espessura (Δx) dos tubos.

Os valores arbitrados para a espessura dos tubos foi de 0,0012m, tendo em consideração as dimensões de tubos normalizados de aço. (Coulson & Richardson, 1989)

Para o diâmetro externo (D_e) foi arbitrado o valor de 0,0164m considerando as dimensões de tubos cilíndricos com alhetas circulares existentes em ábacos. (Incropera & DeWitt, 2003)

Estes dados permitem calcular:

- ❖ Diâmetro interno (D_i) dos tubos pela Equação E.79.

$$D_i = D_e - 2\Delta x$$

Equação E.79

$$D_i = 0,0164 - 2 \times 0,0012 = 0,014 \text{ m}$$

- ❖ Número de tubos (NT) pela Equação E.80

$$NT = \frac{A}{D \times \pi \times L}$$

Equação E.80

O cálculo do número de tubos é baseado na área e diâmetro são internos.

$$NT = \frac{1,028}{0,014 \times \pi \times 0,85} = 34$$

- ❖ Velocidade de escoamento do fluido quente (v) pela Equação E.81

$$v = \frac{\dot{m}/NT}{\rho \times A}$$

Equação E.81

Em que A é a área de escoamento (A_{esc}), que pode ser calculada pela Equação E.67.

$$A_{esc} = \pi \frac{D_i^2}{4}$$

Substituindo o diâmetro interno já calculado, obtém-se:

$$A_{esc} = \pi \frac{0,014^2}{4} = 0,000154 \text{ m}^2$$

Desta forma é possível determinar a velocidade de escoamento do fluido quente substituindo os respectivos valores na Equação E.81

$$v_q = \frac{0,139/34}{0,942 \times 0,000154} = 28,06 \text{ m/s}$$

Com a velocidade do fluido que circula no interior dos tubos, é possível determinar o número de Reynolds através da Equação E.63.

$$Re = \frac{\rho v D_i}{\mu}$$

Substituindo as propriedades do ar (ver Anexo F, Tabela F.1) obtém-se:

$$Re = \frac{0,942 \times 28,06 \times 0,014}{2,18 \times 10^{-5}} = 16882,70$$

Sabendo que o número de Prandtl é calculado à temperatura média do fluido quente e que as propriedades do ar se encontram na Tabela F.1 do Anexo F, é possível determinar o número de Nusselt substituindo todos os valores na Equação E.78.

$$Nu = 0,021 \times 16882,70^{0,8} \times 0,70^{0,33} = 44,88$$

Por fim é possível determinar o coeficiente de transferência de calor interno, através da Equação E.4.

$$44,88 = \frac{h \times 0,014}{0,032} \Leftrightarrow h = 101,78 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

❖ Cálculo do coeficiente de transferência de calor no exterior dos tubos

A velocidade mássica (G) pode ser determinada pela Equação E.82.

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{min}}$$

Equação E.82

Em que a área mínima (A_{min}) é determinada através Equação E.83 tendo em conta as características do permutador que se encontram na Figura E.7.

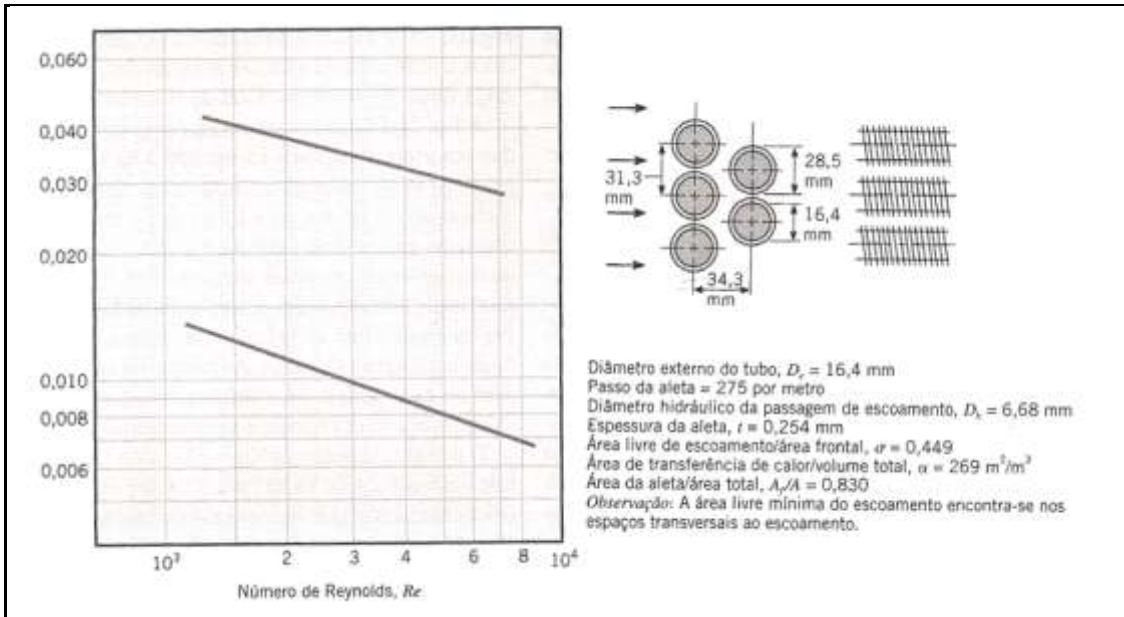


Figura E.7. Transferência de calor para permutador de calor com tubo circular e aleta circular. (Incropera & DeWitt, 2003)

$$\sigma = \frac{A_{min}}{A_{frontal}}$$

Equação E.83

Para o permutador que se pretende dimensionar σ tem o valor de 0,449 e a área frontal é de 0,03m².

$$0,449 = \frac{A_{min}}{0,03} \Leftrightarrow A_{min} = 0,013m^2$$

Conhecendo a área mínima é possível determinar a velocidade mássica através da Equação E.82.

$$G = \frac{0,139}{0,013} = 10,43 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Neste caso o número de Reynolds é determinado pela Equação E.84.

$$Re = \frac{G \times Dh}{\mu}$$

Equação E.84

Em que o diâmetro hidráulico (Dh) tem o valor de 0,00668 e a viscosidade (μ) é determinada à temperatura média do fluido frio.

$$Re = \frac{10,43 \times 0,00668}{1,99 \times 10^{-5}} = 3506,09$$

Com o número de Reynolds é possível retirar da Figura E.7 o parâmetro da Equação E.85.

$$\frac{h}{G \times Cp} \times (Pr)^{2/3}$$

Equação E.85

E desta forma calcular o coeficiente de transferência de calor externo através da Equação E.85.

$$\frac{h}{10,43 \times 1008,0} \times (0,70)^{2/3} = 0,013 \Leftrightarrow h = 153,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

É necessário determinar a área de transferência de calor, através dos dados da Figura E.7.

Sabendo que:

$$\frac{A_{\text{transferência de calor}}}{V} = 269 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

e que:

$$V = 0,025 \text{ m}^3$$

Pode calcular-se a área de transferência de calor, da seguinte forma:

$$\frac{A_{\text{transferência de calor}}}{0,025} = 269 \Leftrightarrow A_{\text{transferência de calor}} = 6,80 \text{ m}^2$$

Por fim é possível confirmar o coeficiente global de transferência de calor arbitrado, através da Equação E.86.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i \times A_i} + \frac{1}{h_e \times A_t \times \eta} + \frac{\Delta x}{k \times A_{lm}}$$

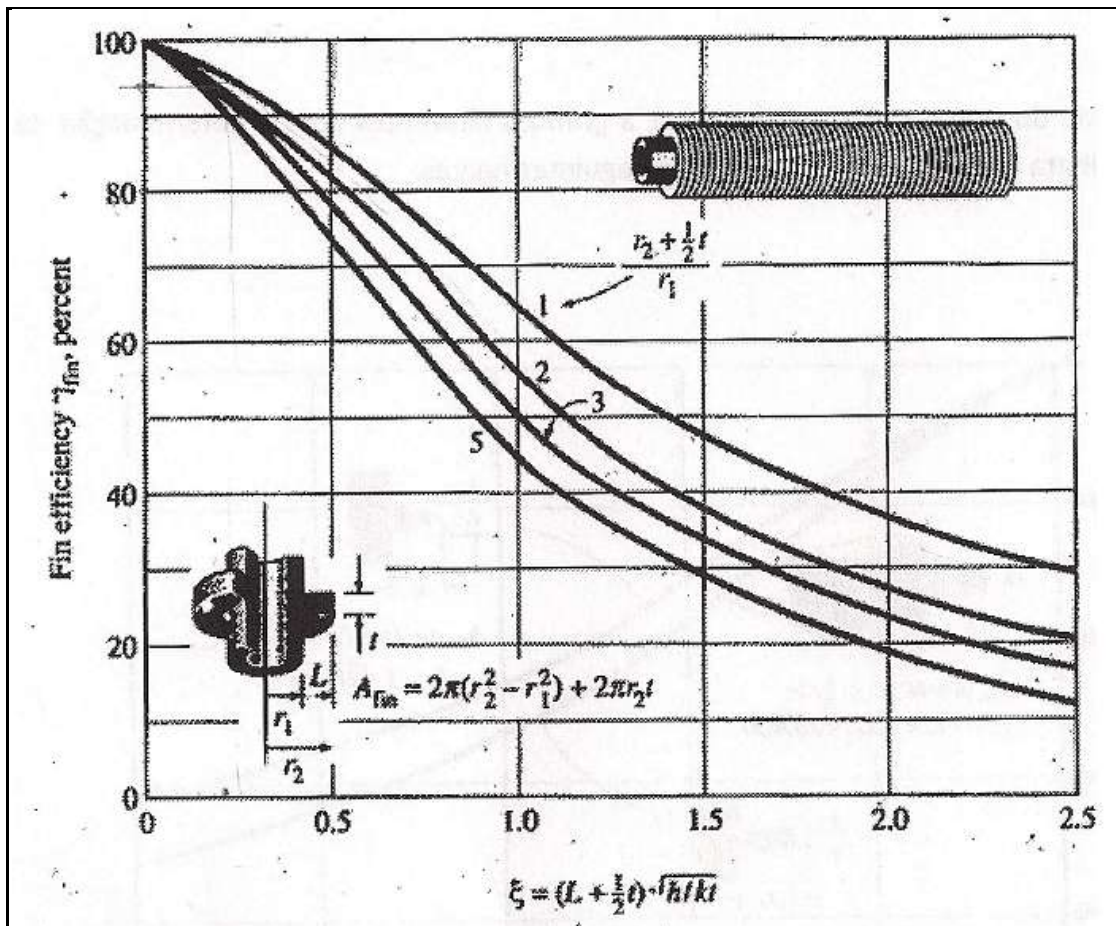
Equação E.86

Para tal, é necessário determinar a eficiência das alhetas, determinando-se ξ e α que se encontram na Equação E.54 e Equação E.55, respectivamente.

$$\xi = \left(L + \frac{1}{2}t\right) \sqrt{\frac{h}{kt}} = \left(0,0061 + \frac{1}{2} \times 0,0003\right) \sqrt{\frac{153,8}{40 \times 0,0003}} = 0,76$$

$$a = \frac{r_2 + \frac{1}{2}t}{r_1} = \frac{0,0285 + 0,5 \times 0,0003}{0,0164} = 1,75$$

Com os parâmetros ξ e a recorre-se à Figura E.5 e retira-se a eficiência das alhetas que é igual a 83%.



Por fim, é possível determinar o coeficiente global de transferência de calor interno, substituindo as áreas e coeficientes peliculares de transferência de calor.

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{101,78} + \frac{1,28}{6,80 \times 0,83 \times 153,8} + \frac{0,0012 \times 1,28}{0,26 \times 16}} = 85,6 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

O valor obtido para o coeficiente global de transferência de calor é muito próximo do valor arbitrado.

Estimativa de custos do permutador

No dimensionamento do permutador, a área de transferência de calor de 15,20 m², permite estimar o custo do permutador através Figura E.8. Para tal é necessário fazer a conversão de m² para ft², da seguinte forma:

$$A(ft^2) = 6,80m^2 \times \frac{(3,2808 \text{ ft})^2}{1m^2} = 73,16$$

Com o valor de área e sabendo que o permutador tem 9 tubos por fila é possível retirar da Figura E.8 o custo do permutador por unidade de área.

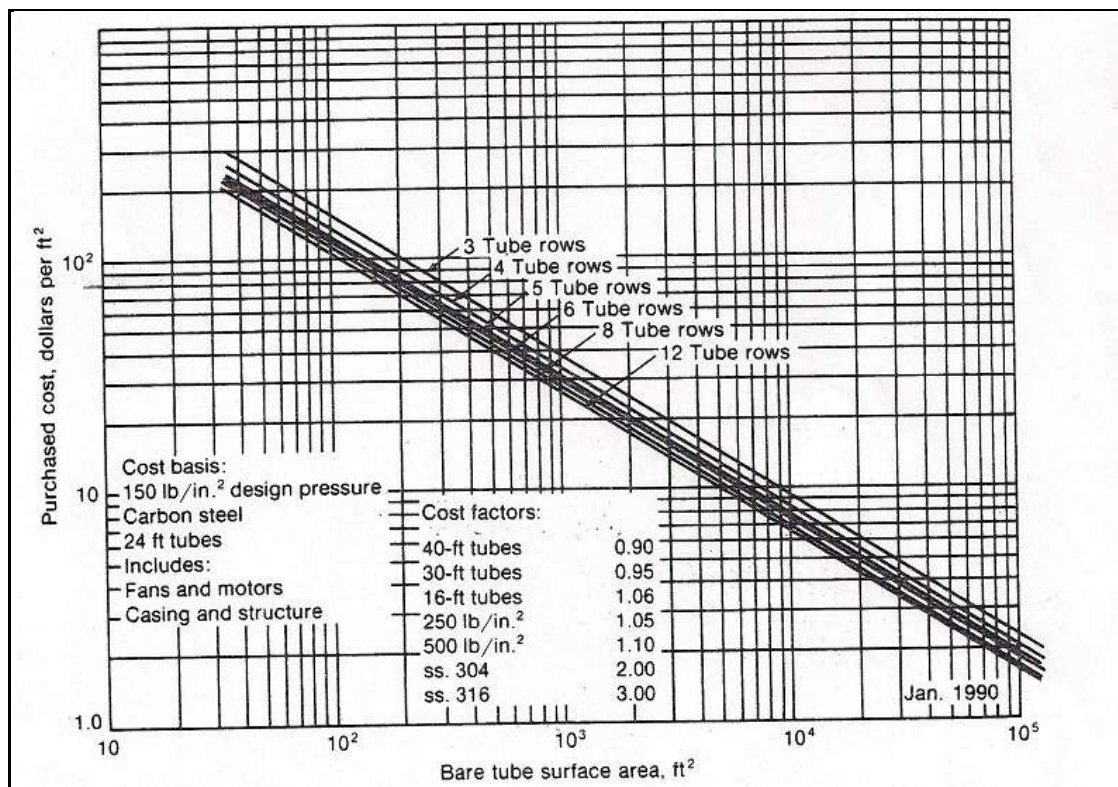


Figura E.8. Custo para permutadores de calor arrefecidos a ar. (Peters & Timmerhaus, 1991)

O custo para o permutador dimensionado é de $80\text{€}/\text{ft}^2$, convertendo para metros quadrados, obtém-se:

$$\text{Custo}(\text{€}) = 100 \frac{\text{€}}{\text{ft}^2} \times 73,16\text{ft}^2 = 7316,00$$

Contudo é necessário converter o custo para euros, obtendo-se:

$$\text{Custo}(\text{€}) = 5.543,93$$

O custo do permutador anteriormente apresentado refere-se ao ano de 1990, portanto é necessário fazer a actualização do custo para o ano de 2010, através da Equação E.87.

$$\text{Custo}(\text{Ano } 2010) = \text{Custo}(\text{Ano } 1990) \times \frac{\text{Índice de Custo}(\text{Ano } 2010)}{\text{Índice de Custo}(\text{Ano } 1990)}$$

Equação E.87

Em que:

$$\text{Índice de Custo}(\text{Ano } 2010) = 572,0$$

$$\text{Índice de Custo}(\text{Ano } 1990) = 357,6$$

Substituindo na Equação E.87, obtém-se:

$$\text{Custo}(\text{Ano } 2010) = 5.543,93 \times \frac{572,0}{357,6} = 8.867,81\text{€}$$

Estimativa da poupança de energia

A energia economizada pela introdução de um permutador de calor para aproveitar o calor que o ar tem ao sair da estufa é de $4499,49 \text{ W}$.

A energia economizada em (J/ano) = pode ser estimada pela Equação E.30:

$$\text{Poupança}(\text{J}/\text{ano}) = \text{Poupança}(\text{J}/\text{s}) \times \text{Tempo}(\text{s}/\text{ano})$$

$$\text{Poupança} = 4499,49 \times 4140 \times 3600 = 6,71 \times 10^{10}(\text{J}/\text{ano})$$

Pela Equação E.31 é possível estimar a poupança $(\text{€}/\text{ano})$ pela implementação desta medida.

$$Poupan\c{c}a \text{ (€/ano)} = \frac{Poupan\c{c}a \text{ (J/ano)} \times Custo_{GN} \text{ (€)}}{PCI_{GN} \text{ (J/kg)} \times \eta_{caldeira}}$$

Sabendo que:

$$Custo_{GN} = 0,401 \text{ €/kg (Anexo G, Tabela G.1)}$$

$$PCI_{GN} = 4,5 \times 10^7 \text{ J/kg (Penínsulagás)}$$

$$\eta_{caldeira} = 84\% \text{ (Média dos valores da Tabela 2.2 do Capítulo 2)}$$

Obtém-se:

$$Poupan\c{c}a \text{ (€/ano)} = \frac{6,71 \times 10^{10} \times 0,401}{4,5 \times 10^7 \times 0,84} = 708,88$$

Por fim é possível determinar o período pay-back, através da Equação E.25

$$Pay - back = \frac{Investimento \text{ (€)}}{Poupan\c{c}a \text{ económica (€/ano)}}$$

$$Pay - back = \frac{8.867,81}{708,88} = 13 \text{ anos}$$

E.6.2. Recirculação do ar

Uma outra sugestão de melhoria consiste na recirculação de parte do ar de saída (5%) por mistura com o ar de entrada, tal como se pode verificar pela Figura E.9.

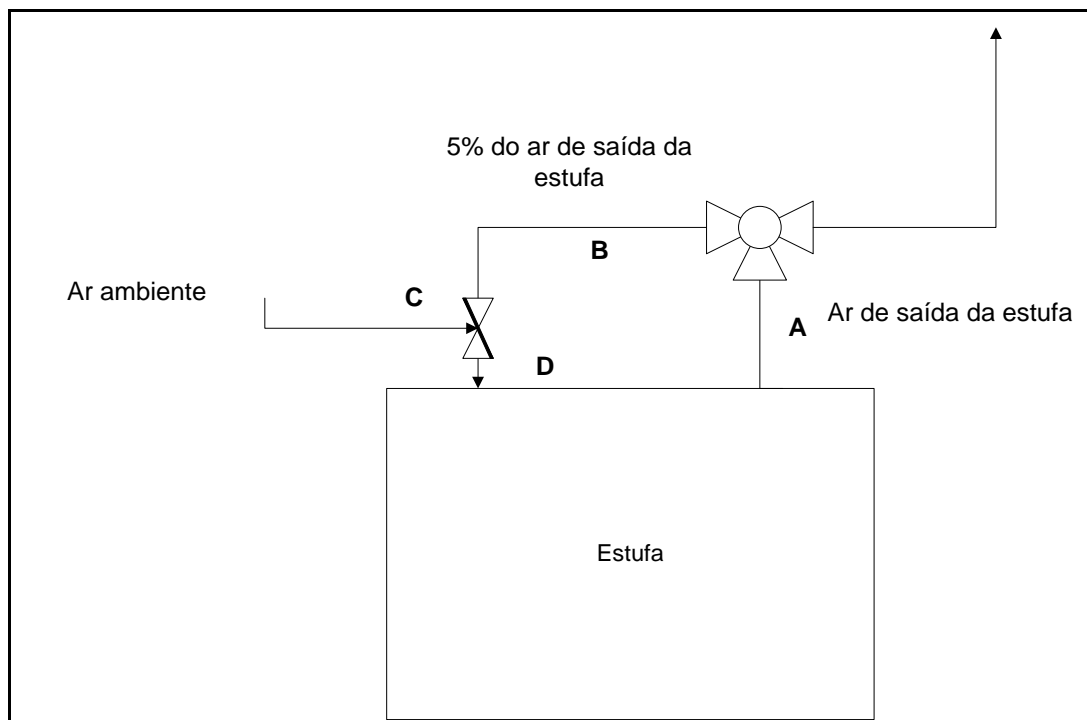


Figura E.9. Esquema representativo da recirculação do ar na estufa.

A poupança de energia pela aplicação desta medida pode ser determinada pela Equação E.88.

$$Poupança (J/s) = \dot{m}_{ar\ seco} \times 0,05 \times C_{p_{ar}} \times (T_{ar,s} - T_{ar,e})$$

Equação E.88

$$Poupança = 0,139 \times 0,05 \times 1922,8 \times (116,0 - 41,0) = 1002,99 J/s$$

A energia economizada pela recirculação do ar que sai da estufa pode ser estimada pela Equação E.30:

$$Poupança(J/ano) = Poupança (J/s) \times Tempo(s/ano)$$

$$Poupança = 1002,99 \times 4140 \times 3600 = 1,49 \times 10^{10} (J/ano)$$

Pela Equação E.31 é possível estimar a poupança (€/ano) pela implementação desta medida.

$$Poupança (€/ano) = \frac{Poupança (J/ano) \times Custo_{GN} (€)}{PCI_{GN}(J/kg) \times \eta_{caldeira}}$$

Sabendo que:

$$Custo_{GN} = 0,401 \text{ €/kg (Anexo G, Tabela G.1)}$$

$$PCI_{GN} = 4,5 \times 10^7 J/kg \text{ (Penínsulagás)}$$

$$\eta_{caldeira} = 84\% \text{ (Média dos valores da Tabela 2.2 do Capítulo 2)}$$

Obtém-se:

$$Poupança = \frac{1,49 \times 10^{10} \times 0,40}{4,5 \times 10^7 \times 0,84} = 158,02 \text{ €/ano}$$

F. Propriedades físicas dos fluidos

Neste Anexo são apresentadas as propriedades do ar, termofluido, tolueno e álcool isopropílico para diferentes temperaturas. Na Tabela F.1 encontram as propriedades do ar na Figura F.1, Figura F.2 e Figura F.3 encontram-se a condutividade térmica, calor específico e viscosidade cinemática do termofluido, respectivamente. Na Tabela F.2 e Tabela F.3 encontram-se as propriedades do tolueno e do álcool isopropílico respectivamente.

Tabela F.1. Propriedades físicas do ar à pressão atmosférica (Incropera, P., & DeWitt, 2003)

$T(K)$	ν (m^2/s)	α (m^2/s)	Pr	ρ (kg/m^3)	C_p ($J/kg^\circ C$)	μ ($N.s/m^2$)	k ($W/m.K$)
300	1,50E-05	2,25E-05	0,707	1,1614	1007	1,85E-05	2,63E-02
350	2,09E-05	2,99E-05	0,700	0,995	1009	2,08E-05	3,00E-02
400	2,641E-05	3,83E-05	0,690	0,8711	1014	2,30E-05	3,38E-02
450	3,24E-05	4,72E-05	0,686	0,774	1021	2,51E-05	3,73E-02

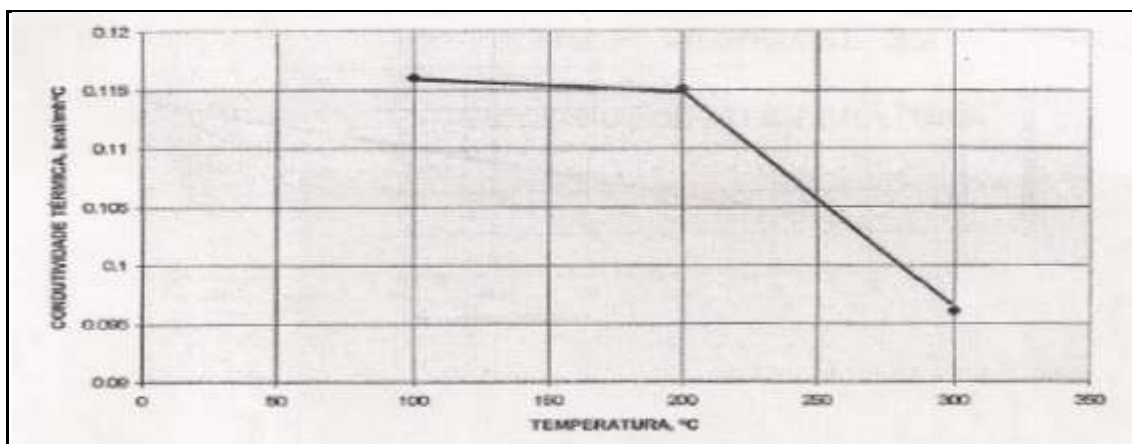


Figura F.1. Variação da condutividade térmica (kcal/mh°C) do termofluido com a temperatura (°C) (Monteiro Ribas – Indústrias SA.)

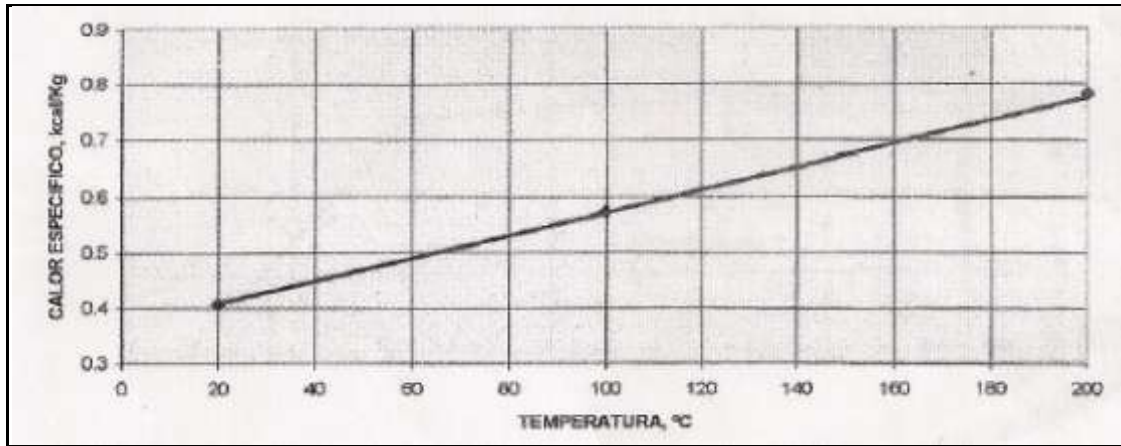


Figura F.2. Variação do calor específico (kcal/h kg) do termofluido com a temperatura (Monteiro Ribas – Indústrias SA.)

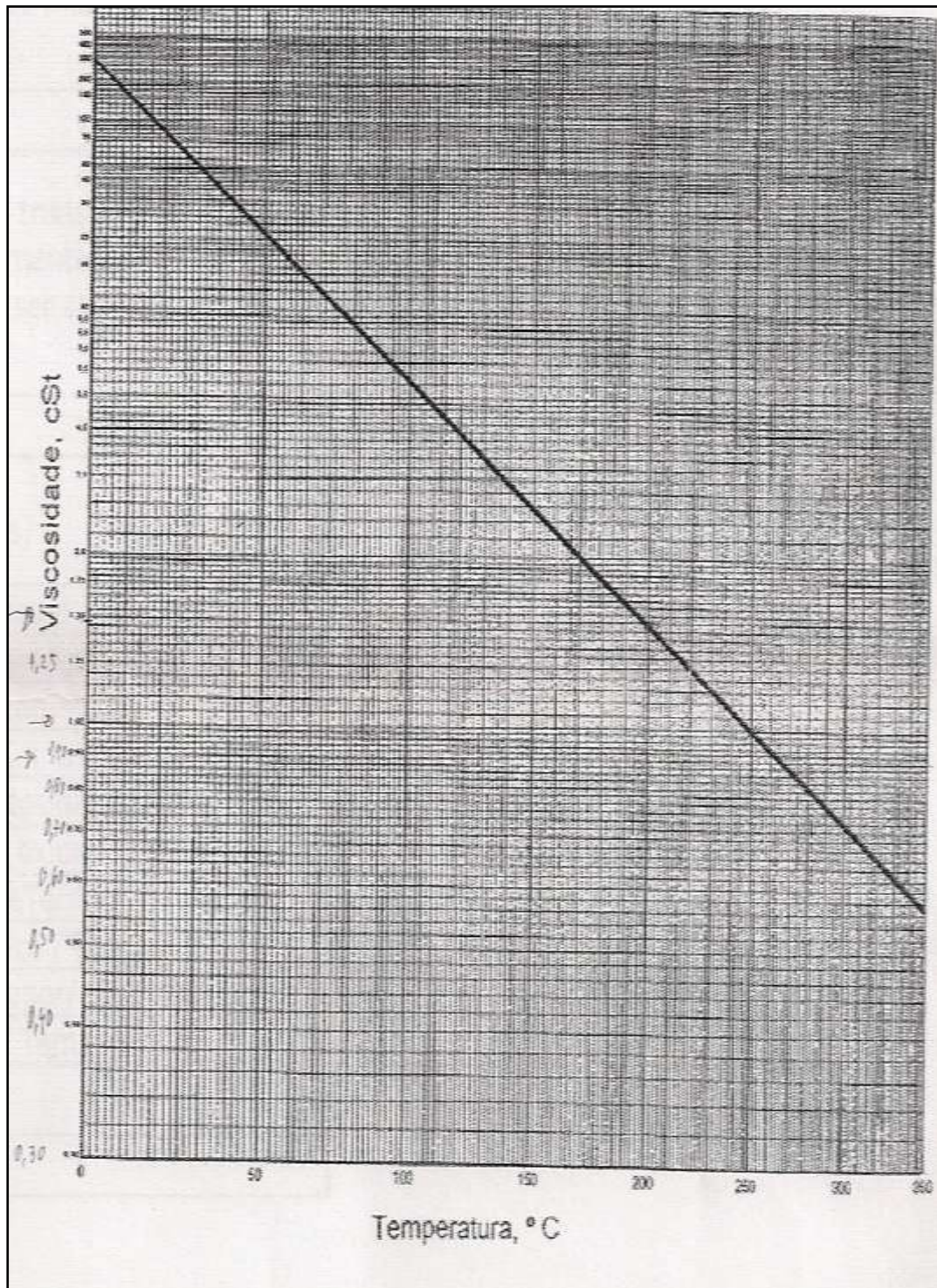


Figura F.3. Variação da viscosidade cinemática (Cst) do termofluido com a temperatura (°C) (Monteiro Ribas – Indústrias SA.).

Tabela F.2. Propriedades físicas do tolueno. (Himmelblau, 1998)

Componente	Temperatura	ΔH_v (J/kg)	C_p(J/kg°C)
Tolueno	61,2	3,36E5	1001,2
	86,5	3,49E5	1001,2
	105,2	3,60E5	1001,2

Tabela F.3. Propriedades físicas do álcool isopropílico. (Himmelblau, 1998)

Componente	Temperatura	ΔH_v (J/kg)	C_p(J/kg°C)
Álcool isopropílico	61,2	3,40E5	2406,4
	86,5	3,58E5	2548,4
	105,2	3,74E5	2537,5

G. Factores de conversão

Neste anexo são apresentados os factores de conversão utilizados ao longo do trabalho.

Tabela G.1. Factores de conversão utilizados para o gás natural.

	FC (tep/t)	FE (kg CO₂e/tep)	Custo (€/kg)
Gás Natural	1,077	2684	0,401

Tabela G.2. Factores de conversão utilizados para a água quente

	FC (tep/MWh)	FE (kg CO₂e/tep)	Custo (€/kg)
Água quente	0,096	2724	-

Tabela G.3. Factores de conversão utilizados para a energia eléctrica.

	FC (tep/MWh)	FE (kg CO₂e/tep)	Custo (€/kWh)
Energia eléctrica	0,000215	2186	0,092