

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Integração Energética no Grupo Lameirinho

Tese de Mestrado

de

Ana Patrícia Maia Oliveira

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

Lameirinho, Indústria Têxtil S.A.

LAMEIRINHO

Orientador na FEUP: **Prof. Fernando Martins**

Orientador na Lameirinho, Indústria Têxtil S.A.: **Eng. Octávio Pereira**



Departamento de Engenharia Química

Julho de 2013

Agradecimentos

O trabalho desenvolvido não seria possível sem que um conjunto de pessoas se envolvesse e dedicasse para a sua elaboração. Não se deve nem se pode ignorar todas as pessoas que me ajudaram e apoiaram ao longo de todo o projeto.

Queria agradecer em primeiro lugar à empresa Galp pela oportunidade que me proporcionou, o que me permitiu crescer profissional e pessoalmente e pelo financiamento disponibilizado ao longo do projeto.

Em segundo lugar, queira agradecer à empresa Lameirinho Industria Têxtil S. A. pela porta que me abriu e pelo excelente acolhimento que me proporcionaram. Dentro deste grupo, gostaria em primeiro lugar de dirigir o meu agradecimento ao Engenheiro Octávio Pereira pelas condições de trabalho proporcionadas, conselhos dados e experiência transmitida, a todo ao corpo integrante da empresa pela disponibilidade sempre demonstrada em ajudar ao longo do projeto.

Gostaria também de agradecer ao Prof. Fernando Martins por todos os conhecimentos transmitidos, pelo apoio prestado na resolução dos problemas, por todo tempo disponibilizado para o desenvolvimento deste projeto, pela paciência e pela dedicação pois sem isso o trabalho teria sido mais dificilmente concretizado.

Em terceiro lugar, mas não menos importante, queria dirigir um grande obrigado à minha Mãe, ao meu tio Eurico, à minha Avó Manuela, ao meu Avô Eurico, ao meu irmão Bruno e ao meu sobrinho Miguel que sempre me apoiaram, ajudaram e incentivaram a continuar e a lutar por um futuro melhor e a quem devo tudo o que sou hoje.

Por último queria agradecer a todos aqueles que fora das horas de trabalho na empresa, me ajudaram a superar esta etapa. Um muito obrigado ao meu namorado pela paciência, boa disposição, alegria e apoio incondicional, que me proporcionou depois dos dias de trabalho, aliviando assim o cansaço sentido. Aos meus amigos, que sabem todos bem quem são, pelo companheirismo e alegria que sempre me transmitiram porque sem eles tudo era mais difícil.

Resumo

Na indústria têxtil, o consumo de energia acarreta custos na maior parte das vezes elevados, sendo sempre um tema importante no sentido de criar alternativas de redução do consumo energético. Neste trabalho, realizou-se um estudo de integração energética na fábrica Lameirinho, Industria Têxtil, S.A. com o intuito da criação de oportunidades de integração energética, diminuindo os consumos de utilidades.

Inicialmente inventariaram-se as correntes que estariam disponíveis para permutar calor entre elas, analisando as suas temperaturas de entrada e saída e as suas taxas caloríficas. A metodologia adotada para a síntese da rede de permutadores de calor foi a metodologia do ponto de estrangulamento (MPE). No estudo realizado foi usada a ferramenta informática FI²EPI, que veio acrescentar ao projeto rapidez de análise, podendo-se obter automaticamente os diagramas das curvas compostas e a grande curva composta.

A rede proposta consistiu na permuta entre 46 correntes pertencentes ao processo e ao seu aquecimento ou arrefecimento complementar para que estas atinjam as temperaturas finais desejadas. O ponto de estrangulamento foi obtido para um intervalo de temperaturas entre 25 a 35 °C, verificando-se a permuta de calor apenas acima deste. Com esta rede criada obteve-se uma recuperação de calor de 15 000 kW e um consumo de utilidades frias e quentes de 2 599 kW e 2 108 kW, respetivamente.

Desta forma, comprova-se a eficiência da integração energética aplicada nesta indústria, tendo atingido resultados significativos de economia de energia térmica, que contribuem para que os processos industriais se tornem cada vez mais competitivos.

Palavras-chave: Integração energética, metodologia do ponto de estrangulamento, rede de permutadores de calor.

Abstract

In the textile industry, the energy consumption is extremely high. In this context it is importance to create alternatives for its reduction. In this work, a study of energy integration in the textile company Lameirinho, Textile Industry, SA was performed, to create an integrate system of energy consumption by lowering the external utilities.

Initially the possible streams which could exchange heat between them were evaluated through the analysis of the inlet and outlet temperatures as well as their heat capacities. The methodology adopted for the synthesis of the network of heat exchangers was the pinch methodology.

The present study used the software FI²EPI, which added speed of analysis to the project and allowed to obtain automatically the composite curves and the grand composite curve.

The proposed network comprised of the exchange heat between 46 streams of the process and their heating or cooling to reach the desired final temperature. The pinch point was obtained for a range of temperatures between 25 to 35 °C, being the heat exchanged only verified above these values. A heat recovery of 15 000 kW, and a hot and cold utilities consumption of 2 108 kW and 2 599 kW, respectively, were obtained.

In this project it was proved the efficiency of energy integration applied in this industry by the achieving significant results for the economy of thermal energy, which contribute to industrial processes become more competitive.

Keywords: Energy integration, pinch methodology, heat exchanger network.

Declaração

Declaro, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Segunda-feira, 08 de Julho de 2013

(Ana Patrícia Maia Oliveira)

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto.....	1
1.2	Apresentação da Empresa.....	1
1.3	Contributos do Trabalho	2
1.4	Organização da Tese.....	2
2	Contexto e Estado da Arte.....	4
2.1	Setor Têxtil.....	4
2.2	Integração de Processos.....	6
2.3	A Lameirinho	7
3	Descrição Técnica	8
3.1	Metodologia do Ponto de Estrangulamento.....	8
3.1.1	Aplicação informática de apoio.....	12
3.2	Esquema processual da Lameirinho.....	13
3.2.1	Instrumentação Utilizada	16
3.2.2	Sistema de Utilidades no Grupo Lameirinho.....	17
3.2.3	Gasagem	20
3.2.4	Branqueação.....	21
3.2.5	Lavagem.....	22
3.2.6	Secadeiras.....	24
3.2.7	Mercerizadeira	25
3.2.8	Recuperação soda	26
3.2.9	Estampagem.....	27
3.2.10	Râmolas	28
3.2.11	Calandras	29
3.2.12	Polimerizador	30
3.3	Situação Energética Atual da Lameirinho.....	31
4	Discussão de Resultados	33
5	Conclusões.....	41
5.1	Objetivos Realizados	41
5.2	Limitações e Trabalhos Futuros.....	42

6	Referências	43
	Anexo A – Balanços Entálpicos aos equipamentos	44
	Anexo B – Especificações dos permutadores de calor	52
	Anexo C – Rede MER	54

Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução da Indústria Têxtil e do Vestuário.....	5
Figura 2 - Passos chave para a execução da MPE.	9
Figura 3 - Exemplo do Diagrama das Curvas Compostas.	11
Figura 4 - Exemplo da Grande Curva Composta.	12
Figura 5 - Esquema Processual Lameirinho.....	14
Figura 6 - Tubo de <i>Pitot</i>	16
Figura 7 - Esquema Representativo do sistema de utilidades no grupo Lameirinho.....	19
Figura 8 - Esquema representativo da Gasadeira.	20
Figura 9 - Esquema Branqueação / Lavagem.	22
Figura 10 - Esquema Representativo da Máquina de Branquear Artos.....	23
Figura 11 - Esquema Representativo da Máquina de Lavar Benninger.	23
Figura 12 – Esquema Representativo das Secadeiras.	24
Figura 13 - Esquema Representativo da Mercerizadeira.	25
Figura 14 – Esquema Representativo da Unidade de Recuperação de Soda.	27
Figura 15 - Esquema Estampagem.	27
Figura 16 - Esquema Representativo das Râmolos.	29
Figura 17 - Esquema Calandras.	29
Figura 18 - Esquema Representativo do Polimerizador.....	30
Figura 19 - Consumo de Gás Natural por Equipamento do setor produtivo / (Nm ³).	31
Figura 20 - Consumos de vapor por equipamento / kg.....	32
Figura 21 - Diagrama de Curva Composta com $\Delta T_{\text{MIN}} 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	35
Figura 22 - Diagrama da Grande Curva Composta com $\Delta T_{\text{MIN}} 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	36
Figura 23 - Diagrama curva composta com ΔT_{MIN} de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$	37
Figura 24 - Grande Curva Composta com ΔT_{MIN} de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$	38

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Exemplo de Dados Necessários para a análise da MPE.	10
Tabela 2 - Considerações prévias para a definição das correntes disponíveis.	33
Tabela 3 - Correntes Disponíveis para a aplicação da MPE.	33
Tabela 4 - Comparação dos cenários para diferente ΔT_{MIN}	38
Tabela A.1 - Balanço Entálpico à Gasadeira	44
Tabela A.3 - Balanço Entálpico à Máquina de Branquear Kusters	44
Tabela A.4 - Balanço Entálpico à Máquina de Branquear Artos	45
Tabela A.5 - Balanço Entálpico à Máquina de Lavar Benninger	45
Tabela A.6 - Balanço Entálpico à Secadeira Artos	46
Tabela A.7 - Balanço Entálpico à Secadeira Omez	46
Tabela A.8 - Balanço Entálpico à Secadeira Wumag	47
Tabela A.9 - Balanço Entálpico à Mercerizadeira	47
Tabela A.10 - Balanço Entálpico à Máquina de Estampar Rotativa nº 2	48
Tabela A.11 - Balanço Entálpico à Máquina de Estampar Rotativa nº 3	48
Tabela A.12 - Balanço Entálpico à Máquina de Estampar Plana	48
Tabela A.13 - Balanço Entálpico à Râmola nº 3	49
Tabela A.14 - Balanço Entálpico à Râmola nº 4	49
Tabela A.15 - Balanço Entálpico à Râmola nº 5	49
Tabela A.16 - Balanço Entálpico à Râmola nº 6	50
Tabela A.17 - Balanço Entálpico à Râmola nº 7	50
Tabela A.18 - Balanço Entálpico à Calandra nº 1	50
Tabela A.19 - Balanço Entálpico à Calandra nº 2	51
Tabela A.20 - Balanço Entálpico ao Polimerizador	51
Tabela B.1 – Especificações dos permutadores de calor usados	52

Notação e Glossário

C_p	Capacidade calorífica específica	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
$\dot{m}_{\text{água}}$	Caudal mássico de água	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
MC_p	Taxa de capacidade calorífica	$\text{kW}\cdot\text{°C}^{-1}$
\dot{m}_{seca}	Caudal mássico seco	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
Q	Calor	kW
T_F	Temperaturas de saída	°C
T_I	Temperaturas iniciais	°C
T_{Ref}	Temperaturas Referência	°C
ΔH	Entalpia	$\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$
A_{TOTAL}	Área total	m^2
$A_{\text{MÉDIA PC}}$	Área média por permutador de calor	m^2
P_{Ref}	Pressão referência	bar

Lista de siglas

FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IP	Integração de processos
M€	Milhões de euros
MER	Máxima recuperação de energia
MPE	Metodologia do Ponto de Estrangulamento
PE	Ponto de estrangulamento
S. A.	Sociedade Anónima
UF	Utilidades frias
UQ	Utilidades quentes
ΔT_{MIN}	Diferença Mínima de Temperatura

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

No âmbito do protocolo Galp 202020 surgiu o tema Integração Energética no Grupo Lameirinho, que incide no estudo de integração de processos dentro das instalações da Lameirinho Industria Têxtil S.A..

Sob um ponto de vista energético, definiu-se o objetivo de otimizar o processo utilizando a metodologia do ponto de estrangulamento (MPE). Esta metodologia consiste na diminuição da energia primária consumida. Para este efeito faz-se uso do excesso de energia contida das correntes quentes e da carência de energia das correntes frias, permutando de calor entre as mesmas ao longo do processo.

Neste sentido, durante o período de realização do projeto foi feito um estudo aprofundado do processo de fabrico na empresa Lameirinho, realçando os balanços mássicos e energéticos, para que a metodologia do ponto de estrangulamento pudesse ser aplicada.

O objetivo principal deste trabalho incide na criação de oportunidades de integração energética na fábrica da Lameirinho, o que exige uma análise detalhada do funcionamento de cada equipamento. Esta indústria não é uma típica indústria química, pelo que a identificação das correntes para aplicação da MPE, nem sempre é simples, e por isso é uma etapa delicada que exige especial atenção.

Assim, as etapas propostas no sentido de conseguir o objetivo final foram as seguintes:

- i) Identificação das correntes disponíveis para integração energética;
- ii) Caracterização das correntes disponíveis;
- iii) Construção da rede de permutadores de calor – Metodologia do Ponto de Estrangulamento;
- iv) Verificação do estado atual da Lameirinho e identificação dos locais a atuar.

A fase da construção da rede de permutadores de calor foi baseada na informação retirada da ferramenta informática FI²EPI.

1.2 Apresentação da Empresa

A Lameirinho, Indústria Têxtil, sediada em Pevidém, Guimarães, foi fundada pelo pai do atual administrador – Sr. Comendador Albano Coelho Lima. Aposta no Design e Inovação, com equipas de design e desenvolvimento em Barcelona e Guimarães.

A Ecologia, Sustentabilidade e Proteção do Meio Ambiente é uma preocupação constante sendo certificada em diversas normas como Certificado “GOTS” (Global Organic Textile Standard), ISO9001 – qualidade, ISO14001 – Ambiente, OHSAS18001 – Segurança.

Em termos produtivos, esta indústria processa cerca de 2 500 toneladas de tela, 30 milhões de m² de tecido e 12,5 milhões de unidades confeccionadas, resultando numa faturação de 50 M€, sendo o seu valor acrescentado bruto de 13,5 M€. Para uma produção destas dimensões, os encargos energéticos representam no total 2,8 M€.

Por ser uma indústria vertical, que contempla todo o processo produtivo do tecido desde a confeção da tela até à expedição do produto final, emprega 675 colaboradores.

1.3 Contributos do Trabalho

Após a realização deste estudo pretende-se que seja conhecida a situação energética atual da Lameirinho, verificando se existem oportunidades de melhoria energética dentro da mesma.

A aplicação da MPE nas indústrias contribui para que a eficiência energética destas aumente, reduzindo consumos de energia primária e tornado a industria ecologicamente mais admissível.

1.4 Organização da Tese

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos.

No Capítulo 1 - Introdução, faz-se uma breve apresentação da empresa Lameirinho, Indústria têxtil S.A., onde foi desenvolvido este projeto, e dos objetivos propostos para o desenvolvimento do projeto.

No Capítulo 2 – Estado de Arte, faz-se um enquadramento geral da indústria têxtil em Portugal, assim como uma breve introdução da matéria de Integração de Processos.

No Capítulo 3 – Descrição Técnica, descreve-se o contexto teórico da Metodologia do Ponto de Estrangulamento, metodologia utilizada para a realização do projeto. Apresenta-se também o processo produtivo da Lameirinho, a descrição e os consumos referentes ao ano de 2012 em utilidades quentes nos equipamentos analisados da Lameirinho.

No Capítulo 4 – Discussão dos Resultados, apresentam-se os resultados obtidos após a aplicação da Metodologia do Ponto de Estrangulamento, e os pontos identificados como prioritários para atuar no sentido da melhoria da eficiência energética.

No Capítulo 5 – Conclusões, explicitam-se as conclusões do trabalho desenvolvido, assim como as dificuldades encontradas e a proposta para trabalho futuro.

2 Contexto e Estado da Arte

2.1 Setor Têxtil

O setor têxtil inclui o processamento de diversos tipos de matérias-primas podendo estas ser processadas na forma de misturas. As matérias-primas do setor têxtil podem ter três origens diferentes: i) poder ser de origem natural, como é o caso do algodão, lã, seda, linho, etc, ii) poder ser fabricadas a partir de celulose regenerada (fibras artificiais) como é o caso da viscose e do acetato, e ainda iii) poder ser de origem totalmente sintética como é exemplo o poliéster e a poliamida.

Até à obtenção final do tecido, a produção deste decorre em quatro diferentes etapas de processamento: produção de fio, produção de tela, acabamentos e confeção. No setor têxtil encontra-se empresas designadas por empresas verticais, porque incluem no seu processo de fabrico as quatro etapas do processo produtivo do tecido, e empresas que apenas se dedicam exclusivamente a uma das etapas.

A produção de fio inclui duas fases, a preparação da matéria-prima e a fiação. Na etapa de preparação, as fibras naturais são lavadas ou limpas, cardadas e/ou penteadas, e as fibras sintéticas são estiradas, texturizadas, sujeitas a torção e termofixação. As fibras artificiais apresentam-se normalmente na forma de fibras curtas sendo tratadas de forma idêntica às fibras naturais excluindo as operações de limpeza. A produção de fio realiza-se normalmente em empresas especializadas nessa etapa, no entanto existem empresas verticais que incluem esta etapa no seu processo produtivo. Desta etapa de produção pode ainda fazer parte a operação de limpeza, no caso de a matéria-prima ser o algodão. Quando a matéria-prima é algodão, as operações de lavagem realizam-se noutras empresas, designadas por lavadouros.

A produção de tela consiste na fabricação de tecido ou malha, a partir do fio cru ou tingido. Na fabricação de tecidos ou malhas com padrões é necessário a utilização de fio tingido para a elaboração dos padrões, após esta etapa, o tecido segue diretamente para a fase de acabamentos químicos e mecânicos. Para a fabricação de tecido ou malha tiver como finalidade uma só cor, este pode ser produzido com fio cru, e posterior tingimento, ou com fio já previamente tingido, esta decisão depende por exemplo do tipo de matéria-prima, da própria encomenda, etc...

O setor dos acabamentos é a etapa mais complexa e que envolve os mais diferenciados processos. Nesta etapa inclui os processos de lavagem, branqueio, tingimento, estamparia, acabamentos químicos e mecânicos. Mesmo em empresas verticais, a operação de

estampagem é menos frequente e é quase sempre realizada em empresas especializadas neste tipo de acabamento. Existem, no entanto, inúmeras empresas dedicadas exclusivamente aos processos de ultimação.

No último setor, a confeção, procede-se ao fabrico de têxteis lar, têxteis técnicos, vestuário, etc. Em empresas verticais da área têxteis lar (roupa de cama, cobertores, atalhados, etc.), e têxteis técnicos (telas para pneus, lona, etc.), o setor da confeção está abrangido no seu processo produtivo. Em áreas como o do vestuário, a confeção abrange as etapas de planeamento, corte, termocolagem, confeção, prensagem e revista.

Contudo, existem indústrias têxteis que não seguem as etapas descritas anteriormente como é exemplo o fabrico de rendas, bordados, artigos de retrosaria, transformação de resíduos têxteis para aplicação mais rudimentares, por exemplo, em enchimentos de almofadas e colchões [1].

A Indústria Têxtil e de Vestuário é uma das mais importantes indústrias para a economia portuguesa. Esta representou cerca de 9% do total das exportações portuguesas no ano de 2012, e como é possível verificar na Figura 1, tanto o volume de negócios como a produção estão a decair nos últimos anos [2].

Segundo dados provisórios, das estimativas da Associação de Têxteis e Vestuário de Portugal ATP, com base nos indicadores do Instituto Nacional de Estatísticas, INE, em 2012 o volume de negócios do Setor Têxtil e do vestuário rondou os 5 800 M€. Em termos de importações e exportações, este representaram 3 045 M€ e 4 130 M€, respetivamente. Existem cerca de 11 000 empresas neste setor em Portugal, gerando emprego a cerca de 150 000 pessoas, correspondendo este valor a cerca de 20 % do emprego na indústria transformadora em Portugal [3].

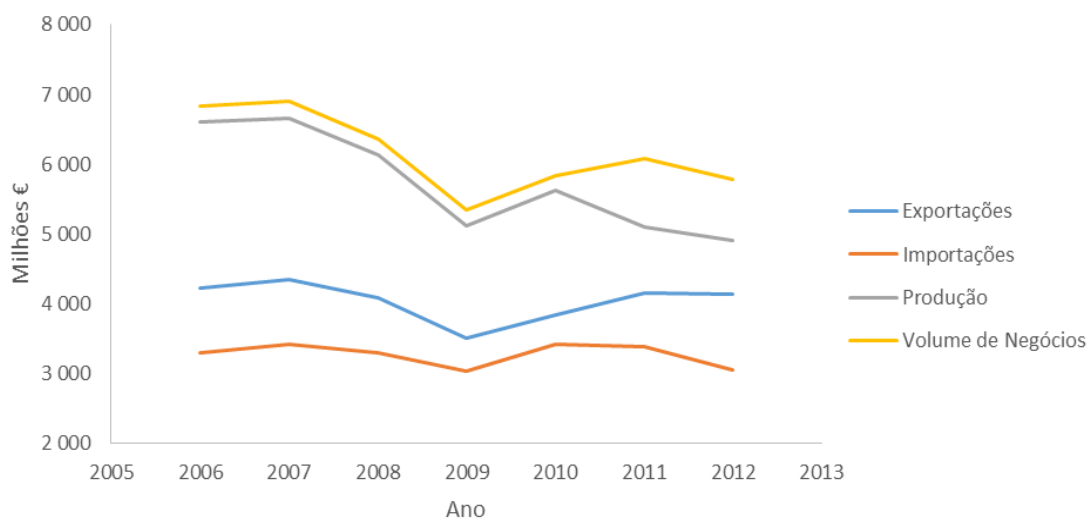


Figura 1 - Evolução da Indústria Têxtil e do Vestuário [2].

Dado este panorama, o sector têxtil português, que já se distingue nos mercados externos pela sua qualidade, tem agora de se manter competitivo a nível económico. Essa competitividade económica não passa só pela preocupação na conservação da energia, mas é um ponto fulcral que tem de ser analisado, e merece especial atenção. A racionalização da energia nas empresas tem impacto não só a nível económico como também a nível ambiental. A promoção para a eficiência energética efetua-se através da implementação de novas tecnologias e metodologias no processo de fabrico e mudança de comportamentos, representando uma redução no consumo e nos custos da energia.

2.2 Integração de Processos

Inicialmente, a criação dos diagramas processuais das indústrias não seguiam procedimentos sistemáticos de projeto. Baseavam-se em instalações piloto e na sua extrapolação para a escala industrial. A investigação nesta área intensificou-se e rapidamente engenheiros do processo deram início à elaboração dos diagramas processuais baseada em operações unitárias como transferência de calor, reação, transferência de massa [4].

Mais tarde, Hohmenn (1971), Umeda (1978, 1979) e Linnhoff (1978, 1979), investigadores independentes desta área, deram a conhecer a Integração de Processos nesta fase ainda apenas na vertente de Integração Energética. No entanto foi o grupo de Linnhoff (1980) que aplicou esta metodologia a indústrias. A Metodologia do Ponto de Estrangulamento (MPE) foi introduzida assim por Linnhoff para representar uma nova base de métodos termodinâmicos que estabelecem metas para o consumo e custos mínimos de energia primária, assim como a rede de permutadores de calor otimizada, com a finalidade de se minimizar a utilização de energia primária. Nas últimas duas décadas, esta descoberta resultou no desenvolvimento do processo químico e da conservação da energia [4].

A Metodologia do Ponto de Estrangulamento (MPE) é uma metodologia simples, baseada na primeira e segunda leis da termodinâmica, que fornece informação essencial para o projeto de indústrias energeticamente sustentáveis.

O Consumo Mínimo de Utilidades Quentes e Frias, a Rede Ótima de Permutadores de Calor, assim como a Área Mínima Total de Transferência de Calor são algumas das informação relevantes extraídas do estudo de integração energética através da MPE, estes valores obtidos indicam a situação ótima em que a indústria deve operar. No entanto existem situações em que a rede de permuta ótima de calor entre as correntes disponíveis na fábrica não é possível

sem implementada, ou por limitações físicas da indústria, ou pois o investimento pode não compensar a redução de custos em termos de energia primária.

Por este motivo, antes da aplicação da rede de permutadores de calor resultante da MPE, esta tem de ser avaliada por alguém com um vasto conhecimento da indústria em causa.

Com base nos desenvolvimentos na área da Integração Energética, a Integração de Processos foi expandida para outras áreas, iniciando-se assim a utilização do conceito de Integração de Processos, propriamente dita, nas operações unitárias, hoje em dia em diversas áreas como recuperação de energia e recuperação mássica como é exemplo as correntes de refluxo, etc.

Atualmente a tendência é integrar os processos unitários em processos mais complexos, evitando diagramas processuais tão extensos e complexos como os atuais, no sentido de tornar os projetos mais económicos tanto em termos energéticos como em termos de matéria-prima.

Como já foi referido anteriormente, a Integração de Processos surgiu na década de 80 e desde essa altura passou a ser utilizada sistematicamente em certas atividades, principalmente na fase de projeto dos processos industriais. O ponto central da Integração de Processos é ainda hoje em dia a Integração Energética.

A definição de Integração de Processos foi enunciada num encontro no âmbito da agência internacional para a energia (International Energy Agency [IEA]), em 1993:

“Métodos sistemáticos e generalizados para projetar sistemas de produção integrados, que abrangem desde processos individuais a sistemas gerais, com ênfase especial para o uso eficiente de energia e redução dos efeitos ambientais”.

2.3 A Lameirinho

Para que a Lameirinho Indústria Têxtil S.A. se mantenha competitiva nos mercados internacionais, tem também de inovar em termos energéticos, pois a melhoria em qualquer empresa é contínua, e existe sempre algo em que a inovação tecnológica pode atuar.

Em 1997 foi feita uma primeira análise energética ao processo de fabrico na fábrica da Lameirinho, em parceria com o IST, na tentativa de proceder à otimização dos consumos energéticos desta mesma unidade e consequente redução dos custos operacionais e da emissão de efluentes. Mais tarde, tal como surgiu este projeto em parceria com a GALP, também surgiu em 2010 um outro projeto, onde foi estudado apenas um equipamento, as râmolas, e onde se estudaram três possíveis cenários para verificar qual dos casos obteria maior eficiência energética na própria râmola.

3 Descrição Técnica

3.1 Metodologia do Ponto de Estrangulamento

De forma a aumentar a produtividade de uma unidade industrial reduzindo os custos com as utilidades necessárias como a água, matérias-primas entre outros, a indústria aposta na integração de processos de forma eficiente. Esta técnica é aplicável nas mais diversas situações tais como planeamento, projeto e operação de processos e sistemas de utilidades, planeamento de campanha a curto prazo, e estratégico a longo prazo, novos projetos e em projetos de melhoramento de processos, e integração entre processo e sistemas de utilidades. Baseia-se na mistura de três conceitos: em regras heurísticas, conceitos de termodinâmica e técnicas de otimização de energia. Pode afirmar-se que a integração de processos é hoje um instrumento necessário para as indústrias, tendo por base a recuperação de energia dos processos, reduzindo os custos operacionais e de investimento. Com esta técnica há uma tendência de olhar para o processo global de uma indústria, como uma unidade única, e não como várias operações unitárias.

Num processo industrial existem inúmeras correntes que necessitam de serem aquecidas ou arrefecidas. Devido muitas vezes ao elevado numero destas, o processo torna-se complexo e difícil de resolver e de garantir aspetos de operacionalidade, flexibilidade, segurança e controlabilidade. Muitos dos problemas passam pelo elevado número de combinações possíveis, pelas propriedades físicas das correntes que podem depender da temperatura ou até pela escolha do tipo de material de construção, da configuração do escoamento e do tipo de permutadores de calor. As correntes, na IP, têm designações consoante a função que desempenham. É chamada de corrente quente, a corrente que dispõe de energia a mais, e necessita de ser arrefecida, e corrente fria, a corrente que carece de energia, e por isso necessita de ser aquecida [5].

O objetivo principal na integração de processos é a redução do consumo de energia primária, encontrando a rede de permutadores possível e que minimize o custo total do processo. Esta rede apresenta a melhor relação custo operacional (consumo de utilidades quentes e/ou frias) e o custo fixo (unidades de troca térmica). Para a construção desta rede é necessário inicialmente definir os pontos de referência para a aplicação da metodologia do ponto de estrangulamento. Estes são o consumo mínimo de utilidades, área global mínima de troca térmica e o número mínimo de unidades de troca térmica (permutadores) [5].

Entende-se por utilidades frias, correntes que têm a capacidade de retirar energia a outras, quando estas necessitam de serem arrefecidas. As utilidades frias podem ser água fria, água gelada, ou qualquer outro fluido térmico de arrefecimento, e após a sua utilização necessitam de serem novamente arrefecidas em unidades, por norma existentes nas fábricas.

Entende-se por utilidades quentes, correntes que têm capacidade de fornecer energia às correntes que carecem da mesma. Estas podem ser vapor de água saturado, água quente a alta temperatura ou qualquer fluido térmico de aquecimento, que após a sua utilização retornam as unidades da sua produção para que voltem a ser aquecidas.

Passos para a Metodologia do Ponto de Estrangulamento

A MPE tem como principal objetivo a poupança de energia no processo industrial, fazendo com que correntes quentes troquem energia com correntes frias. Na Figura 2 apresenta-se os passos chaves que esta metodologia segue. Uma análise do ponto de estrangulamento inicia-se pela elaboração do balanço material e entálpico à unidade industrial. É necessário a aquisição de dados sobre as correntes a estudar e fazer uma análise das metas a ser possível atingir. Ao utilizar-se a MPE é possível identificar as modificações para as condições do processo em estudo que venham a ter impacto na poupança de energia [6]. Pode dividir-se este método em duas diferentes etapas. Na primeira parte, a determinação de vários pontos de referência a partir da definição da Diferença Mínima de Temperatura (ΔT_{MIN}) entre correntes quentes e frias do processo e dados do processo. Na segunda parte, efetua-se a síntese da rede. O MPE é uma das metodologias disponíveis para a definição de uma rede em que o objetivo é obter a máxima recuperação de energia, rede MER.

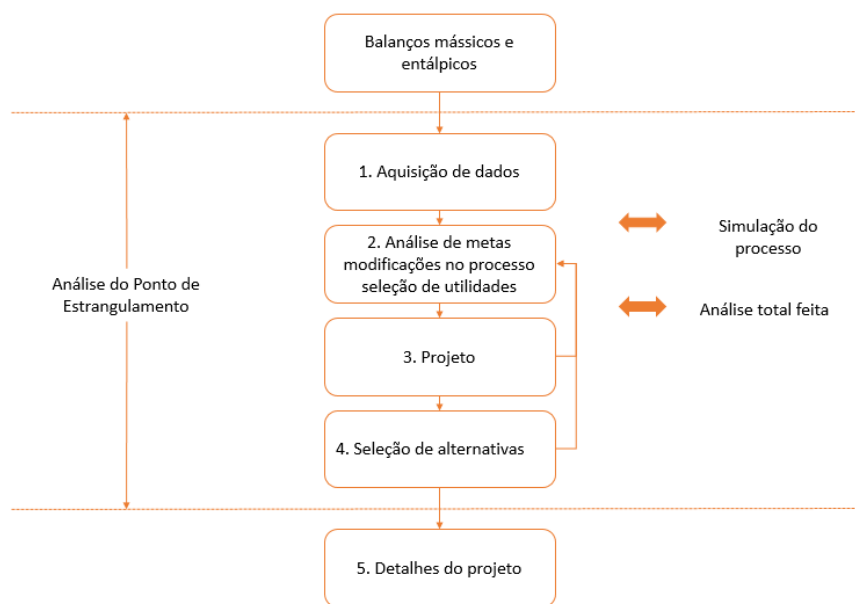


Figura 2 - Passos chave para a execução da MPE.

Aquisição de dados

A MPE é aplicada de forma a identificar a economia possível para o processo e ajudar na construção das redes de permutadores de calor para atingir a meta desejada. A identificação das correntes disponíveis e a aquisição de dados é um dos primeiros passos necessários para a análise do Ponto de Estrangulamento de um determinado balanço material e entálpico. Por vezes este passo é longo e consoante as indústrias pode tornar-se bastante complexo. Com estes dados será possível identificar quais as correntes quentes e frias do processo, como pode observar-se no exemplo da Tabela 1.

Tabela 1 - Exemplo de Dados Necessários para a análise da MPE.

Corrente	Tipo de corrente	$T_I / ^\circ\text{C}$	$T_F / ^\circ\text{C}$	$MC_P / \text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$
1	Quente	180	80	20
2	Quente	130	40	40
3	Fria	60	100	80
4	Fria	30	120	36

Os dados base das correntes do processo necessários para a aplicação do MPE são: temperaturas iniciais (T_I), temperaturas de saída (T_F), e a taxa de capacidade calorífica (MC_P) que se calcula através da Equação 1 - Cálculo da Taxa de Capacidade Calorífica,

$$MC_P = C_p \times \dot{m} \quad (\text{calcula através da Equação 1})$$

em que C_p é a capacidade calorífica específica expressa em $\text{kJ}\cdot^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ e \dot{m} é o caudal mássico expresso em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Outro ponto importante a definir antes do início do projeto é a diferença mínima de temperatura (ΔT_{MIN}). Este valor representa a diferença mínima que duas correntes, uma quente e outra fria pode ter num dos extremos de um permutador de calor, em termos físicos, este valor nunca pode ser transposto. O ΔT_{MIN} é bastante importante aquando da execução do projeto.

Ferramentas de visualização

Após a obtenção da tabela do conjunto de correntes quentes e frias disponíveis para a aplicação da MPE, é possível construir ferramentas que nos facilitem a visualização dos consumos mínimos de utilidades e do comportamento energético do processo. O diagrama das Curvas Compostas e a Grande Curva Composta são dois exemplos disso mesmo.

O Diagrama das Curvas Compostas é apresentado na Figura 3. O ponto em que as curvas mais se aproximam é denominado de ponto de estrangulamento (PE) e esta aproximação

representa a ΔT_{MIN} . A área comum entre a curva composta fria e a curva composta quente representa todo o calor que é possível recuperar entre as correntes já existentes no processo, através da integração energética. Neste exemplo, é possível verificar que parte considerável da energia requerida para aquecer correntes frias é possível ser reaproveitada de correntes quentes existentes no processo.

O diagrama das curvas compostas fornece ainda a informação da quantidade mínima de energia que é necessário fornecer e retirar ao processo para que este desempenhe a sua função. No canto superior direito, a diferença energética entre as duas curvas compostas representa o consumo mínimo de utilidades quentes e no canto inferior esquerdo, a diferença energética entre as duas curvas compostas representa o consumo de utilidades frias [6].

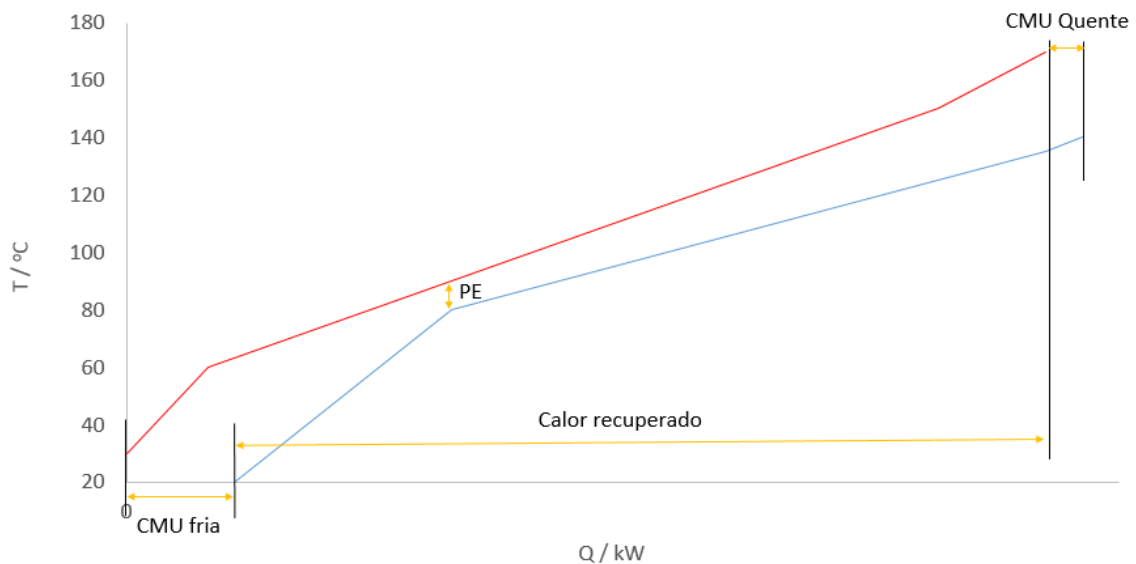


Figura 3 - Exemplo do Diagrama das Curvas Compostas.

Como é possível visualizar na Figura 4 o processo é dividido em dois subprocessos, um subprocesso encontra-se acima do PE em equilíbrio com as utilidades quentes, encontrando-se o outro subprocesso abaixo do mesmo em equilíbrio com as utilidades frias. A identificação do ponto de estrangulamento define a temperatura onde não deve haver trocas de energia entre correntes para que a obtenção o consumo mínimo de utilidade, para isso, acima do PE só se deve introduzir utilidades quentes e abaixo do ponto de estrangulamento só se deve introduzir utilidades frias. A visualização do PE na Figura 4 é no local onde a Grande Curva Composta interceta o eixo das ordenadas do gráfico.

No caso de o PE se encontrar em algum dos extremos do gráfico, só se recorre a utilidade quentes ou frias, de acordo com a localização do mesmo. No sentido de se evitar esta situação, é possível aumentar a ΔT_{MIN} para que haja consumo de ambas as utilidades. No entanto, o

acréscimo do ΔT_{MIN} aumenta consequentemente o consumo de utilidades, tanto frias como quentes.

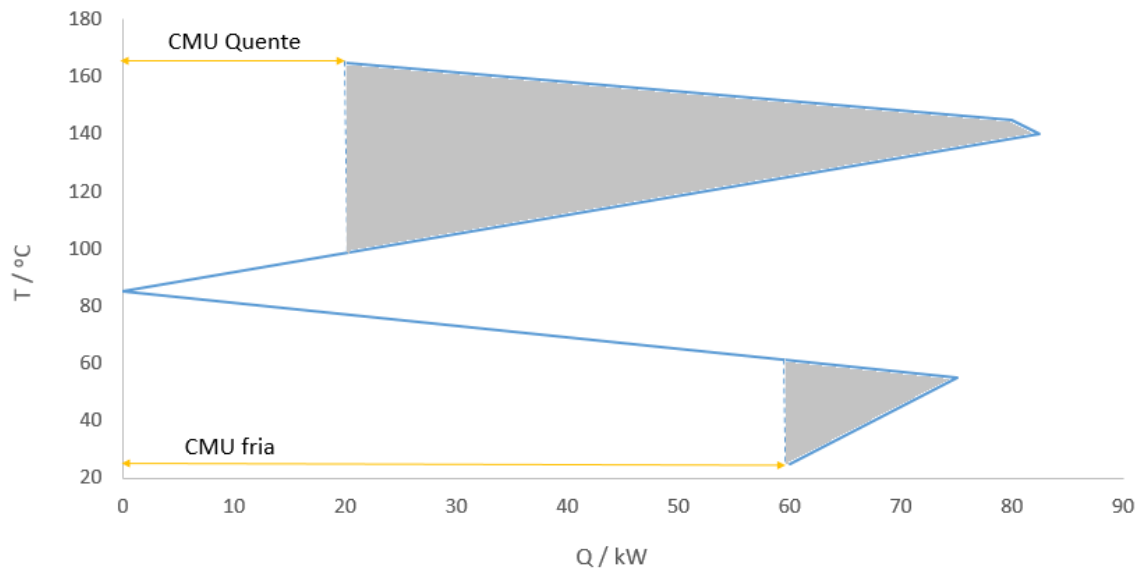


Figura 4 - Exemplo da Grande Curva Composta.

3.1.1 Aplicação informática de apoio

Hoje em dia já existem várias aplicações informáticas de apoio à aplicação da metodologia do ponto de estrangulamento. Em aplicações industriais da MPE estas ferramentas podem vir a revelar-se muito úteis devido ao extenso número de correntes a analisar. Existem várias aplicações disponíveis, de diferentes fornecedores como por exemplo a AspenTech que lançou o Aspen Energy Analyzer, ou a KBC que comercializa o Supertarget. No entanto existem também disponíveis aplicações de origem académica, não comerciais, como é o exemplo do FI²EPI, que foi desenvolvido pelo IST em conjunto com a ADENE. Esta é a ferramenta informática escolhida para o apoio da aplicação da MPE neste estudo [7].

O FI²EPI, Ferramenta Informática para Integração Energética de Processos Industriais, é uma ferramenta web que executa em qualquer navegador de Internet com o plug-in Flash Player instalado. Desenvolvida em Adobe Flex/Flash Builder, a ferramenta permite a identificação de oportunidades de melhoria da eficiência energética de processos industriais, quer em fase de projeto quer em fase de reformulação de instalações [8].

A informação que é necessário fornecer a esta aplicação são os dados termodinâmicos das correntes assim como o ΔT_{MIN} que se pretende entre elas.

Através da introdução da informação termodinâmica das correntes disponíveis para a permuta de calor, da ΔT_{MIN} e dos dados das utilidades que estão disponíveis, a aplicação FI²EPI fornece

as ferramentas de apoio à interpretação da situação operacional atual da indústria a avaliar, tais como a Curva Composta e a Grande Curva Composta.

Conseguidas as informações necessárias, por interpretação das ferramentas de apoio retiradas do FI²EPI, é possível construir a rede de permutadores de calor, a qual será posteriormente introduzida novamente no FI²EPI, para que este faça a análise económica, estimando os custos de equipamento e de operação consoante a rede construída.

3.2 Esquema processual da Lameirinho

A Lameirinho é uma indústria têxtil que garante todo o processo desde a confeção da tela até à expedição do produto final. Por uma questão de organização, a fábrica da Lameirinho está dividida em três grandes secções, sendo elas a tecelagem, os acabamentos e a confeção. É na área dos acabamentos que vai incidir a aplicação da MPE, uma vez que esta secção é a maior consumidora de energia térmica da fábrica. Na Figura 5 apresenta-se o diagrama processual para a confeção do tecido.

A matéria-prima dos acabamentos são as telas com diferentes composições e diferentes texturas. As telas a acabar são organizadas em lotes, aos quais são atribuídas gamas operatórias específicas de acordo com o tipo de acabamentos pretendido para os mesmos. Neste sector, não há uma sequência padrão de operações a realizar, uma vez que estas dependem da finalidade de cada produto.

Devido à existência de diversificadas matérias-primas, pesos e larguras das telas, onde cada pode ter os mais variados destinos, não existe um cenário tipo de produção dentro das instalações. Consoante a origem e o destino, as condições de operação dos próprios equipamentos serão ajustados. As condições operacionais podem não ser repetidas de lote para lote, assim como a sequência das operações.

Para a aplicação da MPE, a criação de cenários extremos de produção seria o mais indicado. Para a execução desta tarefa, seria necessário a avaliação de todos os tipos de lote, e para todos os tipos de fim que estes possam ter, e posterior avaliação das condições extremas. Esta tarefa tornar-se-ia extremamente alongada, e não foi exequível.

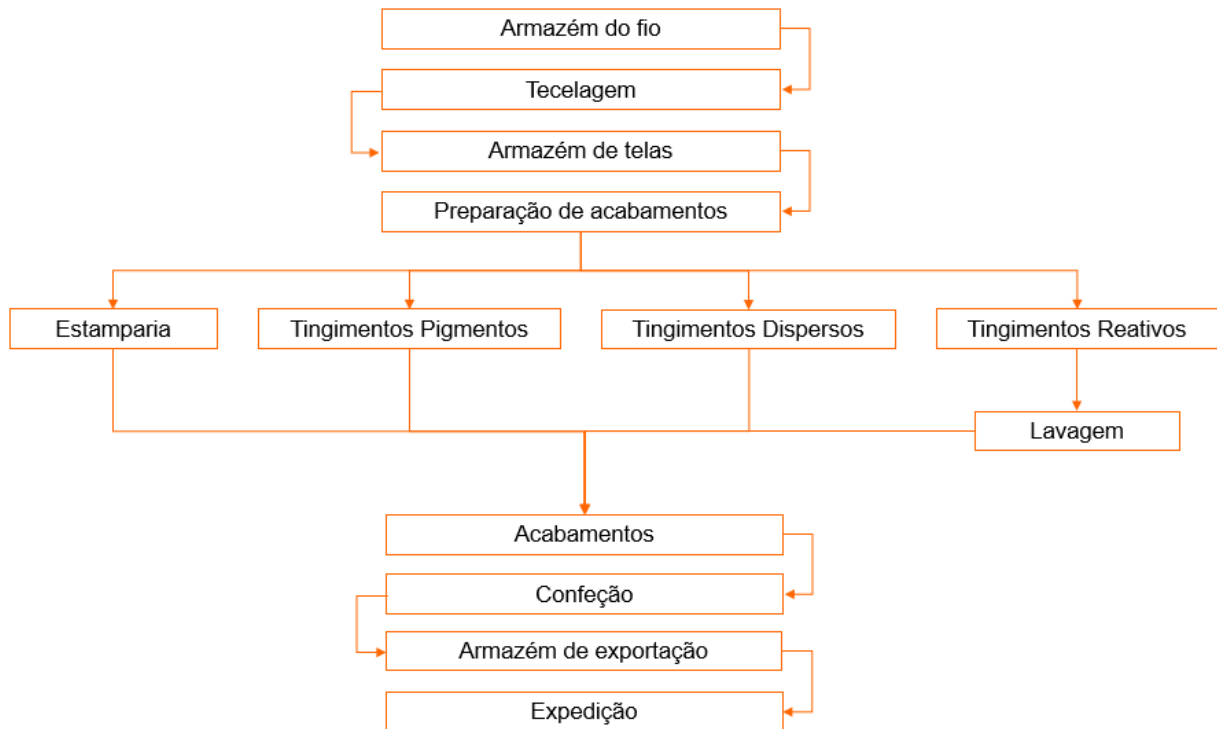


Figura 5 - Esquema Processual Lameirinho.

Dado este panorama, a recolha de informação referente às condições operatórias da fábrica foi feita consoante a disponibilidade da fábrica para tal. Apesar de não ter sido feito o estudo das condições extremas de produção da fábrica, os cenários avaliados não diferem da realidade da produção diária da fábrica.

Na caracterização das correntes disponíveis para a aplicação da MPE, foi necessário fazer-se balanços mássicos e entálpicos a cada uma das máquinas de cada operação. Esses balanços foram elaborados com base em medições de todas as correntes de entrada e saídas das máquinas. Essas medições nem sempre foram efetuadas, pela falta de acessos, tendo sido estes, sempre que possível criados. Apesar do esforço na criação dos meios para a melhoria do estudo, tal nem sempre possível, pelo que, aquando dessa impossibilidade, foram estimados valores.

Uma vez que a MPE não pode interferir no processo de fabricação do tecido, para a determinação das correntes disponíveis para a aplicação da MPE, cada equipamento a analisar foi considerado um bloco fechado, onde o tecido entra juntamente com o tratamento a que é sujeito, e sai já tratado, juntamente com os “resíduos”.

Cada equipamento foi analisado para se verificar se este estava a operar nas condições ótimas, ou se caso as condições de entrada fossem alteradas se obteria melhor rendimento do equipamento.

Assim determinaram-se as correntes a analisar e a caracterizar para a aplicação da MPE. Qualquer ponto intermédio onde fosse possível fazer balanço, foi considerado que a sua influência seria traduzida nas saídas globais do equipamento, e por isso, não foi considerado nos balanços globais aos equipamentos.

A MPE foi inicialmente aplicada em indústrias petroquímicas e química, no entanto, nos últimos anos esta tem vindo a ser aplicada nas mais variadas indústrias. Apesar disto, a indústria têxtil não é uma indústria onde a aplicação da MPE seja direta, e por essa razão houve considerações a fazer-se.

A primeira consideração, e mais importante, foi considerar que esta opera em contínuo. Foi feita esta consideração, uma vez que cada equipamento opera consoante o escalonamento da produção, no entanto é possível direcionar o escalonamento da produção para que os equipamentos desejados funcionem ao mesmo tempo, caso seja energeticamente mais eficiente.

A segunda consideração foi a temperatura de entrada da água nas máquinas. Uma vez que a interpretação da MPE deve ser feita sem a consideração de trocas de calor já existentes na indústria, e como a Lameirinho já é portadora de unidades de recuperação de energia, as correntes de entrada da água nos equipamentos, foi considerado que estas provinham da rede pública e por isso se encontravam a cerca dos 25 °C.

A terceira consideração feita foi em relação à temperatura do ar ambiente que necessita de aquecimento prévio. Uma vez que esta varia consoante a altura do ano, houve a necessidade de se estipular um valor constante. Esse valor foi de 25 °C, apesar de durante o verão se obter temperaturas consideravelmente superiores, no entanto durante o inverno esta temperatura é facilmente conseguida durante o funcionamento dos vários equipamentos que operam a altas temperaturas ao mesmo tempo, em salões fechados. Uma vez que o aumento de temperatura favorece a operação definiu-se como meta de temperatura 120 °C. Este valor pode não ser atingido, mas qualquer aumento de temperatura na corrente de ar ambiente traduz um decréscimo de consumo de gás natural. Este valor é apenas uma meta teórica, não havendo obrigatoriedade de chegar a tal. A energia que não for possível transferir inicialmente é posteriormente fornecida pela combustão de gás natural.

A quarta, e última, consideração foi feita para evitar complicações futuras em relação a equipamentos. Definiu-se a temperatura final das correntes de ar de exaustão como 102 °C para evitar-se a condensação da humidade presente nestas. Esta condensação poderia trazer complicações em relação à escolha de permutadores de calor a utilizar, caso estas correntes possam ser reaproveitadas energeticamente.

3.2.1 Instrumentação Utilizada

A Lameirinho é uma indústria antiga que tem vindo a atualizar-se, no entanto, a informação disponível para a caracterização das correntes é na maioria das vezes insuficiente. No sentido de ultrapassar esta dificuldade, foram feitas medições adicionais utilizando instrumentação adequados.

Não existem dispositivos de controlo e medição de caudal, pressão e temperatura, do ar de exaustão, em nenhum dos equipamentos que possuem chaminés, e por essa razão todas as chaminés, dos equipamentos a analisar, tiveram de ser visitadas para se poder concluir o balanço mássico. As medições nas chaminés foram realizadas através de acessos já existentes. Em certos casos, houve necessidade de se abrir um acesso à chaminé, por inexistência do mesmo. Para se efetuar o balanço mássico e entálpico global a este tipo de equipamentos, esta era uma corrente que era necessário caracterizar-se. Assim foi utilizado um tubo de *Pitot*, representado na Figura 6, existente na Lameirinho. Este é introduzido na chaminé onde se pretende conhecer o caudal, para determinação da pressão estática e total da corrente do ar de exaustão.



Figura 6 - Tubo de *Pitot* [9].

Conhecidos os valores da $P_{estática}$ e P_{total} , através da Equação 2

$$\dot{m} = A \cdot \sqrt{2 \times \frac{P_{Total} - P_{Estática}}{\rho}} \quad (2)$$

resultante da manipulação da equação de Bernouli para tubos de *Pitot* é determinado o caudal da chaminé.

Também foi necessário estimar a humidade relativa das correntes de ar de exaustão. O método utilizado foi através da determinação da temperatura do bolbo seco e bolbo húmido da corrente de ar. Conhecidos os valores destas temperaturas consultou-se um diagrama

psicométrico, para extração do valor da humidade na chaminé. Em certos equipamentos, tal método não foi possível aplicar, devido aos acessos às chaminés serem de dimensões reduzidas, nessas situações utilizou-se um *Textometer*.

A medição da temperatura das correntes que não dispunham de um termómetro incorporado foi feita através de um termómetro digital da Testo.

Pela inexistência de equipamentos portáteis de medição de caudais líquidos, os caudais utilizados foram validados por leitura de contadores de caudal já instalados nos equipamentos, e no caso de não haver meio para a determinação de alguma corrente, este foi determinado por balanço mássico ao equipamento.

Em equipamentos que careciam de mais do que um contador de caudal, ou estes se encontravam inativados, o balanço mássico, e consequentemente o balanço entálpico, não foi possível efetuar-se. Sempre que houve oportunidade instalou-se contadores de caudal para que fosse possível considerar um maior número de equipamentos e consequentemente um maior número de correntes, tornando o estudo mais completo.

As medições por sua vez acarretam um erro significativo associado. Para a validação da análise aos balanços entálpicos dos equipamentos, foi considerado resultado válido a partir do momento em que a diferença entre a entalpia à entrada e à saída fosse no máximo 10 %.

3.2.2 Sistema de Utilidades no Grupo Lameirinho

O grupo Lameirinho contém um sistema integrado de recuperação de energia contida na água quente, condensados e água residual. Existem seis unidades integradas de produção e de recuperação de energia. O Grupo Lameirinho está equipado com duas caldeiras de produção de vapor, uma cogeração (com dois motores e duas caldeiras), um desgasificador, uma unidade de recuperação de energia a baixa temperatura, UREBT, uma unidade de recuperação de energia a alta temperatura, UREAT e uma caldeira de aquecimento do termofluido. É destas unidades que saem as utilidades quentes para a fábrica Lameirinho, sobe a forma de água quente, vapor e termofluido. Todas elas, excetuando a caldeira de termofluido, estão de alguma forma interligadas, tal como está representado na Figura 7.

A cogeração possui dois motores de produção de energia elétrica, por ação de combustão do gás natural. O ar de exaustão proveniente da combustão é levado através de serpentinas até às caldeiras de produção de vapor. No fim, o ar de exaustão cede a energia ainda nele contida para elevar a temperatura da água que é alimentada às caldeiras para a produção de vapor.

Os motores da cogeração necessitam de ser arrefecidos, e por isso, consomem água para a arrefecimento dos motores. Esta água é captada da UREAT, mas antes de entrar nos motores da cogeração, esta tem de ser controlada para que a temperatura à entrada dos motores não seja superior a 70 °C. À saída dos motores, a água a alta temperatura é descarregada de novo na UREAT. Esta água, para além de servir de alimentação ao sistema de refrigeração dos motores da cogeração, também satisfaz as necessidades de consumo de água quente da fábrica, devido à sua elevada temperatura.

Existe ainda um outro circuito de arrefecimento dos motores, a uma temperatura inferior. A temperatura da água à entrada dos motores tem de ser controlada, para que não seja superior a 50 °C. Após o arrefecimento dos motores, esta água encontra-se a cerca dos 60 °C e tem de voltar a ser arrefecida para tornar aos 50 °C.

A UREBT é a unidade para onde a água residual da fábrica é dirigida para fazer aquecimento de água da rede. Após o aquecimento desta, a água residual segue para a ETAR e posteriormente é descarregada na rede de saneamento da fábrica. A água que sai aquecida da UREBT segue para a UREAT, para que seja possível elevar um pouco mais a temperatura da água do circuito de água a alta temperatura.

O desgasificador é o equipamento para onde os condensados que circulam em circuito fechado na fábrica são descarregados. Os condensados à chegada do desgasificador ainda possuem elevada temperatura, e estão limpos, e por isso, estes são novamente alimentados as caldeiras, para voltarem a ser transformados em vapor.

As duas caldeiras da Lameirinho fazem a produção de vapor através da alta temperatura dos gases de combustão do gás natural. Estes gases são posteriormente libertados para o ambiente ainda com a temperatura elevada.

Nesta indústria em específico, uma parte considerável das utilidades quentes e frias, pode vir a ter contacto direto com tecido, e no fim, podem ser consumidas pela fábrica, saindo juntamente com a água residual. A água quente para a lavagem, o vapor para o branqueio ou para o próprio aquecimento de equipamentos, a água fria da rede para lavagem também, são utilidades que em alguma altura serão escoadas para a água residual. A única utilidade em que isso nunca acontece é o termofluido. Este é aquecido na caldeira de termofluido por ação da combustão de gás natural, circula em circuito fechado nos equipamentos e retorna sempre à caldeira. Os gases de combustão da caldeira de termofluido são, tal como nas caldeiras de vapor, libertados para o ambiente ainda com uma temperatura elevada.

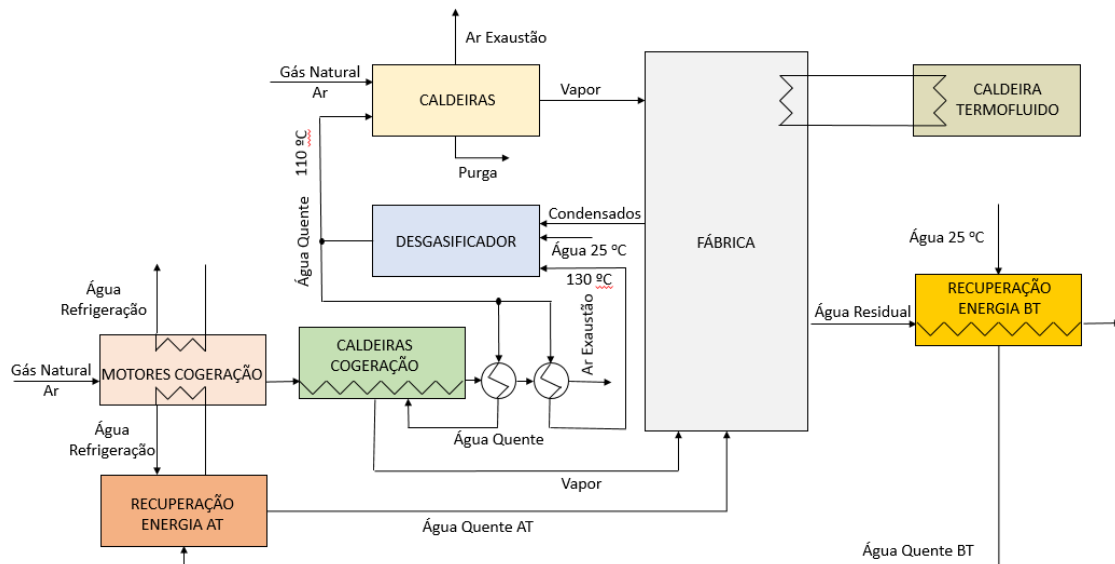


Figura 7 - Esquema Representativo do sistema de utilidades no grupo Lameirinho.

Para uma correta avaliação do estado energético atual da Lameirinho, foi necessário também se incluir algumas correntes do sistema de utilidades da fábrica. Assim, por análise ao que foi explicitado anteriormente sugeriu-se a introdução de nove correntes, quente e frias, disponíveis para a aplicação da MPE.

As correntes do sistema de utilidades da fábrica estão representadas na Tabela 3 pelas correntes 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 e 46.

As correntes 38 surge devido às condições operatórias limite do circuito de arrefecimento a alta temperatura dos motores da cogeração. A corrente 38 necessita de prévio aquecimento, nunca podendo ultrapassar os 70 °C. A corrente 39 é a corrente de água quente disponível, após refrigeração dos motores, que se encontra a alta temperatura, 103 °C, contém uma quantidade de energia muito elevada, sendo a corrente com mais energia disponível para ceder. Estas são as correntes que estão representadas na Figura 7 que circulam atualmente entre os motores da cogeração e a UREAT.

As correntes 40 e 41 surgem da mesma forma que surgiram as correntes 38 e 39, no entanto, este circuito funciona a média temperatura. A água proveniente do arrefecimento dos motores encontra-se a disponível a 60 °C, sendo a temperatura indicada para que esta entre nos motores 50 °C. Esta é a corrente que atualmente circula em circuito fechado, passando previamente em aeroarrefecedores para ser arrefecida.

A água para produção de vapor nas caldeiras da cogeração, corrente 43, e das caldeiras de produção de vapor, corrente 44, atualmente é proveniente do desgasificador, e chega as caldeiras a cerca dos 120 °C. Assim definiram-se estas correntes como correntes de água da

rede que tem necessidade de ser aquecida até aos 120 °C antes de entrar para as caldeiras, desta forma economiza-se o consumo de energia primária para a produção de vapor.

As correntes de gases de combustão que saem dos motores da cogeração, corrente 42, das caldeiras de produção de vapor, corrente 45, e que saem da caldeira de termofluido, corrente 46, são correntes que contem muita energia. Assim estas correntes, pela mesma razão estão disponíveis para a integração de processos no grupo Lameirinho.

3.2.3 Gasagem

Nesta operação para além de se eliminar o pelo apresentado em ambas as faces da tela por ação de queima do mesmo, faz-se também a operação de descolagem, a qual consiste na eliminação por via química e mecânica dos encolantes adicionados às teias na fase de preparação da teia.

Este equipamento está subdividido em dois equipamentos distintos, de acordo com o esquema apresentado na Figura 8, uma vez que a operação de gasagem do tecido é distinta da operação de descolagem do tecido, e em nada dependem uma da outra.

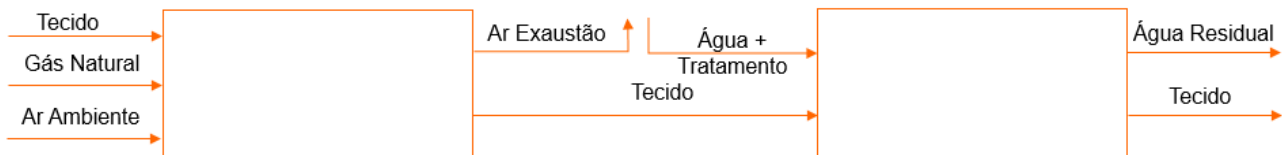


Figura 8 - Esquema representativo da Gasadeira.

Na caixa de combustão do gás natural existe uma chaminé que faz a exaustão dos gases de combustão. Resulta daqui uma corrente de ar de exaustão de elevada temperatura, que segue para o exterior. Uma vez que este calor não estava a ser recuperado, e não existe um destino onde esta corrente seja reaproveitada, o calor contido nesta corrente está disponível, não havendo uma temperatura final obrigatória. Assim determinou-se que esta corrente de ar, devido à humidade presente nela, poderia ceder energia até atingir os 102 °C, evitando-se a condensação da água, e posteriores complicações em termos de equipamentos. Esta corrente está representada na Tabela 3, descrita como corrente 22.

No balseiro de água para eliminação dos encolantes, a água, juntamente com químicos de tratamento do tecido, é alimentada fria ao equipamento e é aquecida dentro deste, até à temperatura desejada através de uma corrente de vapor que circula em circuito fechado.

Aumentando a temperatura da água alimentada ao equipamento, o consumo de vapor decresce, assim conclui-se que esta seria uma corrente fria a utilizar na MPE.

Após a operação de descolagem, a água segue para a ETAR, uma vez que a água está contaminada com químicos e não pode ser reaproveitada.

Apesar de este equipamento ter sido avaliado, e determinadas as correntes disponíveis, não foi possível fazer-se a caracterização das correntes de entrada de água e de saída de água residual, por avaria do contador de água de entrada e pela inexistência de contador de vapor e água residual. Assim, não foi possível efetuar-se o balanço mássico e entálpico à parte do balseiro de tratamento da tela.

Concluindo, para efeitos deste estudo da MPE este equipamento apenas dispõe de uma corrente de ar de exaustão a alta temperatura disponível, corrente 22.

3.2.4 Branqueação

Após a operação de maturação do tecido terá de ser lavado e seco. Tal é realizado em máquinas de lavar ou de branquear, que têm também a facilidade de lavar. Esta operação é realizada por ação mecânica e química mas fundamentalmente por abundância de água.

A ação de branquear é realizada atualmente apenas por uma das máquinas de branquear existentes na fábrica, a branqueadora Kusters. No entanto existe outra máquina de branquear, atualmente desativada a câmara de branqueação, funcionando apenas como máquina de lavar, branqueadora Artos.

A branqueação, como o próprio nome indica, confere ao tecido um grau de branqueio de acordo com as especificações do cliente / empresa. Tal é conseguido por operações químicas realizadas sob condições específicas de temperatura, auxiliadas por operações de lavagem dos mesmos tecidos.

A branqueação propriamente dita ocorre dentro de uma câmara de vapor, onde o vapor é ejetado para o tecido, já impregnado com um banho de branqueio, e onde fica a maturar.

O vapor tem também um papel preponderante ao elevar a temperatura da água de lavagem nas oito das nove caixas existentes até à temperatura desejada para se efetuar a lavagem do tecido e assim. A última caixa de lavagem encontra-se à temperatura da água da rede.

O vapor neste equipamento é sempre ejetado diretamente para as caixas, não havendo assim um circuito fechado para recuperação dos condensados.



Figura 9 - Esquema Branqueação / Lavagem.

Uma vez que o vapor nas caixas de lavagem tem como finalidade única e exclusivamente aquecer a água para a lavagem do tecido, caso seja possível o aquecimento prévio da água antes de entrar na máquina, o consumo de vapor vai decrescer. Assim se encontrou mais uma corrente fria para a aplicação da MPE, Tabela 3 - corrente 5.

No final do branqueio, o vapor deste é misturado com a água quente e fria de lavagem do tecido e com o banho de branqueio. Apesar de não haver separação das águas quentes e frias, a água residual está a elevada temperatura, e contem energia suficiente para ceder a outras correntes. Esta é assim mais uma corrente quente para a integração de processos, Tabela 3 – corrente 6.

Entre cada caixa da máquina existe um sistema de compressão do tecido, e nessas passagens há perda do vapor que vai junto com o tecido. Assim, a máquina está equipada com quatro chaminés de exaustão para este ar húmido que se perde entre caixas. Estas perdas são significativas, devido às dimensões do equipamento, e de quantidade de energia envolvida no processo, e por isso, apesar de a temperatura não ser muito elevada, existe muito calor latente que se perde. No entanto, devido à baixa temperatura das correntes de ar de exaustão das chaminés, cerca de 34 °C, e uma vez que não existem na fábrica correntes frias o suficiente que necessitem de aquecimento, estas correntes, para respeitar ao ΔT_{MIN} , não têm capacidade de ceder energia a nenhuma outra corrente da fábrica, e por isso seria necessário introdução de utilidades frias para o arrefecimento das mesmas. Assim, estas correntes de ar de exaustão não foram consideradas para a MPE.

Concluindo, a máquina de branquear Kusters dispõe de uma corrente quente, a água residual (corrente 6), e uma corrente fria, a água de lavagem, corrente 5.

3.2.5 Lavagem

A operação de lavagem efetua-se em duas máquinas, a máquina de branquear Artos, que tem o branqueio desativado, e a máquina de lavar Benninger. Nesta operação retira-se ao tecido

impurezas, e é realizada por ação mecânica e química, mas fundamentalmente por abundância de água, tal como na operação de branqueio.

A máquina de branquear Artos é em tudo semelhante à máquina de branquear Kusters, excetando a fase de aquecimento da água de lavagem. Nesta fase o vapor não é diretamente ejetado para as caixas, como acontece na máquina de branquear Kusters. O vapor passa em serpentinas dentro das caixas para aquecimento da água de lavagem. Existe também espaçamento aberto entre as caixas de lavagem, por onde se perde vapor que é extraído por sete chaminés de exaustão de ar húmido.

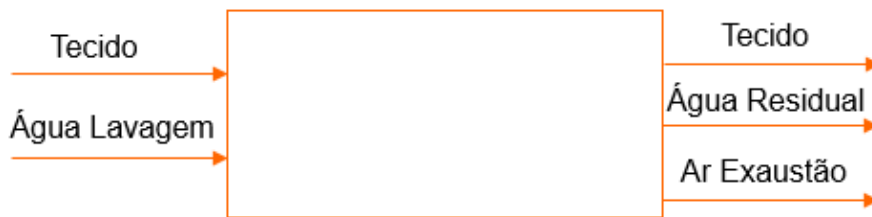


Figura 10 - Esquema Representativo da Máquina de Branquear Artos.

Tal como acontece na máquina de branquear Kusters, a temperatura do ar de exaustão é demasiado baixa, cerca de 30 °C, para haver a possibilidade de o ceder a qualquer outra corrente da fábrica.

Assim, as correntes a considerar são as semelhantes às consideradas para a máquina de branquear Kusters, uma corrente fria, de água de lavagem, Tabela 3 – corrente 3, e uma corrente quente, a corrente de água residual, Tabela 3 – corrente 4.

A máquina de lavar Benninger tem um funcionamento ligeiramente distinto destas duas máquinas uma vez que é uma máquina fechada, e por isso, não existem perdas por evaporação. O tecido é lavado, tal como na máquina de branquear Artos, e a água é aquecida por ejeção direta de vapor para a água, tal como na máquina de branquear Kusters.

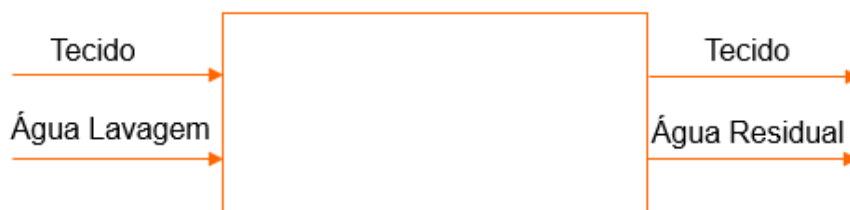


Figura 11 - Esquema Representativo da Máquina de Lavar Benninger.

Assim esta máquina possui duas correntes disponíveis para a MPE, uma corrente fria, de água de lavagem, Tabela 3 – corrente 1, e uma corrente quente de água residual a elevada temperatura, Tabela 3 – corrente 2.

3.2.6 Secadeiras

Na operação de secar o tecido, este passa na superfície de vinte e dois cilindros a vapor, nas secadeiras Artos e Omez e onze cilindros a vapor na secadeira Wumag, os quais funcionam em circuito fechado e os condensados retornam ao circuito de condensados. A humidade presente no tecido é evaporada por ação do calor.

Somente na secadeira Omez o tecido é mergulhado num banho de amaciador antes de iniciar a sua passagem nos cilindros. Uma vez que este banho é feito através da utilização de água fria, esta parte do equipamento não é um utilizador intensivo de energia e por isso, não é considerado para efeitos de aplicação da MPE.

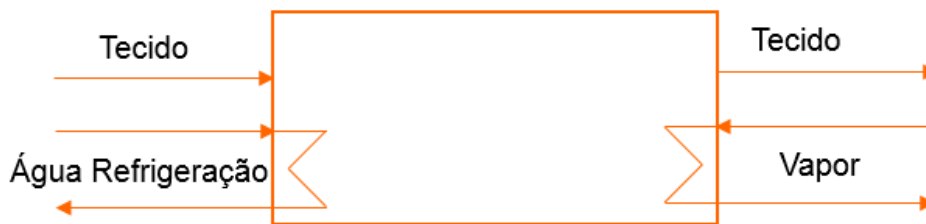


Figura 12 – Esquema Representativo das Secadeiras.

A água, que circula em circuito fechado, é utilizada para arrefecimento do tecido antes de este ser enrolado. Esta água aquece até cerca dos 35 °C e, apesar do calor disponível para ceder não ser muito relevante, estas correntes ainda assim foram consideradas como correntes quentes disponíveis.

Os condensados saem a uma temperatura mais baixa, cerca de 100 °C, e não podem ser reintroduzidos na própria máquina, assim, estes necessitam de calor para poderem voltar ao processo em forma de vapor. Aqui encontra-se uma corrente fria.

As temperaturas de entrada e saída da água e do vapor são muito semelhantes nas três secadeiras. Na Tabela 3 as correntes 7, 9 e 11 são referentes as correntes frias das três secadeiras e as correntes 8, 10 e 12 são as correntes quentes das secadeira.

A água evaporada do tecido contém muito calor latente presente nela, mas como as secadeiras são equipamentos abertos ao ar, a captação integral desta água não é possível. Tal

como acontece nas máquinas de branquear Kusters e Artos, a água evaporada é captada por chaminés juntamente com o ar ambiente, e por isso, esta água não foi considerada para a MPE.

3.2.7 Mercerizadeira

Na operação de mercerizar, que faz parte da secção dos acabamentos, o tecido é submetido à ação de uma solução concentrada de soda cáustica. Este acabamento aumenta o brilho ao tecido e torna-o mais encorpado e resistente.

O funcionamento deste equipamento pode equiparar-se ao funcionamento da máquina de lavar Benninger, uma vez que as caixas são fechadas, não havendo perdas por evaporação entre elas, sendo este equipamento portador de duas chaminés de exaustão, diretamente ligadas às caixas de lavar. Tal como acontecia nas máquinas de branquear a temperatura dentro da chaminé é extremamente baixa para se poder considerar estas correntes na MPE, cerca de 25 °C.

Em todas as outras máquinas de lavar, a água alimentada a elas já tem uma temperatura elevada, da UREAT e apenas aumenta ligeiramente a sua temperatura por ação do vapor. Na Mercerizadeira, isso não acontece uma vez que a água alimentada a este equipamento é água fria, e isso é inteiramente aquecida dentro do equipamento por ação do vapor, que circula em serpentinas dentro do equipamento. A solução concentrada de soda cáustica é proveniente da unidade de recuperação de soda cáustica à temperatura de cerca de 70 °C, no entanto ainda necessita de energia para atingir a temperatura desejada para a operação.

Após análise do equipamento, as correntes consideradas relevantes para estarem disponíveis para a aplicação da MPE são a corrente de entrada de água, Tabela 3 – corrente 13, a corrente de entrada de soda caustica, Tabela 3 – corrente 14, e a corrente de água residual que contem soda fraca, Tabela 3 – corrente 15.



Figura 13 - Esquema Representativo da Mercerizadeira.

3.2.8 Recuperação soda

Devido à alta concentração da soda cáustica presente na mercerizadeira, esta tem de ser recuperada, uma vez que ainda existe uma elevada quantidade de soda presente na água residual, não só pelo desperdício causado, mas também pelo impacto ambiental que poderia causar.

Assim, a soda fraca é alimentada à primeira coluna de destilação da unidade de recuperação de energia, sendo previamente aquecida por ação do vapor num permutador de calor. Os condensados seguem, para o desgasificador, tal como acontece com os condensados de dentro da fábrica. O produto de topo da coluna de destilação é água, ainda levando arrastado consigo soda, e o produto de cauda, já é soda forte purificada.

Devido à temperatura elevada da soda forte, no produto de cauda, é esta corrente que faz o aquecimento prévio, em permutador de calor, da corrente de topo, água + soda antes de esta chegar à segunda coluna de destilação. Após chegar à segunda coluna de destilação, a restante soda que ainda estava presente na água é retirada como produto de cauda e a água que sai como produto de topo segue para a ETAR, uma vez que esta pode ainda conter pequenas doses de soda caustica, e tem de ser tratada.

A soda recuperada tanto na primeira como na segunda coluna de destilação é armazenada em tanques de armazenamento para posteriormente ser reenviada para a mercerizadeira.

Uma vez que não foi possível caracterizar a corrente de água que sai no topo da coluna de destilação, e a corrente de soda forte, tem interesse que não baixe a temperatura, nesta unidade foi encontrada uma corrente fria que necessita de ser aquecida, que é a corrente de água residual proveniente da mercerizadeira, denominada de soda fraca, Tabela 3 – corrente 47.

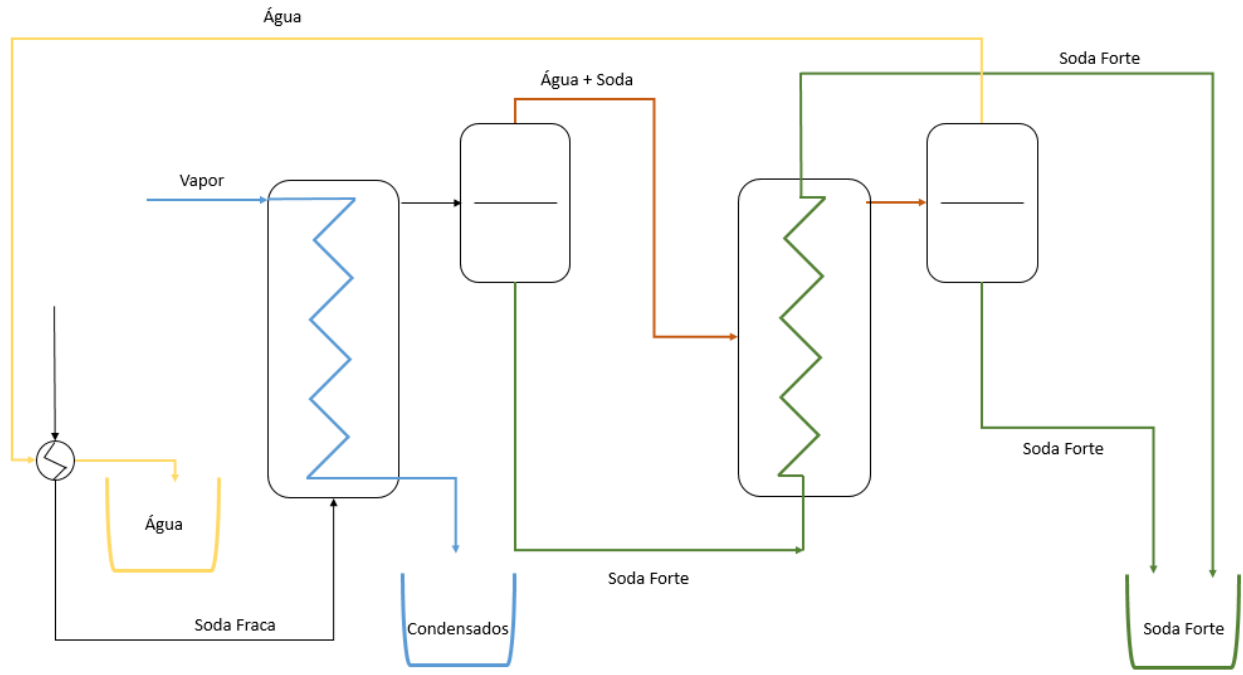


Figura 14 – Esquema Representativo da Unidade de Recuperação de Soda.

3.2.9 Estampagem

Nesta fase o tecido recebe os motivos (desenhos) que estiverem definidos de modo a serem cumpridas as especificações dos produtos. Ainda nesta operação, e por razões processuais, o estampado é seco para permitir o enrolamento do tecido. As máquinas atualmente disponíveis para esta operação são três, duas máquinas de estampar de rolos e uma máquina de estampar de quadros.

A análise energética deste equipamento incidiu na área de secagem do tecido, uma vez que onde existem grandes consumos de energia primária.



Figura 15 - Esquema Estampagem.

A relevância destes equipamentos para a MPE reside na fase de secagem do tecido. O tecido passa numa estufa a alta temperatura, onde é retirada a humidade presente nesse. A elevada temperatura da estufa é conseguida por ação de queima do gás natural.

O ar entra na estufa à temperatura ambiente que ronda os 25 °C e é aquecido até cerca dos 140 °C. Este ar é retirado por duas chaminés de exaustão.

Por avaliação do equipamento, conclui-se que caso a temperatura do ar de entrada aumente, o consumo de gás natural decresce. Assim obteve-se aqui, por cada máquina de estampar, uma corrente fria, do ar de entrada, e uma corrente quente do ar de extração. Uma vez que o ar de exaustão contém humidade, para prevenir complexidades posteriores, esta corrente só pode ceder energia até aos 102 °C, devido à condensação da humidade.

As condições operacionais das estufas das três máquinas de estampar são semelhantes, dependendo a temperatura máxima na estufa do tipo de tecido a tratar. As correntes frias das máquinas de estampar estão representadas na Tabela 3 como as correntes 33, 35 e 37 e as correntes quentes são as correntes 34, 36 e 38.

3.2.10 Râmolas

A fábrica está equipada com cinco râmolas, em que duas delas têm associados um pré-secador onde passa o tecido antes da entrada da própria râmola.

Os pré-secadores têm como função, como o próprio nome indica, retirar um pouco da humidade presente no tecido para que a função na râmola seja levada a cabo com maior eficiência, e com menores consumos de energia. No entanto, durante a fase de estudo da fábrica nunca foi possível fazer a avaliação destes equipamentos, pois estes não estavam em operação.

As râmolas são equipamentos versáteis com diversas funções, como termofixação, acabamento e fixação de largura. A termofixação é uma operação térmica para fixar definitivamente o corante do estampado ao tecido. A fase de acabamento da râmola confere ao tecido características físicas e químicas exigidas em termos processuais.

Nesta operação as exigências térmicas são altamente relevantes e por isso, é necessário ter especial atenção nesta área.

Fixação de largura é realizada por via térmica e tem como finalidade a preparação do tecido para a fase de estamparia de modo a que o tecido chegue a tal operação na largura conveniente.

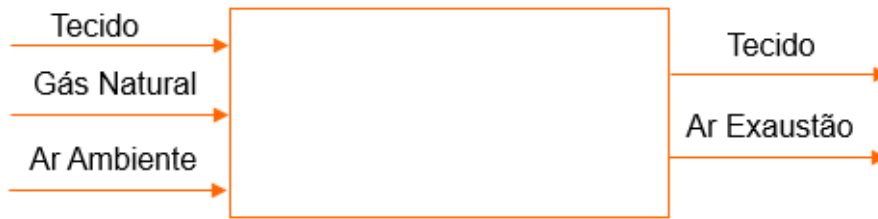


Figura 16 - Esquema Representativo das Râmolas.

As operações realizadas nas râmolas, apesar das condições operatórias e os fins diferirem, são semelhantes às estufas das máquinas de estampar. Tal como explicado na descrição das estufas das máquinas de estampar, as râmolas beneficiariam, em termos energéticos, se a temperatura do ar à entrada for elevado, antes de entrar para a râmola, assim como a energia contida nas chaminés pode ser cedida.

Assim conclui-se que cada uma das cinco râmolas existentes na fábrica possuem uma corrente quente e uma corrente fria. As correntes frias estão expressas na Tabela 3 como corrente 23, 25, 27, 29 e 31, e as correntes quentes como corrente 24, 26, 28, 30 e 32.

3.2.11 Calandras

O tecido nesta operação é sujeito a uma ação mecânica intensa, sob efeito térmico, com o objetivo de conferir um “toque” específico ao tecido, a agradabilidade ao tato. Existem duas máquinas destas na fábrica que executam esta operação, usando como meio de fornecimento de calor, um fluido térmico, que circula em cilindros na calandra, e é fornecido em circuito fechado na fábrica.



Figura 17 - Esquema Calandras.

Uma vez que esta operação é muito sensível à temperatura, esta tem de ser controlada para não danificar o tecido. É exigido que o termofluido chegue a máquina a uma temperatura de cerca de 90 °C, e no cilindro da máquina este perde cerca de 10 °C. Uma vez que a caldeira de termofluido eleva a temperatura deste até aos 260 °C, antes de entrar no cilindro da máquina, este tem de ser arrefecido. Atualmente esta transferência de calor é feita num circuito de

arrefecimento de termofluido com água, de onde a água sai a cerca de 45 °C. Este calor retirado ao termofluido pode ser reaproveitado, e por isso, encontrou-se aqui uma corrente quente, Tabela 3 – correntes 16 e 18.

Após a saída do termofluido da calandra, a cerca de 80 °C, este tem de voltar a ser aquecido até as 90 °C para retornar a calandra, no entanto, atualmente este retorna à caldeira de termofluido onde a sua temperatura é elevada até aos 260 °C iniciais. Assim, encontra-se uma corrente fria, que necessita de energia, Tabela 3 – correntes 17 e 19.

3.2.12 Polimerizador

A ação de polimerização do corante do estampado ao tecido segue-se à operação de estampagem. O polimerizador é um equipamento onde o tecido é submetido a elevadas temperaturas para termofixar o estampado ao tecido. A temperatura desta operação ronda os 160 °C, esta temperatura é conseguida por circulação do termofluido no seu interior entre os 260 °C e os 220 °C.

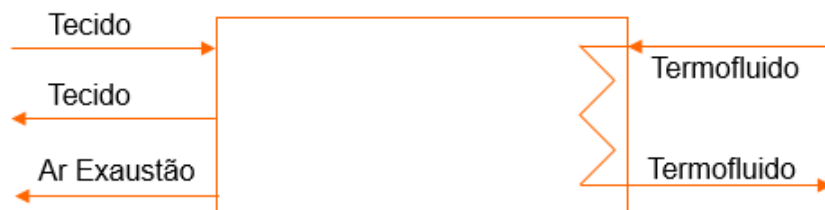


Figura 18 - Esquema Representativo do Polimerizador.

Uma vez que a temperatura do polimerizador é elevada, consegue-se uma corrente de ar de exaustão a uma temperatura elevada também, cerca dos 109 °C. Assim encontra-se mais uma corrente quente do processo (Tabela 3 – corrente 21). O termofluido também necessita de voltar a ser aquecido, mas devido à sua elevada temperatura, este nunca iria poder ser aquecido por permuta de calor com mais nenhuma corrente da fábrica, e por isso, este retorna à caldeira de termofluido para o efeito.

Tal como ocorre nas correntes de ar de exaustão das máquinas de estampar, e râmolas, este ar de exaustão também é ar húmido, e pelas mesmas razões, a temperatura final desta corrente não pode ser menos de 102 °C.

3.3 Situação Energética Atual da Lameirinho

Como já foi referido anteriormente, a Lameirinho é uma indústria altamente consumidora de energia sob as mais diversas formas. O consumo de gás natural é intensivo, não só na formação de vapor, mas também na própria queima direta no setor produtivo da fábrica. Na Figura 19 está representado o consumo por equipamento do setor produtivo do gás natural, relativo ao ano de 2011.

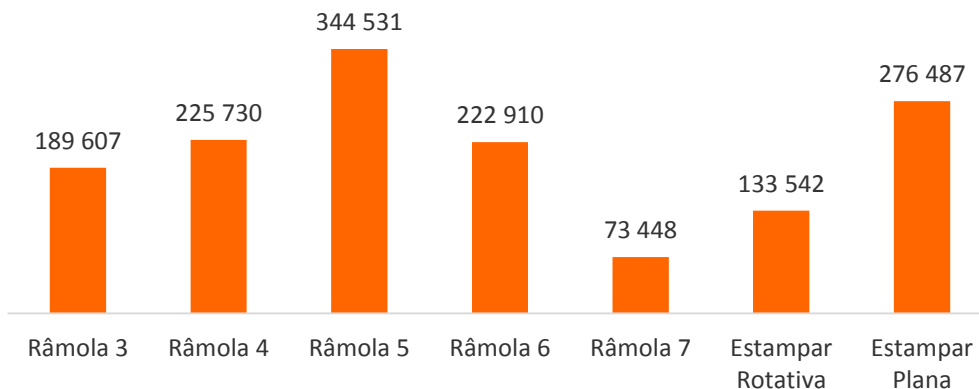


Figura 19 - Consumo de Gás Natural por Equipamento do setor produtivo / (N)m³.

Como é possível verificar, o maior consumidor de gás natural é a râmola 5 seguindo-se máquina de estampar plana. Estes valores devem-se ao facto de serem os equipamentos que operarem durante um período mais alargado de tempo, uma vez que os consumos instantâneos de máquina para máquina pouco diferem.

Na Figura 20 apresentam-se os consumos anuais referentes ao ano de 2011, dos equipamentos que consomem vapor no seu interior. A máquina de Branquear Kusters é a maior consumidora, devido às suas funções e ao seu projeto, seguindo-se da máquina de Branquear Artos, que em 2011 ainda desempenhava a função de branqueio.

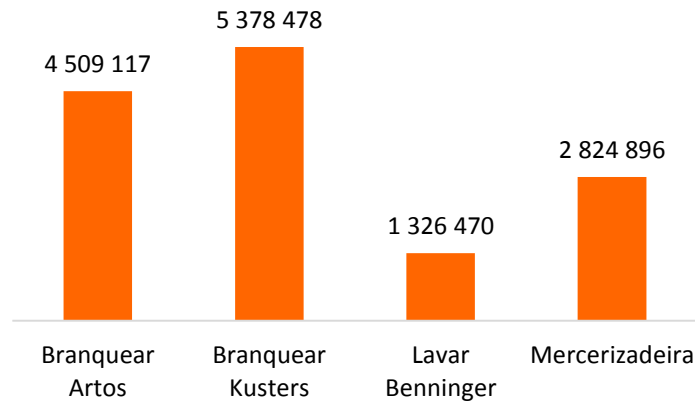


Figura 20 - Consumos de vapor por equipamento / kg.

Estes onze equipamentos mencionados merecem especial atenção, uma vez que dentro do setor dos acabamentos são os maiores consumidores de energia. Existem porém outros equipamentos, os quais não foram estudados dado que a sua forma de funcionamento e as suas dimensões não se equiparam aos acima mencionados.

Qualquer redução no consumo de energia de algum destes equipamentos, pode vir a traduzir-se numa grande redução na fatura final de energia.

Tento em consideração a informação extraída da Figura 19 e da Figura 20, juntamente com os consumos de água quente proveniente da cogeração, a Lameirinho, nos equipamentos considerados para estudo, tem um gasto anual de cerca de 14 600 kW.

4 Discussão de Resultados

Através da aplicação da MPE pretendeu-se verificar se as condições de operação da Lameirinho são próximas ou distantes das condições operacionais ideais.

Tal como referido no capítulo anterior, foram feitas algumas considerações, as quais estão expressas na Tabela 2. A acrescentar às considerações que foram feitas inicialmente, para avaliação dos equipamentos, também foi necessário definir previamente a diferença mínima de temperaturas entre os extremos das correntes nos permutadores de calor, a sugestão inicial para a ΔT_{MIN} foi de 10 °C.

Tabela 2 - Considerações prévias para a definição das correntes disponíveis.

Corrente	$T_{\text{Ref}} / ^\circ\text{C}$
Temperatura água de lavagem inicial	25
Temperatura ambiente inicial	25
Temperatura ambiente final	120
Temperatura ar húmido de exaustão saída	102
Diferença Mínima de Temperaturas	10

Os balanços entálpicos a cada um dos equipamentos estão descritos no Anexo A, os quais foram analisados, tal como referido anteriormente, e resultou no conjunto de correntes apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Correntes Disponíveis para a aplicação da MPE.

nº	Descrição	$T_1 / ^\circ\text{C}$	$T_F / ^\circ\text{C}$	$MC_p / \text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	Q / kW	Tipo corrente
1	Benninger - Água Lavagem	25	90	12,8	834	Fria
2	Benninger - Água Residual	82	25	13,2	754	Quente
3	Artos - Água Lavagem	25	90	14,8	964	Fria
4	Artos - Água Residual	84	25	13,2	776	Quente
5	Kusters - Água Lavagem	25	90	27,8	1 807	Fria
6	Kusters - Água Residual	70	25	27,7	1 245	Quente
7	Secadeira Artos - Água Fria	32	30	3,07	6,15	Quente
8	Secadeira Artos - Condensados	103	140	1,58	58,5	Fria
9	Secadeira Omez - Água Fria	35	25	1,53	15,3	Quente
10	Secadeira Artos - Condensados	103	140	2,85	105	Fria
11	Secadeira Wumag - Água Fria	35	25	1,40	14,0	Quente
12	Secadeira Wumag - Condensados	88	140	1,35	70,1	Fria
13	Mercerizadeira - Água Lavagem	25	90	4,29	279	Fria
14	Mercerizadeira - Soda Forte	70	90	2,93	58,6	Fria
15	Mercerizadeira - Água Residual	73	100	7,53	203	Fria

nº	Descrição	$T_i / ^\circ\text{C}$	$T_f / ^\circ\text{C}$	$MC_p / \text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	Q / kW	Tipo corrente
16	Calandra 1 - Termofluido Entrada	260	90	0,702	119	Quente
17	Calandra 1 - Termofluido Saída	80	90	0,550	5,5	Fria
18	Calandra 2 - Termofluido Entrada	260	90	0,676	115	Quente
19	Calandra 2 - Termofluido Saída	80	90	0,510	5,10	Fria
20	Polimerizador - Ar Exaustão	109	102	2,49	17,4	Quente
21	Gasadeira - Ar Exaustão	173	102	1,72	122	Quente
22	Râmola 3 - Ar Ambiente	25	120	4,94	470	Fria
23	Râmola 3 - Ar Exaustão	126	102	5,27	127	Quente
24	Râmola 4 - Ar Ambiente	25	120	4,74	451	Fria
25	Râmola 4 - Ar Exaustão	136	102	5,08	173	Quente
26	Râmola 5 - Ar Ambiente	25	120	5,51	524	Fria
27	Râmola 5 - Ar Exaustão	118	102	5,96	95,3	Quente
28	Râmola 6 - Ar Ambiente	25	120	4,36	414	Fria
29	Râmola 6 - Ar Exaustão	159	102	4,63	264	Quente
30	Râmola 7 - Ar Ambiente	25	120	3,17	301	Fria
31	Râmola 7 - Ar Exaustão	120	102	3,43	61,7	Quente
32	Estampar 2 - Ar Ambiente	25	120	6,83	649	Fria
33	Estampar 2 - Ar Exaustão	115	102	7,01	91,2	Quente
34	Estampar 3 - Ar Ambiente	25	120	4,69	445	Fria
35	Estampar 3 - Ar Exaustão	115	102	4,86	63,2	Quente
36	Estampar Plana - Ar Ambiente	25	120	3,95	376	Fria
37	Estampar Plana - Ar Exaustão	116	102	4,11	57,6	Quente
38	Cogeração - Sistema Refrigeração AT Entrada	25	70	149	6 686	Fria
39	Cogeração - Sistema Refrigeração AT Saída	103	25	150	11 694	Quente
40	Cogeração - Sistema Refrigeração BT Entrada	25	50	51,8	1 296	Fria
41	Cogeração - Sistema Refrigeração BT Saída	60	25	51,9	1 816	Quente
42	Cogeração - Ar Exaustão	170	102	3,31	225	Quente
43	Cogeração - Água para Vapor	25	120	6,95	660	Fria
44	Caldeira Vapor - Água para Vapor	25	120	8,13	772	Fria
45	Caldeira Vapor - Ar Exaustão	166	102	0,927	59,3	Quente
46	Caldeira Termofluido - Ar Exaustão	265	102	0,052	8,48	Quente

O conjunto das correntes obtidas foram introduzidas na ferramenta informática FI²EPI, a qual forneceu a informação da condição operatória da Lameirinho, caso esta não contemplasse integração energética.

Na Figura 21 apresenta-se o diagrama das curvas compostas. A curva representada a vermelho corresponde à curva composta quente e a curva representada a azul corresponde à curva composta fria. Como é possível verificar, o Ponto de Estrangulamento situa-se na extremidade da curva composta fria, entre os 25 °C e os 35 °C, o que indica que o processo não pode ser dividido em dois subprocessos e abaixo do PE não existem correntes frias disponíveis para trocar calor com as correntes quentes. A solução passa pela colocação de permutadores de

calor com utilidades frias, para o arrefecimento das correntes quentes. No entanto, acima do PE existe uma vasta área onde a integração energética é possível.

É possível ainda verificar, por análise da Figura 21, que a quantidade mínima de energia a ser retirada através de utilidades frias é 2 594 kW, e a quantidade mínima de energia a ser fornecida através de utilidades quentes é 2 108 kW.

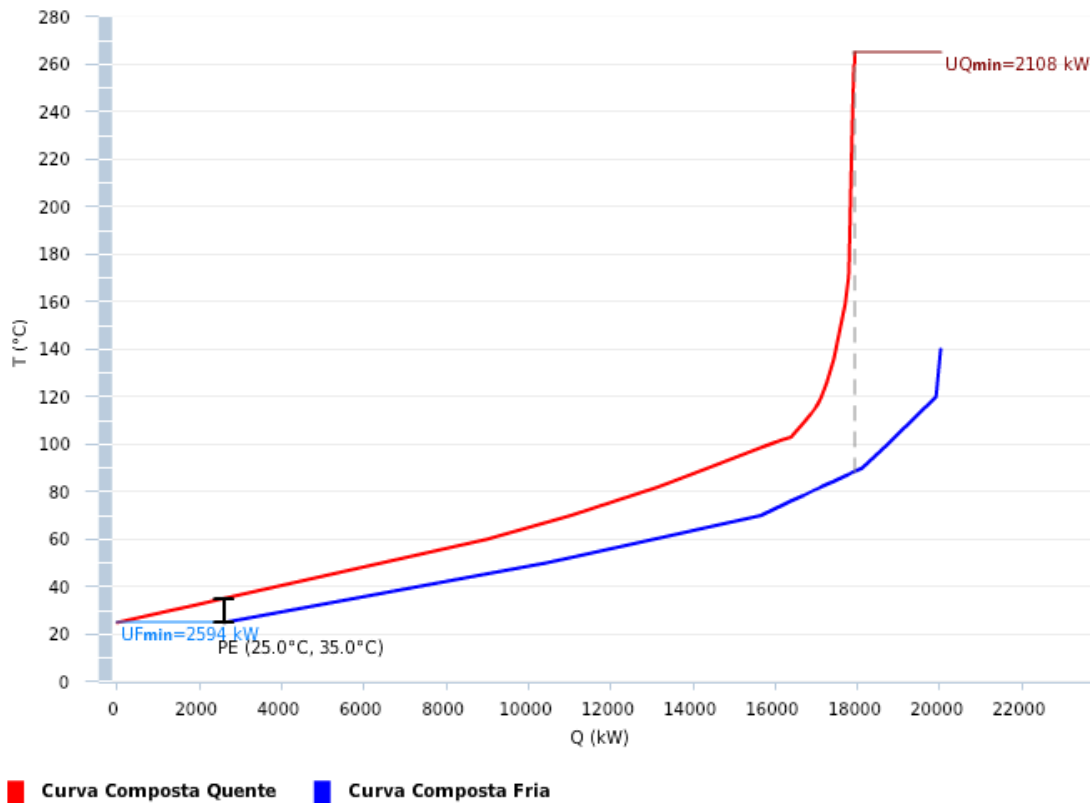


Figura 21 - Diagrama de Curva Composta com $\Delta T_{\text{MIN}} 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para uma melhor percepção da quantidade de energia que está disponível para a permuta de calor apresenta-se o Figura 22, diagrama da grande curva composta. A área representada a cinzento é a área de permuta de calor, e tal como se verificou por análise da Figura 21, não existe possibilidade de permuta de calor abaixo do PE. A linha representada a roxo indica a quantidade de energia mínima que é necessário fornecer ao processo, assim como a linha representada a verde, representa a quantidade mínima de energia que é necessário retirar ao processo através de utilidades frias.

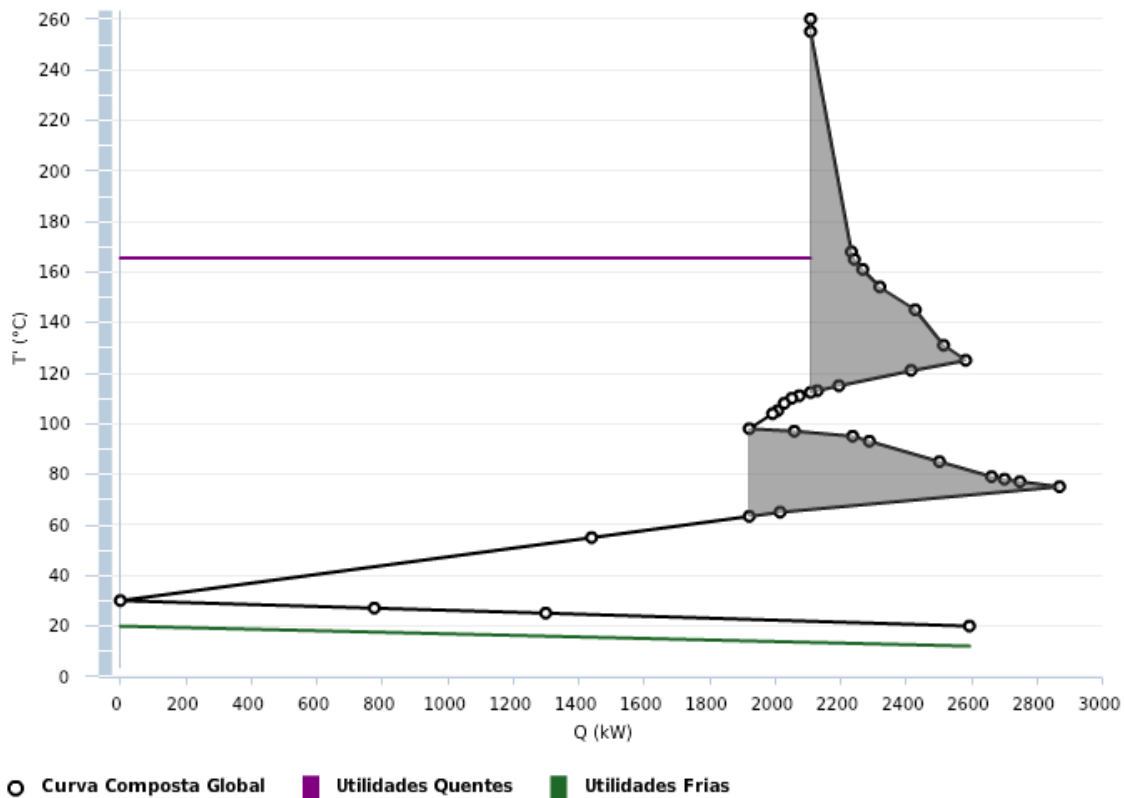


Figura 22 - Diagrama da Grande Curva Composta com $\Delta T_{\text{MIN}} 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tal como foi referido da descrição da metodologia do ponto de estrangulamento no Capítulo 3, o facto de o PE estar localizado no extremo da curva composta fria significa que não existe integração energética para as correntes quentes com temperaturas inferiores à temperatura do ponto de estrangulamento. Este decréscimo de temperatura tem de ser feita obrigatoriamente pela ação das utilidades frias da fábrica.

Por análise dos resultados obtidos e evidenciados na Figura 22, é possível verificar que uma utilidade quente a cerca de $120 \text{ }^\circ\text{C}$ era suficiente para satisfazer as necessidades da secção da fábrica analisada. No entanto, e por razões processuais, a utilidade em uso atualmente na fábrica é vapor a 8 bar (linha representada a roxo na Figura 22). Também é possível verificar por análise da mesma figura que o processo seria garantido com dois tipos de utilidades diferentes, uma a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ e outra a cerca de $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Estas seriam suficientes em termos energéticos, o que revela que o gasto em utilidades quentes poderia ser largamente diminuído.

Caso se aumente a ΔT_{MIN} , pode passar a haver a possibilidade de integração energética abaixo do PE, no entanto o consumo de utilidade frias e quentes aumenta conseqüentemente. No entanto foi verificada a diferença que existe utilizando uma ΔT_{MIN} de $15 \text{ }^\circ\text{C}$, e não de $10 \text{ }^\circ\text{C}$

como está a ser utilizado no caso de estudo. O diagrama da curva composta que se obteve com ΔT_{MIN} de 15 °C está representado na Figura 23.

Por leitura do diagrama das curvas compostas com ΔT_{MIN} de 15 °C, e comparando com o resultado obtido para a ΔT_{MIN} de 10 °C é possível verificar que, tal como referido anteriormente, o consumo mínimo de utilidades frias e quentes aumenta, apesar de neste caso concreto a possibilidade de integração energética abaixo do PE continua a não existir.

Na grande curva composta (Figura 24) a perceção da área de integração energética abaixo do PE é melhor. É representada pela área a cinzento abaixo do ponto de estrangulamento, tal área era inexistente na grande curva composta com ΔT_{MIN} de 10 °C, Figura 22.

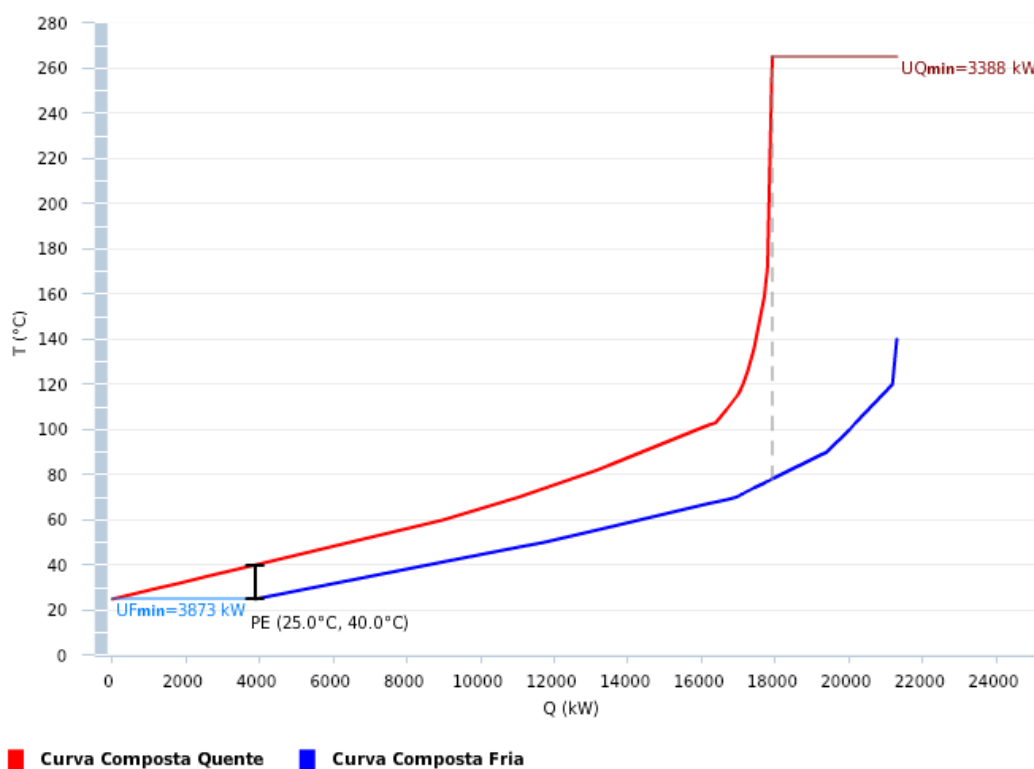
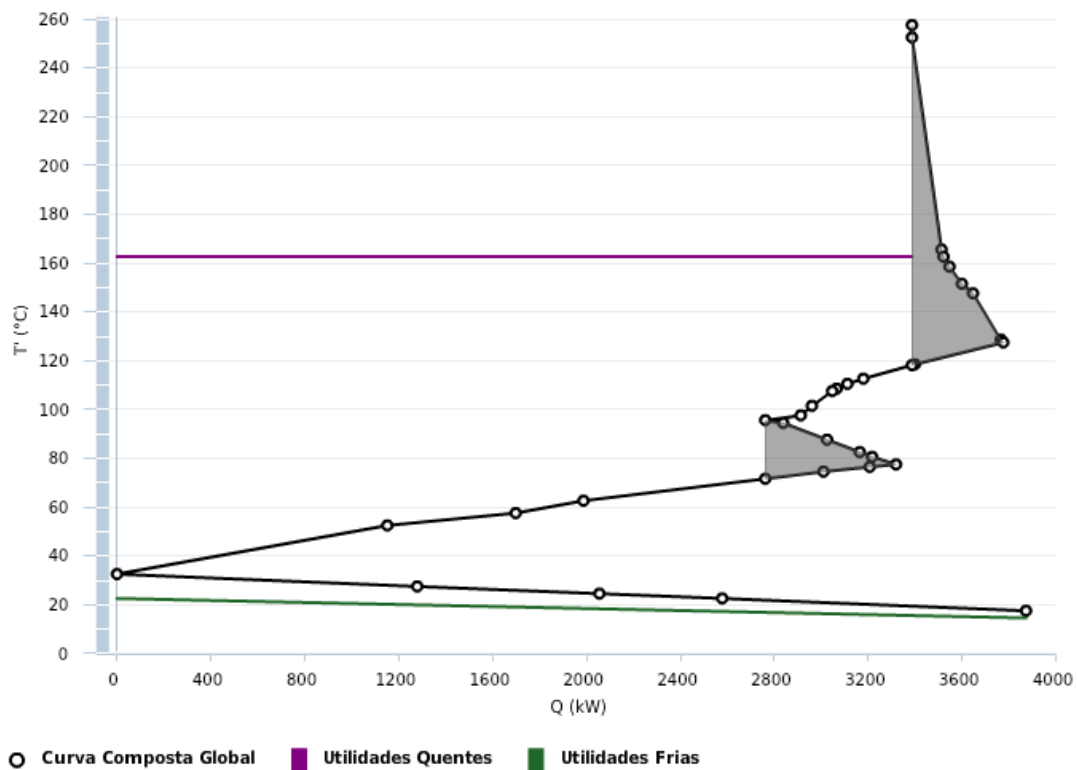


Figura 23 - Diagrama curva composta com ΔT_{MIN} de 15 °C.

Tal como foi referido na secção anterior, não existem melhorias por aumento da ΔT_{MIN} entre as correntes quentes e frias, optou-se assim por continuar a utilizar a ΔT_{MIN} de 10 °C, como inicialmente foi proposto. Tal opção é evidente perante os valores representados na Tabela 4.

Figura 24 - Grande Curva Composta com ΔT_{MIN} de 15 °C.Tabela 4 - Comparação dos cenários para diferente ΔT_{MIN} .

	$\Delta T_{\text{MIN}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{MIN}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
UQ / kW	2 108	3 388
UF / kW	2 596	3 873
$A_{\text{TOTAL}} / \text{m}^2$	1 277	1 193
$A_{\text{MÉDIA PC}} / \text{m}^2$	36,5	33,1
Custo UQ / $\text{€}\cdot\text{h}^{-1}$	55,60	86,33
Custo UF / $\text{€}\cdot\text{h}^{-1}$	4 189	6 255
Custos Operacionais / $\text{€}\cdot\text{ano}^{-1}$	36 077 304	53 923 137
Custos Equipamento / $\text{€}\cdot\text{ano}^{-1}$	318 663	308 895

Por análise da curva composta obtida da aplicação informática FI²EPI, foi possível verificar que existe a possibilidade de reaproveitamento de energia, e por essa razão existe melhoramentos a fazer nas condições operatórias.

Do diagrama das curvas compostas, verifica-se que esta indústria, caso não incorpora-se nenhum tipo de integração energética nas suas instalações, teria um gasto de energia primária de cerca de 35 500 kW. Essa integração energética existe e trás benefícios notórios nos gastos de energia, uma vez que no ano de 2011 o consumo de energia dos equipamentos considerados para a análise da MPE foi de 14 600 kW. Considerando um ΔT_{MIN} de 10 °C,

verifica-se que é possível reduzir este valor para 4 700 kW, o que indica que haverá ainda muitas oportunidades de melhoria da eficiência energética da instalação.

Assim que se obteve estas informações por consulta e interpretação dos resultados obtidos da ferramenta informática FI²EPI, passou-se à construção da Rede Máxima de Recuperação Energia (MER). Devido ao elevado número de correntes disponíveis para a construção da Rede de Permutadores de Calor da fábrica, esta tarefa apresenta alguma complexidade. A Rede MER obtida está apresentada no Anexo C.

Após a elaboração da rede de permutadores de máxima recuperação de energia, foi possível observar que o consumo mínimo de utilidades quente e frias não correspondem exatamente aos valores obtidos no diagrama das curvas compostas. Esta diferença por ter diferentes razões.

O elevado número de correntes e conseqüentemente o elevado número de hipóteses de construção da rede, levou a que se estipulassem três considerações importantes.

Consideração 1: deu-se como preferencial, a opção a correntes quentes e frias que tivessem oportunidade de permutar dentro das próprias máquinas. Assim, evita-se que a recuperação máxima de energia seja demasiado dependente da ordem de trabalhos das máquinas. Esta consideração aplica-se fundamentalmente ao tipo de máquinas que efetuam a secagem do tecido, onde existe todo o interesse em aquecer previamente o ar ambiente antes de este entrar para os equipamentos, como é o caso das râmolas e máquinas de estampar.

Consideração 2: caso o ar de exaustão dos equipamentos não atingisse a temperatura proposta para a saída, 102 °C, apesar de isso representar uso de utilidades frias no diagrama das curvas compostas, tal não vai ser aplicado, uma vez que estas correntes representam apenas correntes disponíveis, e não havendo obrigatoriedade de atingir tal valor.

Consideração 3: a consideração 2 aplica-se de igual forma a todas as correntes de água, que se pretendia que arrefecessem até aos 25 °C. Uma vez que o PE está situado entre os 25 °C e os 35 °C, não existem capacidades de correntes disponíveis para tal, e portanto, como representam apenas correntes disponíveis, não existe obrigatoriedade de atingir tal valor.

Como resposta a estas duas últimas considerações, perante a rede MER proposta, não existe consumo de UF, uma vez que estas apenas eram utilizadas para fazer o arrefecimento de correntes disponíveis.

Como é possível verificar na rede MER, Anexo C, existe um elevado número de permutadores de calor. Estes totalizam 51, uma vez que para a introdução dos mesmos foram feitas diversas divisões de correntes, p. ex., a água quente da cogeração foi dividida em 19 correntes para que a sua energia contida fosse melhor distribuída pelos equipamentos.

No sentido de se otimizar a rede MER e atingir valor mínimo de utilidades quente e frias, foram colocados permutadores em correntes que fazem um aproveitamento de energia quase insignificante. Esses permutadores de calor, como é o caso da corrente 47, 48, 49, 50, 51, na prática não serão rentáveis, pois o investimento no permutador de calor não compensará o decréscimo de energia utilizada que a corrente representa. Todos os arrefecedores colocados em correntes de água, foram colocados apenas para efeitos de balanços entálpicos, uma vez que as correntes onde foram aplicados arrefecedores, são apenas correntes disponíveis, não sendo posteriormente utilizadas no processo.

5 Conclusões

Fazendo uma apreciação global aos consumos energéticos atuais da Lameirinho e comparando os mesmos com os resultados obtidos através da MPE, é possível verificar que esta, apesar de estar equipada com um sistema de utilidades de tecnologia recente e eficaz, ainda tem a possibilidade de fazer melhorias energéticas no seu setor produtivo.

Devido ao elevado número de permutadores, existem algumas trocas de energia preferenciais, em equipamentos de maior consumo energético.

Por um lado existem os equipamentos consumidores de gás natural, essencialmente para aquecimento do ar de secagem. Os permutadores colocados nas râmolas e máquinas de estampar, onde o ar de secagem é elevado até 93 °C através do uso da água do sistema de arrefecimento do motor a alta temperatura, são equipamentos prioritários para se iniciar a aplicação da integração energética. Como foi possível verificar, todos os equipamentos semelhantes a estes, são consumidores intensivos de gás natural para aquecimento do ar ambiente.

Por outro lado existem os equipamentos consumidores de vapor para aquecimento da água de lavagem. Os permutadores colocados para o prévio aquecimento da água de lavagem, podem vir a representar um elevado decréscimo no consumo de vapor dentro das máquinas.

Deste modo, conclui-se que ainda existem vários pontos de melhoria a serem analisados no grupo Lameirinho, essencialmente no que diz respeito à secção dos acabamentos.

5.1 Objetivos Realizados

Este estudo teve como objetivo a avaliação do estado energético atual da Lameirinho, e criação de oportunidades de melhoria sob o ponto de vista energético. Todo o processo produtivo foi analisado, foram identificadas as correntes onde havia a possibilidade de atuar, as mesmas foram também caracterizadas.

Após a caracterização das correntes, foi aplicada a Metodologia do Ponto de Estrangulamento às mesmas. No final, foram identificadas oportunidades de melhoria energética no setor produtivo da fábrica.

5.2 Limitações e Trabalhos Futuros

A indústria têxtil é uma indústria em que as condições operatórias variam, por vezes, de hora a hora, dependendo do tipo de lote que estão a tratar e para o fim a que se destina, pelo que, a criação de cenários, a aquisição de dados e a seleção de informação, são etapas complexas. Face a estas características, existem algumas limitações com a aplicação do método do ponto de estrangulamento tal como descrito no Capítulo 3, uma vez que este está direcionado para operações em modo contínuo. Assim como trabalho futuro propõe-se a aplicação do método do ponto de estrangulamento para vários intervalos de tempo e com a possibilidade de criar sistemas de armazenagem de energia e de reescalonamento da produção. Desta encontrar-se-á um sistema de transferência de energia muito mais realista.

6 Referências

- [1] E. J. M. Figueiredo, F. E. Rodrigues, A. E. Correia e M. E. Barros, “Guia Técnico - Setor Têxtil,” INETI, Novembro 2000. [Online]. Available: http://netresiduos.trace.pt/resources/docs/guias_sectoriais/textil/textil_parte1.pdf. [Acedido em 28 Junho 2013].
- [2] ADENE, Agencia para a Energia; IST - Instituto Superior Técnico, Março 2013. [Online]. Available: http://efinerg.aeportugal.pt/DocsFinais/EFINERG_Eficiencia%20Energetica_Setor%20Madeira%20e%20Mobiliario.pdf.
- [3] ATP, Associação Têxtil e Vestuário de Portugal, “Formação AEP,” Maio 2013. [Online]. Available: http://formacao.aeportugal.pt/docs/aep-formacao-documentos/ppii_apresenta%C3%A7%C3%A3o-jo%C3%A3o-costa.pdf?sfvrsn=2. [Acedido em 28 Junho 2013].
- [4] T. Gundersen, “NTNU - Det Skapende Universitet,” [Online]. Available: <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4215/innhold/Handbook%20of%20PI%20-%20Chapter%202-1.pdf>. [Acedido em 15 Março 2013].
- [5] P. F. Martins, “Conteúdos da Unidade Curricular Engenharia Química e Sustentabilidade,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010. [Online]. [Acedido em 2011].
- [6] L. Linnhoff March, Introduction to Pinch Technology, England, 1998.
- [7] “GNIP, Grup Nacional para a Integração de Proceddos,” 2011. [Online]. Available: http://gnip.ist.utl.pt/~gnip.daemon/index.php?option=com_content&view=article&id=9&Itemid=111. [Acedido em 29 Junho 2013].
- [8] A. p. a. E. ADENE e I. S. T. IST, “ADENE,” 2012. [Online]. Available: <http://www.adene.pt/pt-pt/SubPortais/SGCIE/Documentacao/Documents/fi2epi.html>. [Acedido em Março 2013].
- [9] “Instrutemp - Instrumentos de Medição,” [Online]. Available: http://www.instrutemp.com.br/instrutemp/interface/product.asp?departamento=instrutemp&produto=tubo+de+pitot+tipo+l+6x300mm+ittpl300&dept_id=34&pf_id=ittpl_06_300. [Acedido em 28 Junho 2013].

Anexo A – Balanços Entálpicos aos equipamentos

Neste anexo apresenta-se todos os balanços realizados aos equipamentos presentes no processo de integração energética.

Tabela A.1 - Balanço Entálpico à Gasadeira

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Gás Natural	38				1 839 509	80,83
Ar de Combustão	5 271	106	31		436 205	19,17
Total					2 275 714	100
SAÍDAS:						
Ar Exaustão	5 271	414	173	1,086	2 099 044	92,24
Perdas					176 670	7,76
Total					2 275 714	100

Estado referência: Água Líquida

$T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.2 - Balanço Entálpico à Máquina de Branquear Kusters

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	1 653	1 289	27	2,67	212 457	1,6
Água fria		3 320	25	4,18	347 059	2,6
Água quente		19 208	75	4,19	6 041 719	45,4
Banho de branqueio		1 346	25	4,18	140 700	1,1
Vapor		1 414	164		3 902 639	29,3
Ar Entrada	44 121	583	27		2 661 361	20,0
Total	1 653	26 577			13 305 935	100
SAÍDAS:						
Tecido	1 653	1 243	41	2,65	310 853	2,4
Água residual		23 775	70	4,188	6 970 628	53,6
Perdas radiação					147 538	1,1
Perdas convecção					98 739	0,8
Ar Exaustão	44 121	1 559	34		5 487 234	42,2
Total	45 773	26 577			13 014 991	100

Estado referência: Água Líquida

$T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.3 - Balanço Entálpico à Máquina de Branquear Artos

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	1 073	931	25	2,75	139 233	1,2
Água fria		0	25	4,18	0	0,0
Água quente		12 769	77	4,19	4 123 710	35,2
Vapor		1 584	165		4 374 976	37,3
Ar entrada	60 634	658	23		3 092 986	26,4
Total	61 707	15 285			11 730 906	100
SAÍDAS:						
Tecido	1 073	957	36	2,76	201 924	1,9
Água residual		11 282	84	4,20	3 978 157	37,8
Condensados		1 584	99		661 336	6,3
Perdas radiação					76 055	0,7
Perdas convecção					53 639	0,5
Ar Exaustão	60 634	1 462	30		5 565 423	52,8
Total	61 707	15 285			10 536 534	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.4 - Balanço Entálpico à Máquina de Lavar Benninger

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	1 880	1 625	25	2,74	241 281	5,3
Água quente		10 647	72	4,19	3 221 527	70,5
Vapor		400	169		1 106 146	24,2
Total	1 880	12 671			4 568 955	100
SAÍDAS:						
Tecido	1 880	1 326	42	2,61	355 225	8,1
Água residual		11 345	82	4,198	3 905 736	89,2
Perdas radiação					68 372	1,6
Perdas convecção					47 175	1,1
Total	1 880	12 671			4 376 509	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.5 - Balanço Entálpico à Secadeira Artos

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	1 461	990	31	2,58	198 766	4,8
Água Fria		2 647	26	4,18	282 168	6,8
Vapor		1 350	136	4,20	3 691 025	88,5
Total	1 461	4 987			4 171 959	100
SAÍDAS:						
Tecido	1 461	33	45	1,56	104 741	2,6
Condensados		1 350	103		582 812	14,5
Água Fria		2 647	32	4,18	354 073	8,8
Água evaporada		957			2 561 001	63,6
Perdas radiação					329 445	8,2
Perdas convecção					97 698	2,4
Total	1 461	4 987			4 029 770	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.6 - Balanço Entálpico à Secadeira Omez

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	1 348	1 873	23	3,06	228 495	3,3
Água Fria		1 315	26	4,18	141 815	2,0
Vapor		2 430	124		6 576 285	94,7
Total	1 348	5 618			6 946 595	100
SAÍDAS:						
Tecido	1 348	18	53	1,53	111 513	1,7
Condensados		2 430	103		1 042 081	15,8
Água Fria		1 315	35	4,18	192 385	2,9
Água evaporada		1 855			4 963 284	75,2
Perdas radiação					196 147	3,0
Perdas convecção					92 371	1,4
Total	1 348	5 618			6 597 782	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.7 - Balanço Entálpico à Secadeira Wumag

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	1 028	894	18	2,75	96 191	2,9
Água Fria		1 208	25	4,18	126 797	3,8
Vapor		1 150	138		3 112 234	93,3
Total	1 028	3 252			3 335 222	100
SAÍDAS:						
Tecido	1 028	78	52	1,69	97 790	3,2
Condensados		1 150	88		493 166	16,0
Água Fria		1 208	35	4,18	176 678	5,7
Água evaporada		816			2 183 421	70,8
Perdas radiação					88 693	2,9
Perdas convecção					43 889	1,4
Total	1 028	3 252			3 083 636	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.8 - Balanço Entálpico à Mercerizadeira

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	436	14	31	1,59	22 148	0,5
Água fria		3 694	25	4,18	387 615	8,6
Água quente		0	75	4,19	0	0,0
Soda Forte		2 684	70	3,93	738 313	16,4
Ar Ambiente	25 829	404	21		1 572 206	34,9
Vapor		647	159		1 782 176	39,6
Total	26 266	7 443			4 502 459	100
SAÍDAS:						
Tecido	436	275	42	2,54	74 899	1,8
Soda Fraca		6 643	73	4,08	1 979 367	47,5
Perdas radiação					80 336	1,9
Perdas convecção					56 724	1,4
Ar Exaustão	25 829	524	25	1,022	1 974 214	47,4
Total	26 266	7 443			4 165 540	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.9 - Balanço Entálpico à Máquina de Estampar Rotativa nº 2

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	672	248	28	2,22	58 064	1,1
Ar de secagem	23 518	515	33	1,02	2 098 346	39,3
Gás Natural	146				3 181 532	59,6
Total	24 336	762			5 337 943	100
SAÍDAS:						
Tecido	672	7	59	1,53	60 618	1,2
Ar de secagem	23 518	756	115	1,04	4 782 021	98,5
Perdas radiação					8 403	0,2
Perdas convecção					3 702	0,1
Total	24 190	762			4 854 744	100

Estado referência: Água Líquida
 $T_{\text{Ref}} = 0^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.10 - Balanço Entálpico à Máquina de Estampar Rotativa nº 3

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	383	280	25	2,63	43 088	1,3
Ar Ambiente	16 399	211	25	1,02	947 476	28,1
Gás Natural	231				2 382 455	70,6
Total	17 014	491			3 373 019	100
SAÍDAS:						
Tecido	383	9	39	1,56	23 813	0,7
Ar Exaustão	16 399	483	115	1,04	3 219 467	98,9
Perdas radiação					7 462	0,2
Perdas convecção					3 787	0,1
Total	16 783	491			3 254 529	100

Estado referência: Água Líquida
 $T_{\text{Ref}} = 0^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.11 - Balanço Entálpico à Máquina de Estampar Plana

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	389	305	28	2,68	52 463	1,4
Ar de secagem	13 507	350	33	1,03	1 343 960	36,6
Gás Natural	105				2 278 410	62,0
Total	14 001	655			3 674 833	100
SAÍDAS:						
Tecido	389	3	42	1,52	24 705	0,7
Ar de secagem	13 507	652	116	1,05	3 350 024	98,4
Perdas radiação					19 686	0,6
Perdas convecção					10 422	0,3
Total	13 896	655			3 404 837	100

Estado referência: Água Líquida
 $T_{\text{Ref}} = 0^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.12 - Balanço Entálpico à Râmola nº 3

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	763	560	26	2,63	91 332	1,9
Ar de secagem	17 256	237	28	1,02	623 327	12,8
Gás Natural	85				4 148 040	85,3
Total	18 104	797			4 862 698	100
SAÍDAS:						
Tecido	763	5	61	1,52	70 863	1,6
Ar de secagem	17 256	792	126	1,05	4 381 130	97,0
Perdas radiação					40 752	0,9
Perdas convecção					23 626	0,5
Total	18 019	797			4 516 370	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0$ bar

Tabela A.13 - Balanço Entálpico à Râmola nº 4

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	651	538	25	2,71	80692	1,5
Ar de secagem	16398	323	26	1,02	1244370	23,8
Gás Natural	80				3907857	74,7
Total	17129	861			5232919	100
SAÍDAS:						
Tecido	651	7	112	1,53	112388	2,4
Ar de secagem	16398	854	136	1,06	4618669	96,7
Perdas radiação					29656	0,6
Perdas convecção					15818	0,3
Total	17049	861			4776532	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0$ bar

Tabela A.14 - Balanço Entálpico à Râmola nº 5

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	896	796	29	2,76	136880	2,5
Ar de secagem	19462	145	31	1,01	982520	17,7
Gás Natural	91				4426441	79,8
Total	20449	941			5545840	100
SAÍDAS:						
Tecido	896	20	88	1,56	125615	2,5
Ar de exaustão	19462	921	118	1,05	4835860	96,3
Perdas radiação					38290	0,8
Perdas convecção					20805	0,4
Total	20359	941			5020570	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0$ bar

Tabela A.15 - Balanço Entálpico à Râmola nº 6

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	594	346	25	2,49	59128	1,2
Ar de secagem	15264	249	28	1,02	1 057 871	22,2
Gás Natural	75				3 657 504	76,6
Total	15933	594			4774503	100
SAÍDAS:						
Tecido	594	4	121	1,52	109537	2,6
Ar de secagem	15264	590	159	1,05	4 130 780	96,3
Perdas radiação					33154	0,8
Perdas convecção					17706	0,4
Total	15858	594			4291178	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.16 - Balanço Entálpico à Râmola nº 7

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	814	559	23	2,59	81 839	2,3
Ar de secagem	11 088	103	25	1,01	541 803	15,4
Gás Natural	59				2 904 489	82,3
Total	11 961	662			3 528 130	100
SAÍDAS:						
Tecido	814	31	35	1,60	47 194	1,5
Ar de secagem	11 088	632	120	1,06	3 070 929	97,9
Perdas radiação					13 610	0,4
Perdas convecção					6 627	0,2
Total	11 901	662			3 138 360	100

Estado referência: Água Líquida

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.17 - Balanço Entálpico à Calandra nº 1

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	1136	14	46,5	1,53	81881	44,1
Termofluido		558	88,0	2,11	103819	55,9
Total	1136	572			185700	100
SAÍDAS:						
Tecido	1136	12	42,0	1,53	73760	39,7
Termofluido		558	80,0	2,09	93105	50,1
Água evaporada		1			2901	1,6
Perdas radiação					10777	5,8
Perdas convecção					5157	2,8
Total	1136	572			185700	100

Estado referência: Água Líquida e Termofluido

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.18 - Balanço Entálpico à Calandra nº 2

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	1148	34	43	1,58	79176	32,0
Termofluido		891	89	2,12	168390	68,0
Total	1148	925			247565	100
SAÍDAS:						
Tecido	1148	32	36	1,57	66740	27,0
Termofluido		891	74	2,06	135909	54,9
Água evaporada		2			5788	2,3
Perdas radiação					25989	10,5
Perdas convecção					13140	5,3
Total	1148	925			247565	100

Estado referência: Água Líquida e Termofluido

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Tabela A.19 - Balanço Entálpico ao Polimerizador

	$\dot{m}_{seca} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\dot{m}_{\text{água}} / \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T / ^\circ\text{C}$	$C_p / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H / \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	$\Delta H / \%$
ENTRADAS:						
Tecido	531	22	35	1,60	31 218	0,4
Ar	12 645	276	41		1 225 535	17,5
Termofluido	8 686		247	2,68	5 754 705	82,1
Total	21 863	297			7 011 458	100
SAÍDAS:						
Tecido	531	7	63	1,54	51 743	0,7
Ar	12 645	290	109	1,03	2 172 027	31,0
Termofluido	8 686		213	2,56	4 737 890	67,6
Perdas radiação					31 630	0,5
Perdas convecção					18 169	0,3
Total	21 863	297			7 011 458	100

Estado referência: Água Líquida e Termofluido

 $T_{\text{Ref}} = 0 ^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ref}} = 0 \text{ bar}$

Anexo B – Especificações dos permutadores de calor

Neste anexo apresenta-se as especificações dos permutadores usados para a integração energética realizada.

Tabela B.1 – Especificações dos permutadores de calor usados

Nº	Corrente Quente	Corrente Fria	T_i / °C	T_f / °C	MC_p / kW·°C ⁻¹	T_i / °C	T_f / °C	MC_p / kW·°C ⁻¹	Q/ kW
1	41	40	60	35	51,8	25	50	51,8	1 296
2	39	13	103	35	4,10	25	90	4,29	279
3	39	1	103	35	12,2	25	90	12,8	834
4	4	3	84	35	13,2	25	69	14,8	647
5	6	5	70	35	27,7	25	60	27,8	970
6	2	38	82	35	13,2	25	70	13,8	620
7	39	14	103	80	2,55	70	90	2,93	58,6
8	39	15	103	83	7,53	73	93	7,53	151
9	39	5	103	70	25,3	70	90	27,8	837
10	39	3	103	79	13,0	69	90	14,8	315
11	39	17	103	90	0,42	80	90	0,55	5,50
12	39	19	103	90	0,39	80	90	0,51	5,10
13	39	22	103	35	4,94	25	93	4,94	336
14	39	24	103	35	4,79	25	93	4,79	322
15	39	26	103	35	5,51	25	93	5,51	375
16	39	28	103	35	4,36	25	93	4,36	296
17	39	30	103	35	3,17	25	93	3,17	216
18	39	32	103	35	6,83	25	93	6,83	464
19	39	34	103	35	4,69	25	93	4,69	319
20	39	36	103	35	3,95	25	93	3,95	269
21	39	43	103	25	6,95	25	93	6,95	473
22	39	44	103	25	6,58	25	80	8,13	447
23	23	22	126	103	4,94	93	116	4,94	118
24	29	28	159	103	2,10	93	120	4,36	118
25	25	24	136	103	3,88	93	120	4,74	128
26	27	26	118	103	5,51	93	108	5,51	82,7
27	31	30	120	103	3,17	93	110	3,17	52,9
28	33	32	115	103	6,83	93	105	6,83	82,0
29	35	34	115	103	4,69	93	105	4,69	56,3
30	37	36	116	103	3,95	93	105	3,95	51,4
31	42	43	170	103	2,80	80	120	6,95	188
32	16	43	260	90	0,70	80	120	2,98	119
33	18	43	260	90	0,68	80	120	2,89	116
34	44	21	173	120	1,72	80	120	2,26	90,4
35	39	38	80	35	2,55	25	70	2,55	115
36	39	38	83	35	7,53	25	70	8,03	361
37	39	38	90	35	0,43	25	70	0,51	23,1
38	39	28	90	35	0,35	25	70	0,43	19,3
39	39	38	79	35	13,0	25	69	13,0	567

Nº	Corrente Quente	Corrente Fria	T_i / °C	T_F / °C	MC_p / kW·°C ⁻¹	T_i / °C	T_F / °C	MC_p / kW·°C ⁻¹	Q / kW
40	39	38	103	35	32,8	25	70	49,5	2 227
41	42	38	170	102	0,51	25	70	0,77	34,7
42	46	38	265	102	0,05	25	70	0,18	8,15
43	21	38	120	102	1,72	25	70	0,69	31,0
44	45	38	166	102	0,93	25	70	1,32	59,5
45	29	38	159	102	2,53	25	70	3,20	144
46	25	38	136	102	1,2	25	70	0,91	141
47	23	38	126	102	0,33	25	70	0,18	7,92
48	31	38	120	102	0,26	25	70	0,10	4,68
49	27	38	118	102	0,45	25	70	0,16	7,20
50	33	38	115	102	0,18	25	70	0,05	2,34
51	35	38	115	102	0,17	25	70	0,05	2,21
52	20	38	109	102	5,96	25	70	0,93	41,72

Anexo C – Rede MER