

Modelação de cargas térmicas dinâmicas na indústria

Afonso Mateus Ribeiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão Industrial

Orientadores: Prof. Henrique Aníbal Santos de Matos
Dr. João Filipe Pinto Ribau

Júri

Presidente: Prof. Ana Isabel Cerqueira de Sousa Gouveia Carvalho
Orientador: Prof. Henrique Aníbal Santos de Matos
Vogal: Prof. Maria Cristina De Carvalho Silva Fernandes

Junho de 2019

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer todo o apoio que me foi dado por parte de ambos os meus orientadores. Tanto o professor Henrique Matos, como o “professor” (como o trato sempre) João Ribau contribuíram muito para o sucesso desta dissertação e, por isso, estou-lhes muito grato. Gostaria, ainda, de manifestar aqui o meu agradecimento ao ISQ pela sua colaboração neste desafio.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer aos meus pais e à minha irmã por serem as pessoas mais importantes na minha vida. Todas as decisões e atitudes que tomo são influenciadas pelos valores e educação que me têm vindo a transmitir. Muito obrigado por serem a minha família, sem vocês nunca seria candidato a engenheiro!

Finalmente, gostaria de agradecer aos meus amigos de curso que sempre me acompanharam nesta caminhada. Um obrigado especial ao Diogo por estar sempre disponível para me ajudar a atingir os meus objectivos.

Resumo

O aumento do consumo energético global, e conseqüente acréscimo da extração e utilização de recursos, tem impactos negativos no meio ambiente. Muitos sectores industriais dependem de combustíveis fósseis para obter energia e, na queima dos mesmos, emitem-se grandes quantidades de efluentes gasosos para a atmosfera. A preocupação ambiental e económica motivou o estudo de metodologias que promovessem a maximização da eficiência energética na indústria para reduzir o consumo de energia primária e as emissões gasosas. Ao interiorizar que maximizando a eficiência energética se beneficia a sustentabilidade do planeta, estabelecem-se metas de redução das emissões de gases de efeito de estufa, de aumento da eficiência energética e de utilização de energias renováveis. A utilização de ferramentas informáticas na indústria permite explorar novas medidas de monitorização e optimização de processos mesmo para empresas de pequena dimensão, tal com as inseridas na indústria alimentar e de bebidas. Para compreender melhor as opções de apoio informático disponíveis às empresas nesta indústria, realizou-se um estudo dedicado à identificação de ferramentas para modelação de cargas térmicas dinâmicas (processos descontínuos). De entre as ferramentas analisadas, a aplicação informática PinCH, baseada na metodologia da Análise do Ponto de Estrangulamento, foi a seleccionada. As suas características foram exploradas e testadas com alguns exemplos académicos referentes a processos industriais contínuos e descontínuos com potencial de integração energética. Simultaneamente, caracterizou-se uma unidade industrial, inserida no sector das carnes e produtos cárneos. Mesmo não tendo sido possível aplicar a metodologia da ferramenta PinCH ao processo, o potencial de aproveitamento energético foi identificado.

Palavras Chave: Eficiência energética, Recuperação de calor, Análise do Ponto de Estrangulamento, Modelação, *Software* PinCH, Casos industriais.

Abstract

The rise in global energy consumption, and consequent increase in the extraction and use of resources, has negative impacts on the environment. Many industrial sectors depend on fossil fuels to obtain energy and, during its burning, large amounts of gaseous effluents are emitted into the atmosphere. The environmental and economic concern has motivated the research for new methodologies that promote the energy efficiency maximization in the industry, in order to reduce the primary energy consumption and the gaseous emissions. The interiorization that maximizing energy efficiency benefits the planet's sustainability promotes the establishment of measures for greenhouse gas emissions reduction, energy efficiency increase and renewable energies use. The use of software tools allows industrial sectors to explore new measures for monitoring and optimizing their processes, even when it comes to small companies such as those in the food and beverage industry. In order to better understand the software support options available to companies in this industry, a study was carried out to identify tools for modelling dynamic thermal loads (batch processes). Among the analysed tools, the pinch analysis methodology-based PinCH software was selected. Its characteristics were explored and tested with some academic examples referring to continuous and discontinuous industrial processes with potential for energy integration. At the same time, an industrial unit, included in the Portuguese meat and meat related products sector, was characterized. Even though it was not possible to apply the PinCH software's methodology to the respective process, the energy recovery potential was still identified.

Keywords: Energy efficiency, Heat recovery, Pinch Analysis, Modelling, PinCH software, Industrial cases.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	ii
Lista de Acrónimos	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
1 Introdução.....	1
1.1 Contextualização Energética e Ambiental na Indústria	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objectivos da Dissertação	3
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2 Definição do Problema	5
2.1 A indústria Alimentar e de Bebidas.....	5
2.2 Identificação do Problema	6
3 Revisão de Métodos de Análise de Integração de Processos.....	7
3.1 Abordagem à Integração de Processos	7
3.2 Casos Reais da Aplicabilidade da Integração de Processos.....	8
3.2.1 Indústria Petroquímica: Fluid Catalytic Cracking Process (FCC).....	8
3.2.2 Integração Energética de um Complexo Hospitalar.....	9
3.2.3 Produção de Óleo de Girassol	9
3.3 Conceitos Termodinâmicos e de Transferência de Calor.....	9
3.3.1 Balanço de Energia	10
3.3.2 Transferência de Calor.....	10
3.3.3 Permutadores de Calor.....	12
3.4 Análise do Ponto de Estrangulamento.....	12
3.4.1 Obtenção de Dados numa APE.....	13
3.4.2 Targeting.....	14
3.4.3 Design	18
3.5 Processos Contínuos e Descontínuos.....	20
3.6 Processos Descontínuos: Quando Utilizá-los?	21
3.7 Integração Energética em Processos Descontínuos.....	22
3.8 Diagramas de Gantt.....	24
3.9 Melhores Técnicas Disponíveis (<i>Best Available Techniques, BAT</i>)	25
3.9.1 BAT Gerais para Todo o Sector Alimentar e de Bebidas	26
4 Revisão de Ferramentas para a Modelação de Cargas Térmicas.....	27
4.1 Perspetiva geral das Ferramentas Disponíveis.....	27
4.2 Ferramentas Existentes para a Modelação de Cargas Térmicas Dinâmicas	28

4.2.1	Linguagens de Programação	29
4.2.2	Aplicações Informáticas.....	30
4.2.3	Síntese e Análise Crítica das Ferramentas Abordadas	33
4.3	Exemplos Práticos da Aplicação de Ferramentas na Indústria.....	34
4.3.1	GREENFOODS na Produção de Cerveja	35
4.3.2	PinCH 3.0 na Indústria Alimentar – Produção de Bombons.....	35
5	Ferramenta para Análise do Ponto de Estrangulamento	39
5.1	Seleção da Ferramenta	39
5.2	Contextualização do Projecto PinCH 3.0	40
5.3	Metodologia	41
5.4	Componentes de Visualização.....	43
5.4.1	Inserção dos Dados Relativos às Correntes (Etapa 1)	44
5.4.2	Configuração do Equipamento (Etapa 2)	46
5.4.3	Definição dos Processos (Etapa 3).....	47
5.4.4	Aplicação de Calendarização aos Processos (Etapa 4)	48
5.4.5	Estabelecimento de Dados Económicos (Etapa 5)	50
5.4.6	Preparação dos Cálculos Referentes às Metas a Atingir (Etapa 6).....	53
5.4.7	Análise das Metas Energéticas (Etapa 7).....	54
5.4.8	Cálculo das Metas Energéticas e Relativas a Custos (Etapa 8).....	56
5.4.9	Integração de Unidades de Conversão de Energia (Etapa 9)	59
5.4.10	Design da Rede de Permutadores de Calor (Etapa 10)	60
6	Caso de Estudo Industrial	63
6.1	Indústria de Carnes.....	63
6.1.1	Central de Produção de Vapor	63
6.1.2	Descrição do Processo.....	66
6.1.3	Necessidades Processuais	67
6.2	Produção de Sal Nutritivo para Fertilizantes.....	67
6.2.1	Descrição do Processo Produtivo	68
6.2.2	Dados Processuais	69
6.2.3	As Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento	72
6.2.4	Potencial de Recuperação de Calor.....	74
6.2.5	Análise de Cenários de Produção	76
7	Conclusões e Recomendações Futuras	79
	Bibliografia	81
	Anexos.....	85

Lista de Acrónimos

OECD – *Organization for Economic Co-operation and Development*

IP - Integração de Processos

CHP - *Combined Heat and Power* (cogeração)

UE - União Europeia

SFOE - *Swiss Federal Office of Energy* (Departamento Federal Suíço de Energia)

APE - Análise do Ponto de Estrangulamento

PE - Ponto de Estrangulamento

RPC - Rede de Permutadores de Calor (em inglês, HEN)

HEN - *Heat Hexchanger Network*

UQ - Utilidade Quente (em inglês, HU – *Hot Utility*)

UF - Utilidade Fria (em inglês, CU – *Cold Utility*)

MER - *Minimum Energy Requirement* ou *Maximum Energy Recovery*

BAT - *Best Available Techniques* (Melhores técnicas disponíveis)

OC - *Operating Case* (Caso Operacional)

MOC - *Multiple Operating Cases* (Múltiplos casos operacionais)

TS - *Time Slice* (Intervalo de tempo)

BCD - *Batch Cycle Duration* (Duração de um ciclo *batch*)

ISSP - *Indirect Source Sink Profile* (Perfil indirecto de fontes e receptores)

EROP - *Equipment-Wise Repeated Operation Period* (Período de operação repetida do equipamento)

HEX - Heat Exchanger (Permutador de calor)

IL - *Intermediate Loop* (Circuito intermediário)

HESN - *Heat Exchanger and Storage Network* (rede combinada de permutadores de calor e de armazenamento térmico)

HS - *Heat Storage* (Armazenamento de calor)

SM - *Storage Medium* (Meio de armazenamento)

ECU - *Energy Conversion Unit* (Unidade de conversão de energia)

ETA - *Energy Targeting Analysis* (Análise das metas energéticas)

TAM - *Time Average Model* (Modelo do tempo médio)

SS - *Stratified Storage* (Armazenamento estratificado)

SROP – *One-Stream Repeated Operation Period* (Período de operação repetida de uma corrente)

PTN – Pressão e Temperatura Normais (condições PTN)

Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo e projecções do consumo de energia do sector industrial até 2040, por tipo de fonte de energia: Em países membros e não-membros da OECD (adaptado de U.S. Energy Information Administration, 2016).....	1
Figura 2 - Curvas compostas (adaptado de Relvas et al., 2002).....	15
Figura 3 - Representação de uma rede de permutadores de calor através de uma rede MER (adaptado de Klemeš et al., 2011).....	19
Figura 4 - Integração energética directa (adaptado de Fernández et al. 2012).....	23
Figura 5 - Integração energética indirecta (adaptado de Fernández et al. 2012).....	23
Figura 6 - Diagrama de Gantt para um processo descontínuo simples (adaptado de Smith, 2005)....	24
Figura 7 - Sobreposição de lotes num processo descontínuo simples (adaptado de Smith, 2005).....	25
Figura 8 – Curvas compostas e curvas compostas globais do caso operacional 4, para um $\Delta T_{min} = 5K$, ilustradas por gráficos provenientes do PinCH 3.0 (Olsen et al., 2016)	37
Figura 9 - Processo de estudo tipicamente realizado numa APE na indústria (adaptado de Lucerne University of Applied Science and Arts, 2012)	42
Figura 10 - Ambiente gráfico de trabalho inicial	44
Figura 11 – Tabela de correntes processuais de um processo contínuo (tutorial 1, disponível em PinCH)	45
Figura 12 - Tabela de utilidades de um processo contínuo (tutorial 1, disponível em PinCH)	46
Figura 13 – Explorador de Projecto e Propriedades do equipamento C100 (Tutorial 3, disponível em PinCH)	47
Figura 14 - Calendarização de um processo químico com dois casos operacionais (tutorial 2, disponível em PinCH)	48
Figura 15 - Diagrama de Gantt de um processo químico com dois casos operacionais (tutorial 2, disponível em PinCH).....	49
Figura 16 - Período de Operação Repetida do Equipamento (EROP) de um processo descontínuo com sobreposição de lotes (tutorial 3, disponível em PinCH)	50
Figura 17 - Parâmetros de amortização (tutorial 1, disponível em PinCH).....	51
Figura 18 – Explorador de Resultados Alvo (tutorial 3, disponível em PinCH).....	53

Figura 19 – ETA de um processo descontínuo com sobreposição de lotes (tutorial 3, disponível em PinCH)	55
Figura 20 – Stratified Storage (SS) geral com três camadas, dois ILs com duas fontes e dois receptores cada (tutorial 4, disponível em PinCH).....	57
Figura 21 – ISSP (tutorial 4, disponível em PinCH)	58
Figura 22 - Tabela de fontes (tutorial 4, disponível em PinCH)	58
Figura 23 - Tabela de receptores (tutorial 4, disponível em PinCH)	59
Figura 24 - Tabela de custos (tutorial 4, disponível em PinCH).....	59
Figura 25 – Equação do custo de investimento de uma ECU (interface do PinCH 3.0)	60
Figura 26 - HESN para o processo otimizado (tutorial 4, disponível em PinCH).....	61
Figura 27 - Transferência de calor não vertical (Nemet et al., 2015).....	62
Figura 28 - Diagrama de Processos.....	66
Figura 29 - Esquema sequencial das etapas do processo	68
Figura 30 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento por lote.....	71
Figura 31 - Diagrama de Processos.....	72
Figura 32 - Nó de junção das correntes	73
Figura 33 – Diagrama de processos para a unidade otimizada em TS1	85
Figura 34 - Diagrama de processos para a unidade otimizada em TS2.....	86
Figura 35 - Diagrama de processos para a unidade otimizada em TS3, com permuta directa entre as correntes “Concentrado” e “Licor”	87
Figura 36 - Diagrama de processos para a unidade otimizada em TS4.....	88
Figura 37 - Diagrama de processos para a unidade otimizada com armazenamento de energia térmica	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Síntese das características das ferramentas para modelação de cargas térmicas dinâmicas	34
Tabela 2 - Cargas máximas e poupanças energéticas num caso ideal e para uma bomba de 155 kW (adaptado de Olsen et al., 2017)	38
Tabela 3 - Consumo de gás natural relativo ao ano de 2018	64
Tabela 4 - Composição e peso molecular do gás natural	64
Tabela 5 - Consumo mensal de gás natural em quilogramas (2018)	65
Tabela 6 – Caudal de água fresca consumida pela caldeira em 2018 (m ³)	65
Tabela 7 - Quantidades por lote, calores específicos médios e coeficientes de transferência de calor	69
Tabela 8 - Dados relativos aos fluidos de arrefecimento e aquecimento	69
Tabela 9 - Tanque de Mistura	70
Tabela 10 - Evaporador	70
Tabela 11 - Tanque de Drenagem	70
Tabela 12 - Cristalizador	70
Tabela 13 - Caudais mássicos e capacidades caloríficas médias das correntes processuais	71
Tabela 14 - Consumo de utilidades e custos operacionais associados à produção de 924 lotes por ano	72
Tabela 15 - Comparação de custos em TS3	75
Tabela 16 – Recuperação directa vs recuperação directa e indirecta	76
Tabela 17 - Comparação dos cenários de produção: Potencial vs Custos	77
Tabela 18 - Consumo de utilidades e custos operacionais associados à produção de 924 lotes por ano (4 lotes/dia)	90
Tabela 19 - Consumo de utilidades e custos operacionais associados à produção de 924 lotes por ano (6 lotes/dia)	90

1 Introdução

Este capítulo introdutório apresenta uma contextualização energética e ambiental na Indústria a nível global. De igual forma, são expostos os motivos de interesse em desenvolver esta dissertação na área da eficiência energética e os objectivos a atingir ao longo do desenvolvimento da mesma. Por fim, na última secção, é realizada uma breve explicação relativamente à sua estrutura.

1.1 Contextualização Energética e Ambiental na Indústria

O aumento do consumo energético mundial está em grande parte associado a um crescimento da população no planeta. As necessidades básicas de uma população em crescimento, de modo a serem satisfeitas, resultam num aumento do consumo energético global, uma vez que a produção industrial requer um elevado e contínuo fornecimento de energia (Klemeš et al., 2011).

Uma característica comum dos mais variados sectores industriais é o facto do fornecimento de energia necessário para a produção ser oriundo de combustíveis fósseis, recursos naturais não renováveis, tais como o carvão, petróleo e gás natural. A figura 1 representa a dependência que a indústria tem e que ainda se estima vir a ter relativamente aos combustíveis fósseis, nos países membros e não-membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (em inglês, OECD – *Organization for Economic Co-operation and Development*) (U.S. Energy Information Administration, 2016).

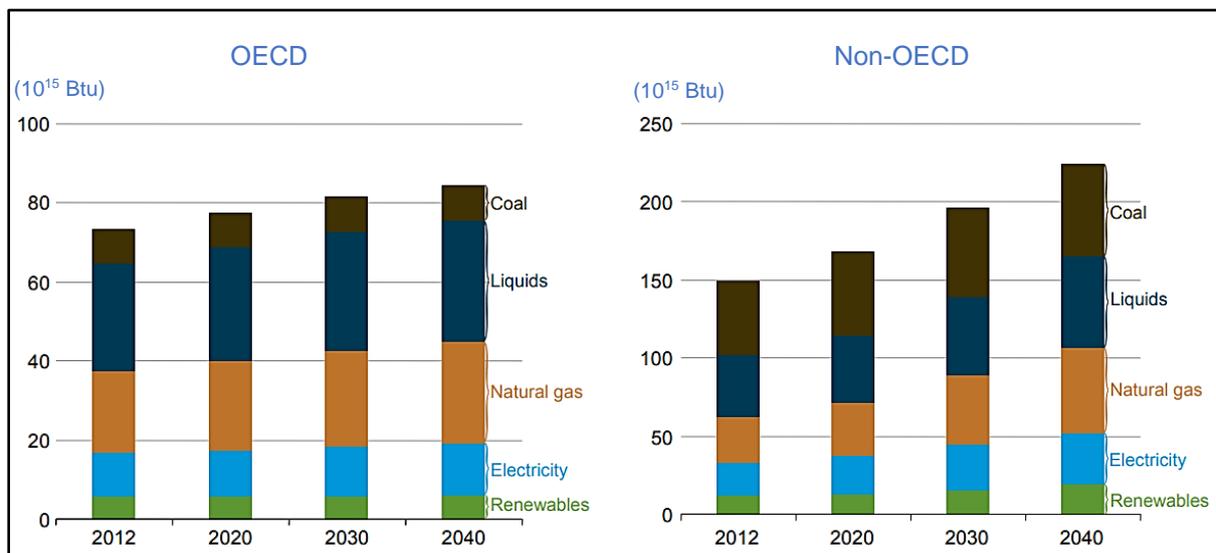


Figura 1 - Consumo e projecções do consumo de energia do sector industrial até 2040, por tipo de fonte de energia: Em países membros e não-membros da OECD (adaptado de U.S. Energy Information Administration, 2016).

Esta dependência, para além de criar uma descompensação destes recursos no planeta, tem um impacto negativo no ambiente que advém das emissões de gases libertados para a atmosfera durante a combustão destes recursos (um meio de conversão maioritário). A utilização excessiva de energia e de matérias primas na indústria de processos cria uma vulnerabilidade no meio ambiente. Para além da sustentabilidade ambiental não ser assegurada, os desperdícios associados à má utilização de energia (isto é, com elevadas perdas energéticas) e de matérias primas provocam elevados custos de

produção que podem ser evitados. A interiorização deste problema leva a que a indústria tome medidas no sentido de procurar outras fontes de energia, renováveis por exemplo, e reduzir o desperdício provocado pelo uso e transformação ineficiente da mesma (Fernández et al., 2012).

1.2 Motivação

Subjacente a melhorias na eficiência energética de processos industriais estão procedimentos e metodologias complexas que requerem investimentos, tanto a nível de conhecimento (investigação) como financeiros. É de extrema relevância que os processos nas indústrias, ou os sistemas energéticos das mesmas, estejam programados para funcionar com a maior eficiência possível, promovendo o consumo mínimo de energia e materiais. Estes sistemas devem ainda utilizar consumos de baixo valor e reciclar os desperdícios de processos anteriores, ou reutilizar desperdícios e/ou resíduos processuais, de forma a poder reduzir o consumo energético ou de materiais em outros processos que deles necessitem. Este é um conceito por vezes denominado de simbiose industrial. Por exemplo, reaproveitar água quente (que seria inicialmente desperdiçada) com o objectivo de aquecer um fluxo para um outro processo, resulta numa diminuição do consumo de energia que de outra forma seria necessário para o aquecimento do fluxo original. O consumo energético para a reaquecer até à temperatura desejada vai ser naturalmente menor e, assim, não existe desperdício de água (Klemeš et al., 2011).

A maximização da eficiência energética global de um processo tem como sua consequência a redução do consumo de combustíveis e, em simultâneo, da emissão de efluentes gasosos provenientes da respectiva queima. A eficiência energética pode ser assegurada com a integração de processos, que pretende tirar proveito do potencial térmico existente no próprio processo, de forma a que possa existir uma optimização do projecto das utilidades externas (fluidos exteriores ao processo que trocam calor directamente com as correntes dos mesmos). Qualquer estudo de Integração de Processos (IP) requer sempre uma análise global do processo de produção para que possa ser feita uma avaliação coerente do potencial de energia térmica existente. Apenas assim as interligações da rede de vapor e dos fluidos quentes com as necessidades entálpicas do sistema produtivo podem ser optimizadas (Relvas et al., 2002).

Segundo Klemeš et al. 2011, a eficiência do fornecimento de energia é amplamente melhorada quando existe cogeração, ou seja, quando se implementam sistemas CHP, *Combined Heat and Power*. O suporte teórico que fundamenta a cogeração está simplesmente relacionado com o aproveitamento evidente de energia sob a forma de calor. Esta energia, num sistema de produção eléctrica dedicada convencional, é em grande parte desperdiçada durante as várias fases do processo de produção de electricidade. Facilmente se conclui que estes sistemas são altamente ineficientes pois o calor, como produto secundário da produção de electricidade, é em grande parte libertado no ar, deixando assim de ter qualquer utilidade. Se, ao invés, ao sistema de produção de energia eléctrica se combinar um sistema de calor (CHP), é possível aproveitar/permutar o mesmo para outros fins, como por exemplo o aquecimento de água fornecida a edifícios locais. De uma forma simplificada, pode dizer-se que cogeração é a produção de electricidade e calor útil (Moran et al., 2014). Também a trigeração, que é um sistema de cogeração que, para além de electricidade e calor, produz frio com um ciclo frigorífico,

está, cada vez mais, a ser implementada na maioria dos sectores industriais (caso da [CLIMAESPACO](#), no Parque das Nações). Deve-se ao facto deste tipo de sistemas combinados ter um grande potencial para reduzir a emissão de gases de efeito de estufa. Relvas et al. 2002 vinculam que, no caso particular de projectos de sistemas de cogeração, a abordagem na vertente de integração de processos permite que as condições de interligação com as unidades que lhe estão adjacentes sejam determinadas com o propósito de aumentar a eficiência global do sistema.

Como já foi mencionado, é preponderante existir uma gestão e utilização inteligente de energia de modo a assegurar um menor consumo da mesma. É, também, com esse propósito que são desenvolvidas novas tecnologias que permitam obter maior eficiência energética. Klemeš et al. 2011 indicam que turbinas de gás avançadas, células electroquímicas, colunas de destilação com parede dividida ou permutadores de calor compactos são bons exemplos de tecnologias desenhadas especificamente para melhorar a eficiência energética dos processos. Veja-se quais os maiores contributos que estes equipamentos sofisticados podem oferecer à indústria de processos:

- ✓ As turbinas de gás avançadas têm aplicações industriais importantes, nomeadamente na cogeração;
- ✓ Também a utilização de células electroquímicas, ou *Fuel Cells* (FC's), é muito útil na cogeração uma vez que para além de electricidade, é produzido calor a temperaturas muito elevadas (acima de 500°C). Além disso, estima-se que este tipo de equipamento emita cerca de 25% menos dióxido de carbono que uma turbina de gás comum.
- ✓ Relativamente a colunas de destilação com parede dividida, pode dizer-se que permitem obter uma poupança energética de cerca de 30% e uma diminuição de cerca de 25% em custos de capital. É um equipamento muito benéfico no que diz respeito à separação de componentes de misturas, pois a destilação é um processo que requer um elevado consumo energético;
- ✓ Os permutadores de calor compactos (utilizados na transferência de calor) são também um tipo de equipamento que, ao ser utilizado, resulta numa elevada poupança a nível energético e na diminuição de custos de capital e instalação.

1.3 Objectivos da Dissertação

A presente dissertação representa o trabalho final de curso para obtenção do grau mestre em engenharia e gestão industrial. Considerando que a dissertação se enquadra no âmbito da eficiência energética na indústria alimentar e de bebidas, é necessário realizar um estudo sobre a mesma de forma a compreender quais as suas principais necessidades a nível processual. Assim, são propostos cinco objectivos para o desenvolvimento da dissertação:

1. A realização de um estudo detalhado sobre as ferramentas disponíveis para modelação de cargas térmicas, existindo um foco preferencial nas que permitam avaliar cargas dinâmicas;
2. A abordagem e análise de um caso de estudo, resultante do contacto presencial com uma empresa industrial do sector alimentar;

3. A aplicação de uma ferramenta de análise de integração energética de processos descontínuos ao caso de estudo industrial para melhor compreensão do potencial de recuperação de calor na empresa;
4. A apresentação das medidas de optimização identificadas pela ferramenta, bem como os custos a elas associados;
5. A análise do impacto que diferentes cenários de produção têm no potencial de recuperação de calor e nos custos da empresa industrial.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se repartida por sete capítulos que têm uma sequência lógica: (1) Introdução, (2) Definição do problema, (3) Revisão de métodos de análise de integração de processos, (4) Revisão de ferramentas para a modelação de cargas térmicas, (5) Ferramenta para Análise do Ponto de Estrangulamento, (6) Caso de estudo industrial, (7) Conclusões e recomendações futuras. Nos capítulos acima indicados são, então, desenvolvidas:

1. (Introdução) A contextualização do problema, a motivação para o estudo do mesmo, os objectivos da dissertação e a estrutura que esta deve seguir;
2. (Definição do problema) A definição do problema a abordar na dissertação, que pretende explicar a razão pela qual surgiu a necessidade de se investigarem novas medidas para o tentar solucionar;
3. (Revisão de métodos de análise e integração de processos) A revisão de literatura científica que incide o seu estudo na integração de processos e na análise do ponto de estrangulamento, bem como nos seus conceitos subjacentes;
4. (Revisão de ferramentas para a modelação de cargas térmicas) A revisão das linguagens de programação e aplicações informáticas (*softwares*) disponíveis para modelação de cargas térmicas, na qual se inclui uma síntese e comparação das mesmas;
5. (Ferramenta para Análise do Ponto de Estrangulamento) A apresentação detalhada da ferramenta a utilizar na componente prática da dissertação, bem como a explicação dos motivos para a escolha da mesma;
6. (Caso de estudo industrial) A apresentação de um estudo sobre uma empresa da indústria alimentar e de bebidas que seja compatível com as normas e princípios de utilização da ferramenta escolhida. De igual forma, são expostas as medidas de optimização identificadas pela ferramenta, bem como os custos a elas associados. Por fim, é também realizada uma análise de diferentes cenários de produção;
7. (Conclusões e recomendações futuras) A exposição das conclusões a retirar do trabalho desenvolvido.

2 Definição do Problema

A União Europeia (UE) estabeleceu o objectivo de reduzir a emissão de gases de efeito de estufa em 40% e aumentar a eficiência energética e energias renováveis em 27% até ao ano de 2030 (Fluch et al., 2017). A preocupação com os impactos negativos da indústria de processos no ambiente tem aumentado ao longo dos anos, levando a que sejam estabelecidas metas, como as acima referidas, que os visem mitigar.

De acordo com Fluch et al., 2017, os resultados de várias auditorias energéticas simples provaram o elevado potencial para eficiência energética e redução das emissões de CO₂ na indústria europeia alimentar e de bebidas, tanto através da optimização dos processos existentes, como da introdução de novas tecnologias ou recuperação de calor. Como poderá ser compreendido mais à frente, a indústria alimentar e de bebidas apresenta um potencial elevado no que diz respeito à implementação de medidas que melhorem significativamente os seus processos. Como tal, torna-se interessante estudar a forma de promover a optimização da gestão de energia térmica na mesma.

2.1 A indústria Alimentar e de Bebidas

A indústria alimentar e de bebidas é constantemente desafiada a perceber qual o seu potencial para aumentar a sua eficiência energética térmica, dado que a qualidade e o sabor dos produtos são factores essenciais no processo de produção. Assim, é necessária uma análise rigorosa das tecnologias de processo para cada aplicação. Adicionalmente, a gestão de energia térmica nestes processos pode ser complexa, uma vez que muitos processos deste sector industrial são descontínuos ou semicontínuos e, portanto, elevadas necessidades energéticas variam com o tempo. Nestas situações, a integração energética requer um planeamento detalhado e integração de sistemas de armazenamento de energia térmica (Muster-Slawitsch et al., 2014).

Mais de 50% dos requisitos de energia térmica na indústria alimentar e de bebidas são necessários a níveis baixos de temperatura (abaixo de 100°C). Werner and Constantinescu 2006 referem que processos típicos, nesta indústria, com elevadas necessidades de energia térmica são: limpeza, secagem, evaporação e destilação, branqueamento, pasteurização, esterilização, etc. Vannoni, Battisti, and Drigo 2008 afirmam que, devido à necessidade de energia térmica a níveis baixos e médios de temperatura, vários estudos mostraram o elevado potencial para a integração de energias renováveis na indústria, especialmente no que se refere a aplicações de energia solar térmica (uma alternativa economicamente viável de fornecimento de energia convencional).

Em 2015, a indústria alimentar e de bebidas consumiu 11% da necessidade de energia final da indústria global na UE. Este é o maior sector de manufactura da UE e contém mais de 289 000 empresas, das quais 99,1% são ou pequenas ou médias empresas que apenas contribuem para 49,5% do *turnover* do sector. Em comparação com grandes empresas, as pequenas e médias empresas têm um défice no que diz respeito à falta de informação sobre os seus consumos energéticos habituais, sobre a gestão de energia e mesmo de oportunidades para aumentar a eficiência energética e integrar tecnologias sustentáveis nos seus processos produtivos. A sua dimensão e falta de recursos financeiros não lhes permite ter as mesmas condições que empresas de maior dimensão e, por isso, não têm a possibilidade

de investir em áreas como a eficiência energética ou a integração de energia renovável. Muitos projectos não chegam a ser iniciados por falta de fundos que os tornem possíveis. A estes factores ainda se junta a falta de fundos de investimento que financiem os projectos destas empresas. A incerteza quanto ao retorno que os investidores venham a ter, fá-los ficar reticentes relativamente ao financiamento dos mesmos (Fluch et al., 2017).

2.2 Identificação do Problema

De acordo com o Livro Verde para a Eficiência Energética (LVEE), publicado pela Comissão Europeia em 2005, o reforço das políticas dirigidas ao aumento da eficiência do consumo e da produção de energia deve ser uma preocupação. A eficiência energética na indústria está maioritariamente associada à noção de aumento da poupança de energia. Contudo, para que a eficiência seja atingida, são também necessárias melhorias no âmbito da produção, transformação e distribuição da mesma. A falta de eficiência no consumo industrial de energia, obtida da queima de combustíveis fósseis, é um dos principais motivos de preocupação ambiental, uma vez que o excesso de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases de efeito de estufa para a atmosfera são uma das graves consequências da mesma (Magueijo et al., 2010).

Uma vez que as empresas do sector alimentar não têm dimensão nem poder financeiro para investir em análises complexas, identifica-se que a eventual possibilidade de utilização de uma ferramenta que seja capaz de analisar os efeitos das necessidades energéticas, em condições de variação ao longo do tempo, seja uma mais valia para as mesmas (Muster-Slawitsch et al., 2014).

A diversidade de processos de produção na indústria alimentar e a grande variedade de produtos produzidos dificulta o desenvolvimento de ferramentas capazes de modelar as unidades processuais. A grande maioria dos alimentos apresentam composições altamente complexas e as suas propriedades podem mudar irreversivelmente durante o processo industrial. Nestas circunstâncias, a dificuldade na modelação dos processos acresce, especialmente por causa da dificuldade que existe em prever as propriedades dos alimentos e, conseqüentemente, o seu comportamento em função das condições de operação (Bon et al., 2010).

Tendo em conta a informação apresentada, as principais razões associadas à existência deste problema são:

- ✓ A fraca eficiência energética apresentada pelos mais variados sectores industriais e, em particular, pelo sector alimentar e de bebidas, que tem um elevado potencial para obter maior eficiência energética e para integrar energias renováveis;
- ✓ A incapacidade financeira por parte das empresas deste sector em investir em áreas como a eficiência energética ou a integração de energia renovável;
- ✓ A escassa disponibilidade de ferramentas existentes para modelar processos industriais descontínuos e semicontínuos.

3 Revisão de Métodos de Análise de Integração de Processos

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura que incide sobre os conceitos e técnicas/metodologias essenciais no estudo da integração de processos industriais. Como tal, o capítulo começa com uma abordagem inicial à integração de processos e com a apresentação de alguns casos reais na qual a mesma provou ser benéfica. Posteriormente, é realizado um estudo sobre alguns conceitos termodinâmicos e de transferência de calor importantes na compreensão da metodologia da Análise do Ponto de Estrangulamento. A distinção entre processos contínuos e descontínuos é desenvolvida nas secções seguintes. Uma vez que os processos descontínuos são uma componente de estudo desta dissertação, são ainda expostos os conceitos associados à sua característica principal (propriedades a variar no tempo). Por fim, o capítulo conclui com a apresentação das melhores técnicas disponíveis (BAT) para diminuir o impacto ambiental.

3.1 Abordagem à Integração de Processos

As preocupações sociais e ambientais associadas à poupança de água e energia, aquecimento global e emissões de gases de efeito de estufa têm vindo a aumentar nas últimas décadas. Todos estes problemas estão em grande parte relacionados com o aumento da população, necessidades industriais e consequente procura de energia. No sentido de tentar mitigá-los, múltiplos estudos e metodologias surgiram com o intuito de tentar melhorar a eficiência energética. A integração de processos é uma das várias metodologias inovadoras que têm vindo a ser exploradas desde 1970 (Klemeš et al. 2011).

Para uma indústria ser sustentável é necessário procurar aumentar os lucros, enquanto se tenta reduzir tanto o consumo de recursos como a geração de desperdícios. Estes são os objectivos de uma indústria sustentável, e é em grande parte, nisso, que a integração de processos se foca. A integração de processos na indústria é uma abordagem sistemática utilizada na concepção e/ou optimização de processos produtivos. Representa um conjunto de variadas técnicas que têm o propósito de desenvolver novas estratégias sustentáveis para o desenho e funcionalidade da unidade industrial. Quer-se com isto dizer que uma correcta integração numa unidade fabril tem um impacto significativo na redução de custos operatórios e de investimento. Alinhados a estes benefícios directos poderão estar, também, vantagens a nível da produção, operações, controlabilidade da fábrica, flexibilidade dos processos e de minimização de emissões gasosas. Será ainda de destacar que as técnicas de integração de processos podem ser solicitadas face a diferentes circunstâncias, sendo vasta a aplicabilidade das práticas em questão. Estas técnicas podem ser aplicadas em projectos feitos de raiz ou em fábricas já instaladas, em processos simples ou complexos, de funcionamento contínuo ou descontínuo.

Dos vários métodos de integração de processos desenvolvidos até à data, torna-se relevante destacar aqueles a que se recorre mais frequentemente para otimizar os processos químicos industriais. Evidenciam-se então os métodos como a Análise do Ponto de Estrangulamento (*Pinch Analysis*), a Programação Matemática, a Heurística, a Simulação e a Análise Exergética (Relvas et al., 2002).

Foo, El-Halwagi, and Tan 2017 apresentam uma definição de integração de processos: “**a holistic approach to design and operation that emphasises the unity of the process**”. O conceito pode,

então, ser entendido como uma abordagem holística ao *design* e às operações que valoriza a unidade do processo.

Pode dizer-se que, na origem da integração de processos, o foco era o reaproveitamento de desperdícios de calor gerados em processos anteriores. A energia poupada levava a que houvesse uma diminuição substancial no recurso a utilidades exteriores ao processo. Foi por estas razões que a abordagem em questão ficou mais conhecida como integração energética, sendo a integração de processos o termo mais geral (Klemeš et al., 2011).

Actualmente, reconhece-se a integração energética como uma das mais vastas áreas de utilização da integração de processos. Aliás, grande parte dos métodos desenvolvidos até à data, que são aplicáveis a diferentes áreas de utilização da integração de processos, resultaram de estudos baseados em sistemas energéticos (Relvas et al., 2002).

A importância da integração energética na indústria é indiscutível e por isso deve ser cada vez mais explorada. Embora existam diversas metodologias, a *Pinch Analysis* (APE) é a técnica que mais se tem sobressaído nesta área dado que já provou ser altamente aplicável a processos industriais, como aliás é possível verificar na secção seguinte (3.2), onde casos reais serão exemplificados sobre a integração de processos na indústria.

3.2 Casos Reais da Aplicabilidade da Integração de Processos

A integração de processos já provou ser bastante eficaz em distintos sectores industriais. Como tal, torna-se relevante analisar alguns casos onde esta metodologia tem espaço para reduzir a procura de recursos e de custos associados a capital e operações (Klemeš et al., 2011). Nesse sentido, três exemplos de como a integração energética pode ser bastante benéfica em sectores distintos da indústria são apresentados nesta secção.

3.2.1 Indústria Petroquímica: Fluid Catalytic Cracking Process (FCC)

Uma unidade FCC é um dos principais elementos do processo de produção numa refinaria petrolífera. Uma maneira de garantir que exista recuperação de energia pode ser através da melhoria do projecto da rede de permutadores de calor associada a uma unidade FCC (Al-Riyami et al., 2001). A unidade FCC considerada tinha vinte e três correntes quentes e onze correntes frias. Em primeiro lugar foi necessário analisar detalhadamente o processo existente para depois se propor um plano que melhorasse o projecto da rede de permutadores de calor (em inglês, HEN - *heat exchanger network*) existente. Para desenvolver este projecto foi utilizada a metodologia da Análise de Ponto de Estrangulamento (APE), internacionalmente conhecida como *Pinch Analysis* (Asante and Zhu, 1997). Após a aplicação desta técnica de integração de processos, concluiu-se que o mais benéfico para a unidade FCC seria adicionar quatro novos permutadores de calor e remover um dos antigos. A nova RPC (rede de permutadores de calor) resultou numa poupança de 8,955 MW, ou 74%, de energia. Mais concretamente, assegurou-se uma descida de 27% nos custos de utilidades que se traduziu numa poupança anual de \$2 388 600. A modificação/optimação da RPC teve um custo de \$3 758 420, ou seja, o retorno do investimento teve um período que não chegou a 19 meses.

3.2.2 Integração Energética de um Complexo Hospitalar

O complexo hospitalar em causa era composto por um instituto, um hospital, um centro regional de lavandaria, um centro desportivo e mais alguns edifícios públicos. O complexo foi estudado em 2003 por Herrera, Islas, and Arriola 2003 e verificou-se que este requeria um consumo de combustível, para gerar o vapor necessário ao seu funcionamento, que representava cerca de 75% e 68% do consumo total de energia e do custo energético do complexo, respectivamente. Também neste problema foi aplicada a metodologia da APE e concluiu-se que a necessidade mínima de utilidades quentes exteriores ao processo era de 388,64 kW. Uma vez que o aquecimento usado estava a consumir 625,28 kW, existia a possibilidade de poupar 38% de energia.

3.2.3 Produção de Óleo de Girassol

Como mencionado por Klemeš et al. 1998 na primeira conferência sobre integração de processos, modelação e optimização para poupança energética e redução da poluição, foi analisado um processo de produção de óleo que operava com diferença mínima de temperatura de sessenta e cinco graus Celcius ($\Delta T_{\min} = 65^{\circ}\text{C}$) num processo *Pinch*. O sistema recorria a fontes externas de aquecimento e arrefecimento. Dois tipos de utilidades quentes e outros dois de utilidades frias eram utilizados para aquecer e arrefecer as correntes processuais, respectivamente. As conclusões do estudo foram que deveria ser aumentada a recuperação de energia e diminuída a diferença mínima de temperaturas para 8-14°C ($\Delta T_{\min} = 8-14^{\circ}\text{C}$). Agindo em conformidade com as respectivas alterações, a necessidade de utilidades quentes e frias seria largamente reduzida e, conseqüentemente, todo o processo de produção viria a ser simplificado.

3.3 Conceitos Termodinâmicos e de Transferência de Calor

Esta secção visa apresentar alguns conceitos de termodinâmica importantes na integração de processos (IP).

Ao longo do século vinte, a aplicação da termodinâmica em engenharia teve um impacto significativo na melhoria da qualidade da vida humana. A utilização de princípios termodinâmicos e outras ciências da engenharia propulsionaram bons desenvolvimentos nas áreas de medicina (melhorias na prática médica), de transporte (em superfícies, aéreo e no espaço), de geração e transmissão de electricidade e ainda de aquecimento e arrefecimento de edifícios. O potencial de aplicação da termodinâmica é substancial e não se restringe apenas às áreas referidas.

A termodinâmica tem e vai continuar a ter um contributo bastante positivo nos desafios impostos socialmente, como a utilização mais eficiente de combustíveis fósseis, o avanço de tecnologias de energia renovável e o desenvolvimento de edifícios, sistemas de transporte e práticas industriais mais eficientes do ponto de vista energético. A mitigação do aquecimento global, da poluição do ar e da água são, também, realidades nas quais a boa utilização dos conhecimentos termodinâmicos poderão ter um papel interessante (Moran et al., 2014).

3.3.1 Balanço de Energia

Em termodinâmica, a variação da energia total de um sistema está associada a três contribuições macroscópicas. Uma é a variação da energia cinética, associada ao movimento do sistema como um todo em relação a um quadro de coordenadas externo. Outra, é a variação na energia potencial gravítica, associada com a posição do sistema como um todo no campo gravitacional do planeta Terra. As restantes variações estão agrupadas na energia interna do sistema. Através de uma interpretação macroscópica, pode entender-se por energia interna como a energia atribuída aos movimentos e configurações de moléculas, átomos e partículas subatómicas que compõem a matéria do sistema (Moran et al., 2014). A variação da energia total num sistema fechado pode ser dada pela expressão:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (3.1)$$

3.3.2 Transferência de Calor

A transferência de calor (Q) é um princípio termodinâmico muito estudado que representa a quantidade de energia que é transferida através da fronteira de um sistema numa interacção de calor com o que o rodeia. Um sistema tanto cede como recebe calor, dependentemente da convenção do sinal assumida. No livro *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* de Moran et al. 2014, assume-se sempre que para valores positivos de Q , um sistema recebe calor e, contrariamente, que para valores negativos, o sistema cede calor. Isto é:

$$Q > 0: \text{ sistema recebe calor} \quad (3.2)$$

$$Q < 0: \text{ sistema cede calor} \quad (3.3)$$

Note-se que não existe uma convenção mais correcta que outra. Apenas é necessário garantir que a convenção assumida é sempre respeitada. É, também, importante salientar que para existir transferência de calor, tem necessariamente de existir um diferencial de temperaturas. Ou seja:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} (< 0) \quad (3.4)$$

Os métodos existentes que avaliam a transferência de energia por calor reconhecem dois mecanismos básicos de transferência: condução e radiação térmica. Estão ainda disponíveis relações empíricas para a avaliação de transferência de energia que envolvem um modo combinado, denominado de convecção.

3.3.2.1 Condução

Segundo Moran et al. 2014, a transferência de energia por condução pode ser feita em sólidos, líquidos e gases. Este conceito pode ser visto como a energia que as partículas mais energéticas de uma substância transferem para partículas adjacentes menos energéticas que estejam a interagir com as

mesmas. A condutividade térmica (k) é uma propriedade termodinâmica inerente a qualquer material e quantifica a habilidade que este tem de conduzir energia térmica. Substâncias cujo valor da condutividade térmica é elevado, como é o caso do cobre, são bons condutores, enquanto que substâncias que apresentem esse valor baixo (cortiça e espuma de poliestireno) são bons isoladores. Segundo a lei de *Fourier*, a taxa de transferência de calor (Q) através de qualquer plano normal à direcção x é proporcional à área de superfície (A) e ao gradiente de temperatura na direcção x (dT/dx):

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.5)$$

O sinal negativo associado à condutividade térmica é consequência de a energia ser transferida na direcção da temperatura decrescente.

3.3.2.2 Radiação

De acordo com Moran et al. 2014, a radiação térmica é emitida pela matéria como resultado de mudanças nas configurações electrónicas dos átomos ou moléculas presentes na mesma. A energia é transportada por ondas electromagnéticas (fotões). Ao contrário da condução, a radiação térmica não requer meio interveniente para propagar energia e até pode ocorrer no vácuo. Tanto superfícies sólidas como gases ou líquidos emitem, absorvem e transmitem radiação térmica em diferentes temperaturas. A emissividade (ϵ) é uma propriedade termodinâmica intrínseca às superfícies que indica o quão eficazmente estas irradiam. A taxa que a energia é emitida (Q) de uma superfície de área A é quantificada macroscopicamente através de uma forma modificada da lei de *Stefan-Boltzman* que mostra que a radiação térmica está associada com a quarta potência da temperatura absoluta da superfície (T_b):

$$\dot{Q}_c = \epsilon \sigma A T_b^4 \quad (3.6)$$

A constante de *Stefan-Boltzman* é representada na equação (3.6) por σ . Um caso especial que ocorre frequentemente é a transferência de calor, por radiação, entre uma superfície com temperatura (T_b) e outra, que a envolve, com uma área muito superior à temperatura (T_s). Nesta situação, a taxa de permuta de energia por radiação entre a superfície mais pequena, cuja área é A e a emissividade é ϵ , e a superfície envolvente é dada por:

$$\dot{Q}_c = \epsilon \sigma A [T_b^4 - T_s^4] \quad (3.7)$$

3.3.2.3 Convecção

A convecção é usualmente compreendida como a transferência de energia entre uma superfície sólida a uma determinada temperatura e um gás ou líquido a uma temperatura distinta. Este fenómeno tem um interesse prático particular uma vez que está presente no funcionamento de vários dispositivos. A

taxa de transferência de energia por convecção de uma superfície para o ar pode ser obtida pela lei de arrefecimento de Newton:

$$\dot{Q}_c = hA(T_b - T_f) \quad (3.8)$$

Esta expressão depende da área da superfície sólida, da diferença de temperaturas entre a superfície (T_b) e o gás ou líquido (T_f) adjacentes e de um factor de proporcionalidade, denominado de coeficiente de transferência de calor (h). O coeficiente de transferência de calor não é uma propriedade termodinâmica, mas sim um parâmetro empírico. Quando ventiladores ou bombas provocam o movimento do fluido (convecção forçada), o valor do coeficiente de transferência de calor é normalmente superior ao verificado em situações nas quais ocorrem movimentos lentos de fluabilidade induzida (convecção natural) (Moran et al., 2014).

3.3.3 Permutadores de Calor

Os permutadores de calor têm inúmeras aplicações a nível doméstico e industrial. Estes dispositivos, utilizados para transferir calor, são bastante utilizados em sistemas de aquecimento e arrefecimento de casas, sistemas automotivos, geração de energia eléctrica e, também, em processos químicos.

Os permutadores de calor não são todos iguais. Para diferentes aplicações existem, também, diferentes dispositivos que podem assumir configurações distintas (Moran et al., 2014). Dois tipos de permutadores muito comuns podem ser categorizados por:

1. Permutadores de contacto directo (ou abertos) que têm uma câmara na qual as correntes quentes e frias se misturam directamente. É o caso dos aquecedores de água de alimentação abertos;
2. Permutadores de placas, nos quais um líquido ou gás é separado de outro líquido ou gás por uma parede pela qual a energia é conduzida. Estes dispositivos, conhecidos como recuperadores de calor, podem assumir diferentes formas, como: configuração de um tubo dentro de outro em paralelo ou em contracorrente, configuração em fluxo cruzado (caso dos radiadores de automóveis) e, também, evaporadores e condensadores de tubos e cobertura, com múltiplas passagens.

3.4 Análise do Ponto de Estrangulamento

Uma técnica bastante aplicada na integração energética é a Análise do Ponto de Estrangulamento (APE), ou *Pinch Analysis*. É uma técnica que se baseia fundamentalmente nas primeiras duas leis da termodinâmica e tem vindo a ser cada vez mais utilizada em processos industriais dada a sua simplicidade de aplicação. O uso desta metodologia tem como propósito a obtenção de uma rede de permutadores de calor (RPC) para processos, de modo a que após a integração energética se atinjam poupanças financeiras, se recupere calor e se reduzam as utilidades externas.

A análise do Ponto de Estrangulamento é composta maioritariamente por duas etapas: uma fase pré-projecto de *targeting*, na qual são estabelecidos objectivos e, posteriormente, uma fase de design, na qual é projectada a rede de permutadores de calor. A obtenção e validação de dados é a primeira

actividade de qualquer análise e, como tal, precede as duas etapas mencionadas. Serve de base para se proceder à integração energética.

Num processo industrial, existem necessidades entálpicas que devem ser satisfeitas, pois as correntes processuais podem precisar de ser aquecidas ou arrefecidas e é nesse sentido que é necessário recorrer a utilidades externas ao processo. Numa primeira abordagem torna-se relevante entender alguns conceitos básicos:

- ✓ **Corrente Fria** - É assim designada quando recebe calor. O calor é-lhe fornecido por um fluido de aquecimento (**utilidade quente**), através de uma permuta directa, uma vez que a sua temperatura necessita de aumentar e/ou porque sofre uma mudança de estado por absorção de calor;
- ✓ **Corrente Quente** – É assim designada quando cede calor. O calor é-lhe retirado por acção de um fluido de arrefecimento (**utilidade fria**), que permuta directamente com a mesma, uma vez que a sua temperatura precisa de diminuir e/ou porque sofre uma mudança de estado por libertação de calor;
- ✓ **Utilidades Externas** – Fluidos exteriores ao processo que trocam calor directamente com as correntes. As utilidades podem ser quentes (vapor de água, fluidos térmicos, gases de combustão, entre outros) ou frias (água de refrigeração, ar atmosférico, fluido de arrefecimento, entre outros);
- ✓ **ΔT_{\min}** – É a diferença mínima de temperatura atingida entre correntes que trocam calor num permutador em contracorrente. É importante que o processo opere com o menor valor de diferença de temperatura, caso contrário a recuperação de calor no permutador diminui e a necessidade de utilidades externas aumenta. A escolha do valor (ΔT_{\min}) tem um impacto nos custos de capital e de energia do processo.

A aplicação desta metodologia de integração energética vai permitir que as correntes deixem de trocar calor exclusivamente com as utilidades exteriores ao processo e passem também a trocar calor entre si. O facto dos excessos entálpicos provenientes das correntes quentes serem fornecidos às correntes frias, que têm um défice de entalpia, vai permitir que haja uma redução no consumo de utilidades externas (Fernandes et al., 2016).

3.4.1 Obtenção de Dados numa APE

A recolha de dados na Análise do Ponto de Estrangulamento é uma actividade que deve ser bastante rigorosa e feita com cautela, de forma a não se sub ou sobrestimar o verdadeiro potencial de poupança energética do processo. É necessário que haja uma extracção de dados apropriada para que os resultados que se desejam obter não sejam comprometidos. Caso assim não seja, corre-se o risco de não haver margem para aumentar a eficiência energética do processo ou de se atingir um potencial de integração que acaba por ser largamente superior ao real, dependendo da forma como a recolha dos dados é feita. O mau dimensionamento do sistema de integração pode, também, comprometer o plano financeiro da empresa.

É, então, necessário identificar não só as necessidades relativas às correntes do processo (de aquecimento, arrefecimento, condensação e vaporização), mas também eventuais limitações

processuais à integração energética e alguma informação que seja relevante para a análise (informação económica e relativa ao sistema de utilidades disponível).

Tanto para as correntes de processo como para as utilidades externas será indispensável obter determinados valores para as seguintes propriedades:

- ✓ Temperatura inicial (T_i);
- ✓ Temperatura final (T_f);
- ✓ Caudal mássico (M);
- ✓ Calor específico médio (C_p);
- ✓ Capacidade calorífica média ($MC_p = M \cdot C_p$);
- ✓ Entalpia de vaporização se ocorrer mudança de fase (ΔH_{vap});
- ✓ Coeficiente de transferência de calor (h).

Note-se que o calor específico (C_p) é um valor médio no intervalo de temperaturas existente e varia com a temperatura. Como tal, caso não seja possível considerá-lo constante, devem utilizar-se vários pequenos intervalos de temperatura nos quais o seu valor possa ser considerado aproximadamente constante, por ser independente da mesma (Relvas et al., 2002).

3.4.2 Targeting

Nesta etapa vão ser definidas metas (*targets*) para o processo de integração. Alguns objectivos aqui estabelecidos são:

- ✓ O consumo mínimo de energia (corresponde ao uso de utilidades externas para aquecimento e arrefecimento);
- ✓ O número mínimo de unidades (permutadores de calor, aquecedores ou refrigeradores);
- ✓ A área mínima total de transferência de calor.

O desenvolvimento destas metas é extremamente importante no sentido em que todas elas vão ter a sua contribuição na minimização do custo total anual, definido pela equação:

$$\text{Custo Total} = \text{Custo Energético} + \text{Custo Equipamento} \quad (3.9)$$

O custo energético é obtido através do consumo mínimo de energia e do custo unitário das utilidades externas utilizadas. O custo de equipamento é o custo associado ao número de unidades de transferência de calor, anualizadas segundo uma taxa de rentabilidade e um período de retorno (Relvas et al., 2002).

Na Análise do Ponto de Estrangulamento, o consumo mínimo de energia pode ser obtido através de duas formas: uma representação gráfica (curvas compostas de calor) ou um algoritmo matemático (cascata de calor). Estas duas formas serão abordadas nas secções 3.4.2.1 (curvas compostas de calor) e 3.4.2.2 (cascata de calor).

3.4.2.1 Curvas Compostas de Calor

As curvas compostas de calor obtêm-se através de uma representação das correntes processuais num gráfico Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) vs Potência Térmica Disponível (kW). Duas curvas são construídas no gráfico, uma para as correntes quentes e outra para as frias. Para se obter cada uma das curvas é necessário dividir o eixo da temperatura em intervalos distintos, limitados pelas temperaturas iniciais e finais das correntes. A capacidade calorífica média (MCp) de cada intervalo é dada pela soma dos MCp individual de cada corrente que pertença a esse intervalo, seja ela quente ou fria. Uma vez construídas, as curvas compostas quente e fria encontram-se simultaneamente representadas sobre o diagrama Temperatura vs Potência Térmica Disponível. A análise das curvas é bastante simples uma vez que todas as necessidades entálpicas do processo são bem detectáveis no diagrama. Sendo assim, através do estudo da representação gráfica final podem ser definidos os seguintes *targets*:

- ✓ O calor recuperado por transferência de calor entre as correntes do processo, correspondente à quantidade máxima de energia que é possível recuperar ($Q_{\text{recuperado}}$);
- ✓ A necessidade mínima de calor a retirar ao processo sob a forma de utilidade fria ($Q_{F,\text{min}}$);
- ✓ A necessidade mínima de calor a fornecer ao processo sob a forma de utilidade quente ($Q_{Q,\text{min}}$);
- ✓ O posicionamento do ponto de estrangulamento que, para um determinado valor de ΔT_{min} , corresponde ao local de maior aproximação das curvas (PE).

A representação gráfica (figura 2), em simultâneo, das curvas compostas quente e fria facilita a análise dos *targets* acima referidos.

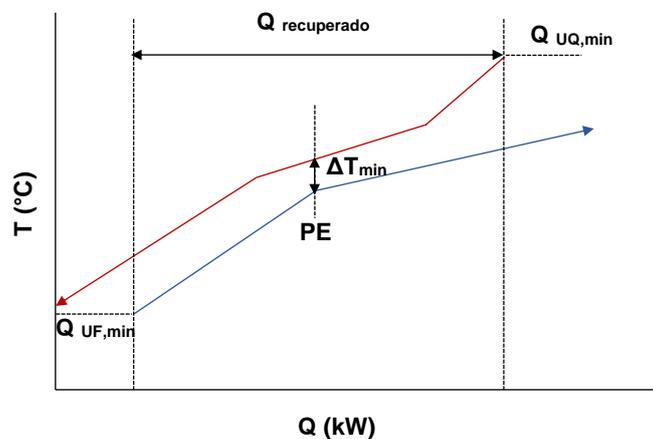


Figura 2 - Curvas compostas (adaptado de Relvas et al., 2002)

Para que a transferência de calor ocorra, é estritamente necessário que a curva composta quente se posicione acima da fria para toda a gama de temperaturas de integração. Existe também a necessidade de se impor um valor ΔT_{min} de forma a assegurar que existe uma força motriz à transferência de calor. O valor de ΔT_{min} varia consoante a posição que a curva composta fria apresenta no diagrama. Quer isto dizer que podem ser feitas deslocações horizontais (ao longo do eixo das abcissas) da mesma, de forma a manipular o valor de ΔT_{min} . Contudo, note-se que a translação deixa de fazer sentido no momento em que para qualquer que seja a temperatura de integração, a curva composta fria deixe de

se posicionar abaixo da quente. A manipulação da diferença mínima de temperaturas permitida entre duas correntes (uma quente e uma fria) é, no fundo, uma análise de sensibilidade feita para se aferir qual o seu valor óptimo. O propósito de existir um critério rigoroso no estabelecimento de um ΔT_{min} está relacionado com o facto de surgirem diferentes vantagens e desvantagens associadas a diferentes valores de ΔT_{min} . No fim, o ΔT_{min} óptimo será sempre aquele que minimiza o custo total anual.

As curvas compostas de calor facilitam a visualização do ponto de estrangulamento (PE) do processo e, como tal, permitem dividi-lo em duas zonas termodinâmicas, a que se encontra acima do PE (à direita do ponto) e a que se encontra abaixo do mesmo (à esquerda do ponto). Na zona acima do PE, as correntes quentes transferem todo o calor disponível para o aquecimento das correntes frias. Qualquer necessidade energética adicional para fins de aquecimento é proveniente de uma utilidade quente, pelo que a zona em questão é designada de absorvedora de calor. Relativamente à zona abaixo do PE, todas as correntes frias vão obter calor por transferência com as correntes quentes do processo. Depois, caso ainda exista energia que esteja em excesso, é retirada por meio de uma utilidade fria. A zona em questão designa-se por fonte de calor.

A utilização das curvas compostas para obter o consumo mínimo de utilidades externas ao processo não é a mais exacta uma vez que tem por base o desenvolvimento de uma representação gráfica. Como tal, a utilização de um algoritmo matemático torna-se mais apropriada nesta etapa de definição das metas (*targets*) (Relvas et al., 2002).

3.4.2.2 Cascata de Calor

A **cascata de calor** é a forma alternativa que existe para determinar os consumos mínimos de utilidades e o posicionamento do ponto de estrangulamento. A este método associa-se o conceito de cascata uma vez que a determinação das metas é realizada através de uma série de balanços entálpicos, entre as correntes processuais, no sentido decrescente da temperatura.

Tal como no desenvolvimento das curvas compostas, inicialmente é necessário dividir o processo em intervalos de temperatura. Para este efeito, são calculadas temperaturas corrigidas (T'), tanto iniciais como finais, para todas as correntes processuais quentes e frias:

$$T'_F = T_{Fria} + \frac{\Delta T_{min}}{2} \quad (3.10)$$

$$T'_Q = T_{Quente} - \frac{\Delta T_{min}}{2} \quad (3.11)$$

Para calcular as temperaturas corrigidas apenas é necessário conhecer as temperaturas reais (iniciais e finais) das correntes e o valor de ΔT_{min} . O cálculo destas temperaturas é importante no algoritmo pois assegura que, para qualquer intervalo de temperatura, a diferença de temperaturas das correntes quentes e frias seja sempre, pelo menos, de ΔT_{min} . Desta forma, a transferência de calor entre correntes nos permutadores torna-se possível para diferenças nulas em temperaturas corrigidas.

Seguidamente, efectuam-se balanços de energia para cada intervalo de temperatura corrigida. O balanço energético associado a cada intervalo de temperaturas pode ser obtido através da seguinte equação:

$$Q_i = \left[\sum_{C. Frias} MCp_F - \sum_{C. Quentes} MCp_Q \right] \Delta T'_i \quad (3.12)$$

Para cada intervalo existe, naturalmente, uma diferença de temperaturas corrigidas ($\Delta T'_i$). Através da interpretação da equação, é possível aferir que é a variação da capacidade calorífica média do intervalo que determina se o balanço energético (Q_i) é positivo ou negativo. O resultado em questão encontra-se de acordo com a convenção termodinâmica, ou seja, as reacções endotérmicas e exotérmicas estão associadas variações entálpicas positivas e negativas, respectivamente. Nesse sentido, o balanço energético ser positivo num determinado intervalo ($Q_i > 0$) deriva do facto de existir um défice de calor no mesmo, ou seja, as correntes frias “predominam” sobre as correntes quentes. Por outro lado, caso as correntes quentes “predominem” sobre as frias, existe excesso de calor no intervalo e o balanço energético é negativo ($Q_i < 0$).

Por fim, determina-se a cascata de calor recorrendo à construção de uma tabela. A primeira coluna (coluna 1) desta tabela deve conter as temperaturas corrigidas por ordem decrescente, de forma a definir os intervalos. A segunda coluna (coluna 2) deve ilustrar esquematicamente as correntes do processo. A sua representação identifica quais os intervalos por onde as correntes processuais passam, quais as suas temperaturas corrigidas iniciais e finais e qual o valor de MCp de cada uma delas. As duas colunas seguintes (colunas 3 e 4) são factores para a aplicação da expressão matemática que obtém o balanço energético (coluna 5). Nesse sentido, a terceira coluna corresponde à diferença de temperaturas corrigidas ($\Delta T'_i$) e a quarta à variação da capacidade calorífica média (ΔMCp) dos intervalos. Após se obterem os valores da variação do balanço energético ΔQ_i , constrói-se a cascata de calor, tendo em conta que o excesso de calor num intervalo i pode suprimir/diminuir défices existentes no intervalo seguinte $i + 1$. A cascata de calor, correspondente às últimas colunas da tabela é obtida através da seguinte forma:

1. Inicialmente, considera-se que não é fornecida ao processo nenhuma quantidade de calor externa ($Q_{UQ} = 0$). O valor de cada intervalo i na coluna 6 é obtido através da subtração do valor de $i - 1$, referente à coluna 5, ao mesmo;
2. Não é possível transferir calor de níveis térmicos superiores para inferiores quando os primeiros têm défice de energia. Como tal, os valores de entalpia acumulados negativos da coluna 6 devem ser eliminados através da construção de uma nova cascata;
3. Desta vez, para o cálculo da cascata de calor definitiva, já se deve considerar que o processo vai receber calor proveniente do exterior sob a forma de utilidade quente, sendo este igual, em valor absoluto, ao valor mínimo da coluna 6. O procedimento de construção da cascata definitiva é, depois, semelhante ao encontrado na coluna 6.

Após a tabela estar completamente preenchida e a cascata de calor estar construída, a interpretação e recolha de dados das mesmas é extremamente prática e simples. O ponto de estrangulamento (PE) está associado à temperatura corrigida para a qual não existe transferência de calor entre níveis térmicos. Note-se, contudo, que para se obter o ponto de estrangulamento referente às correntes, ao valor da temperatura corrigida em questão deve somar-se ou subtrair-se metade do valor de ΔT_{\min} , consoante elas sejam quentes ou frias, respectivamente. O consumo mínimo de utilidades pode ser observado nos extremos da cascata de calor definitiva. O último nível térmico indica o excesso de entalpia que deve ser removido por uma utilidade fria (quantidade mínima de calor a retirar ao processo). O calor que foi fornecido através da introdução de uma utilidade quente, no início da construção da cascata definitiva, corresponde ao valor mínimo que é necessário ao funcionamento do processo (quantidade mínima de calor a fornecer ao processo) (Relvas et al., 2002).

3.4.3 Design

O *Pinch Design Method* ganhou alguma popularidade dada a sua simplicidade e capacidade de lidar com complexidade. O método evoluiu para um conjunto de ferramentas úteis para recuperação de calor e técnicas de design para eficiência energética (Linnhoff and Hindmarsh, 1983).

Nem sempre é conveniente representar uma rede de permutadores de calor através de um diagrama de fluxos geral de processo. O facto deste diagrama não conseguir identificar a localização do ponto de estrangulamento, o grau de recuperação de calor e a necessidade de aquecimento e arrefecimento provenientes de utilidades externas, torna-o menos atractivo. Nesse sentido, o diagrama de fluxos convencional veio colmatar esses problemas. O diagrama apenas apresenta as operações de transferência de calor e baseia-se na simples convenção de que as correntes quentes seguem na vertical e as frias na horizontal. Embora a localização do ponto de estrangulamento possa ser representada em casos mais simples, acaba sempre por ser complicado identificá-la. Esta representação dificulta ainda o sequenciamento natural dos permutadores de calor e a apresentação clara das temperaturas envolvidas na rede.

Uma forma conveniente de representar redes de permutadores de calor, eliminando os problemas descritos acima, é através da utilização de uma rede MER (*Minimum Energy Requirement* ou *Maximum Energy Recovery*). Este diagrama (figura 3), quando comparado com os outros, apresenta várias vantagens, como: uma representação mais clara das correntes e dos permutadores de calor, uma maior conveniência na representação das temperaturas e maior facilidade na identificação do ponto de estrangulamento. Tal como o diagrama convencional, a rede MER apenas apresenta operações de transferência de calor (Klemeš et al., 2011).

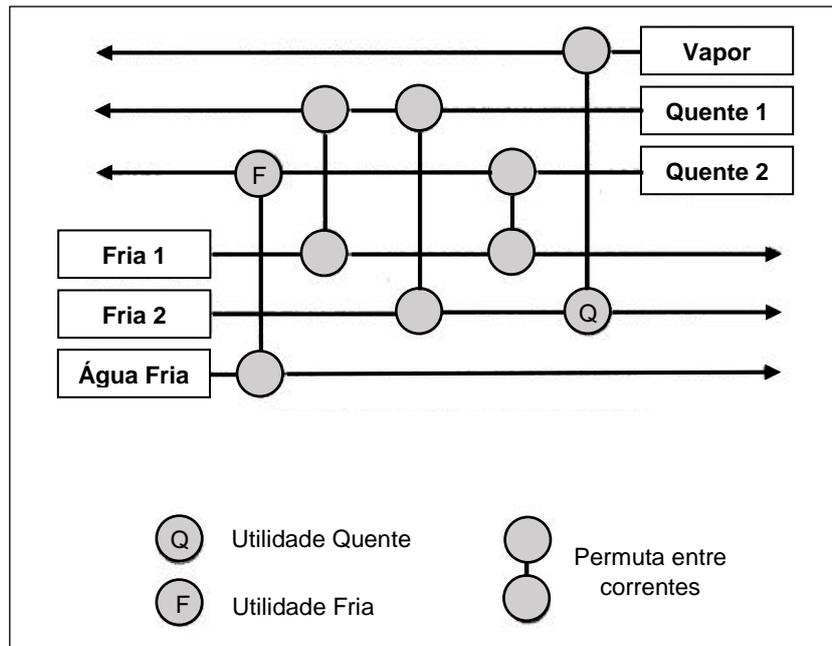


Figura 3 - Representação de uma rede de permutadores de calor através de uma rede MER (adaptado de Klemeš et al., 2011)

3.4.3.1 Determinação da Rede de Permutadores de Calor que Corresponde às Necessidades Mínimas de Energia

Numa rede MER, a representação das correntes quentes e frias é feita recorrendo a setas. O sentido das correntes quentes e frias têm sentidos opostos e, em conformidade com as curvas compostas, a temperatura aumenta da esquerda para a direita, sendo que a temperatura do ponto de estrangulamento é representada precisamente no meio das setas (correntes).

A obtenção da rede MER deve ter início em torno do ponto de estrangulamento (a parte mais restrita do design dada as diferenças de temperatura se aproximarem de ΔT_{\min}) e prosseguir com o estabelecimento de trocas de calor à medida que nos afastamos do mesmo. Quando se estabelecem as permutas de calor devem ser consideradas as seguintes regras:

1. Nenhum permutador pode ter uma diferença de temperatura inferior a ΔT_{\min} ;
2. Nenhuma troca de calor pode ser feita através do ponto de estrangulamento;
3. As utilidades não devem ser usadas inapropriadamente (não se devem usar utilidades frias na zona acima do PE nem utilidades quentes na zona abaixo).

Na zona acima do ponto de estrangulamento, as correntes quentes devem ser arrefecidas apenas por transferência de calor para correntes frias, não através de utilidades frias. Assim, todas as correntes quentes acima do ponto de estrangulamento devem trocar calor com correntes frias. Existe, portanto, uma prioridade por parte das correntes quentes quando as trocas são feitas acima do ponto de estrangulamento. Contrariamente, as correntes frias têm prioridade quando as trocas são feitas na zona abaixo do ponto de estrangulamento.

Existem ainda outras duas condições que têm obrigatoriamente de ser satisfeitas para que possa, efectivamente, existir troca de calor entre correntes. Nesse sentido, para duas correntes poderem trocar calor na zona acima do PE, o número de correntes quentes tem de ser igual ou inferior ao número de correntes frias. É, também, necessário que a capacidade calorífica média (MCp) da corrente quente seja igual ou inferior à da corrente fria com a qual pretende permutar calor.

$$N_{\text{correntes quentes}} \leq N_{\text{correntes frias}} \quad (3.13)$$

$$MCp_{\text{corrente quente}} \leq MCp_{\text{corrente fria}} \quad (3.14)$$

O mesmo é válido para duas correntes permutarem calor na zona abaixo do PE. O número de correntes frias tem de ser igual ou inferior ao número de correntes quentes e a capacidade calorífica média (MCp) da corrente fria deve ser igual ou inferior à da corrente quente com a qual pretende permutar calor.

$$N_{\text{correntes frias}} \leq N_{\text{correntes quentes}} \quad (3.15)$$

$$MCp_{\text{corrente fria}} \leq MCp_{\text{corrente quente}} \quad (3.16)$$

Após todos os cálculos serem efectuados e as necessidades das correntes serem satisfeitas, a rede MER é obtida, apresentando uma solução óptima em termos energéticos. Contudo, na grande maioria dos casos, não se encontra otimizada no que diz respeito aos custos totais. Este problema pode ser solucionado através de uma abordagem denominada de evolução da rede MER, onde esta é otimizada de forma a se conseguir obter a melhor rede de permutadores de calor.

3.5 Processos Contínuos e Descontínuos

O processo de produção a que uma indústria recorre para conceber os seus produtos finais varia consoante as necessidades e características da mesma. Nesse sentido, a indústria pode optar por produzir em contínuo ou em descontínuo (lotes). A distinção destes dois tipos de processo nem sempre é clara, no sentido em que muitas vezes grandes unidades industriais contínuas incluem unidades singulares que operam em descontínuo. Todavia, se numa unidade industrial com elevadas taxas de produção existir apenas uma ou duas operações descontínuas, o processo é considerado contínuo. Da mesma forma, muitos processos *batch* (descontínuos) contêm uma ou duas unidades que funcionam continuamente.

Processos contínuos são geralmente utilizados quando a produção anual é muito elevada, como por exemplo nas indústrias pesadas (de grande escala, como as petroquímicas), e são caracterizados por ter todas as suas operações a funcionar 24 horas em cada dia da semana. A unidade industrial funciona constantemente ao longo de quase todo o ano, sendo apenas interrompida para a manutenção anual do equipamento. Pode, também, ser necessário interromper a produção, caso haja uma avaria inesperada de equipamento ou existam outros problemas comprometedores para o processo (Douglas, 1988).

Por outro lado, os processos descontínuos têm as suas principais fases da produção a operar de forma descontínua. Quer-se com isto dizer que algumas propriedades variam com o tempo, como por exemplo o calor, a temperatura, a concentração e a massa dos fluxos envolvidos nos processos. A grande maioria deste tipo de processos são compostos por fases descontínuas e outras semicontínuas. As fases que são semicontínuas operam continuamente, todavia o seu funcionamento é programado para ter interrupções periódicas.

As prioridades neste tipo de processos são, regularmente, bem diferentes das associadas aos processos contínuos, que visam produzir em massa. Por exemplo, no fabrico de químicos a principal preocupação é colocar o produto final no mercado o mais rápido possível enquanto, paralelamente, o processo cumpre todos os requisitos de segurança necessários e a qualidade do produto não é afetada (Smith, 2005). Já no caso da indústria alimentar, Bon et al. 2010 refere que para se aumentar a produtividade, satisfazer as necessidades dos clientes e cumprir com todas as regulações, as empresas não só têm de maximizar a qualidade dos seus produtos, como também de minimizar os consumos energéticos e o impacto negativo no ambiente.

3.6 Processos Descontínuos: Quando Utilizá-los?

Os processos descontínuos oferecem à unidade industrial a capacidade de desenvolver diferentes produtos que partilhem os mesmos recursos (equipamento auxiliar, electricidade, matéria prima, mão de obra, utilidades, etc.) ao longo do tempo. Esta característica permite que haja uma maior flexibilidade operacional, o que faz com que este tipo de processo seja mais vantajoso quando a procura de mercado muda rapidamente, ou quando é necessário produzir em pouca quantidade.

Algumas indústrias (farmacêuticas, de polímeros, alimentar e as químicas), quando comparadas a outras, obtêm um maior benefício em utilizar este tipo de processos, dada a sua facilidade e flexibilidade em produzir pequenas quantidades de produtos de elevado valor. Uma outra característica interessante destes processos é que os equipamentos utilizados podem servir para diferentes fins. Por exemplo, uma unidade de processo pode também ser uma unidade de armazenamento do produto (Fernández et al., 2012).

É importante perceber quais as condições que favorecem a utilização de processos descontínuos e em que situações eles são mais vantajosos em relação a processos contínuos. Douglas 1988 refere que as taxas de produção, as forças de mercado e os problemas operacionais associados à própria indústria são bons exemplos de indicadores que favorecem a utilização de um processo descontínuo em relação a um processo contínuo. Estes indicadores especificam-se da seguinte forma:

1. Taxas de produção

- ✓ Unidades industriais com capacidade superior a 5000 toneladas anuais são, geralmente, contínuas;
- ✓ Unidades industriais com capacidade inferior a 500 toneladas anuais são, normalmente, descontínuas;
- ✓ Processos descontínuos são muito comuns quando uma grande variedade de produtos é produzida essencialmente no mesmo equipamento de processamento.

2. Forças de mercado

- ✓ Unidades descontínuas são preferidas para produtos cuja procura é sazonal, uma vez que uma unidade contínua incorre em elevados custos de inventário para os armazenar nos meses em que o produto não é vendido. Assim, nos restantes meses do ano, a unidade descontínua pode servir para produzir outros produtos, reduzindo significativamente os custos de inventário;
- ✓ Processos contínuos demoram cerca de três anos a serem construídos e alguns produtos têm ciclos de vida inferiores a esse espaço de tempo. Nesse sentido, a maior flexibilidade das unidades descontínuas torna-as mais favoráveis para produtos com um ciclo de vida curto.

3. Problemas operacionais

- ✓ Algumas reacções são muito lentas, pelo que a única alternativa sustentável é utilizar processos descontínuos;
- ✓ Alguns materiais sujam o equipamento com muita facilidade. Como tal, o equipamento tem de ser frequentemente limpo, pelo que as operações estão sujeitas a interrupções periódicas. A utilização de processos descontínuos é uma boa solução para este problema pois o funcionamento do equipamento pode ser interrompido e limpo após a produção de cada lote.

3.7 Integração Energética em Processos Descontínuos

A *Pinch Analysis* convencional, mencionada no capítulo 3.4, já provou ter excelentes resultados a nível de integração energética em processos contínuos. A realidade é que em processos não contínuos e nos quais as propriedades assumem taxas variáveis, a integração energética pode ser mais complicada. Deve-se ao facto de as fontes e os receptores de calor tenderem a estar disponíveis em intervalos de tempo diferentes. Neste caso, serão necessários métodos e modelos matemáticos diferentes para a integração energética ser atingida, uma vez que a recuperação de calor depende da temperatura e do tempo. Uma vez que estes processos estão dependentes do tempo, é importante ter toda a produção bem calendarizada e definida, de forma a poder existir eficiência económica. A calendarização é uma ordem sequencial das várias operações de produção. No fundo, define a sequência pela qual cada operação é realizada, bem como os intervalos de tempo em que a mesma se insere. Calendarizar é, de facto, relevante quando se fala em integração energética e representa uma ferramenta muito útil na diminuição do consumo de energia em processos descontínuos (Fernández et al., 2012).

Num processo descontínuo, a integração energética pode assumir um modo directo ou indirecto, dependendo da forma como o calor é permutado entre as correntes processuais. Verifica-se a existência de integração energética directa quando, em qualquer intervalo de tempo específico, as correntes processuais trocam calor directamente (Figura 4). Para este modo de recuperação de calor, deve ser especificada uma diferença mínima de temperatura (ΔT_{\min}) (Chaturvedi and Bandyopadhyay, 2014).

Este modo de recuperação de calor requer condições de calendarização bem rigorosas, de forma a garantir que o produto tem qualidade e que haja eficiência energética (Fernández et al., 2012).

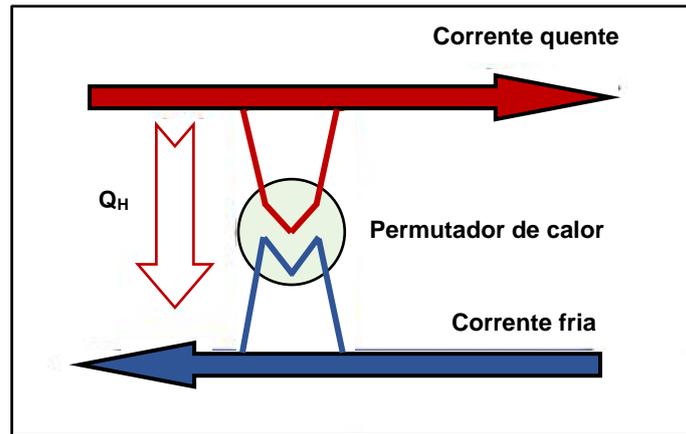


Figura 4 - Integração energética directa (adaptado de Fernández et al. 2012)

Por outro lado, a troca indirecta de calor torna-se muito complicada quando é necessário transferir calor de um intervalo de tempo para outro. Nestas condições, o calor das correntes quentes é transferido para um fluido transportador de calor (*heat transfer medium*) que é depois aquecido e armazenado até ser conduzido para as correntes frias, que existem em intervalos de tempo distintos (Figura 5). Nesta abordagem, a troca de calor entre correntes que não coexistem no tempo é menos limitada, o que torna este método menos sensível em termos de calendarização.

A abordagem à diferença mínima de temperatura entre correntes processuais frias e quentes depende do modo como o calor é transferido de umas para as outras. Se numa transferência directa de calor a diferença mínima de temperatura a especificar para que haja troca de calor em tempo útil é (ΔT_{\min}), numa permuta indirecta, é necessário um (ΔT_{\min}) extra. Para o transporte de calor entre dois intervalos de tempo ser possível, a diferença mínima de temperatura deve ser duplicada ($2\Delta T_{\min}$) devido à intervenção de um fluido intermediário (Chaturvedi and Bandyopadhyay, 2014).

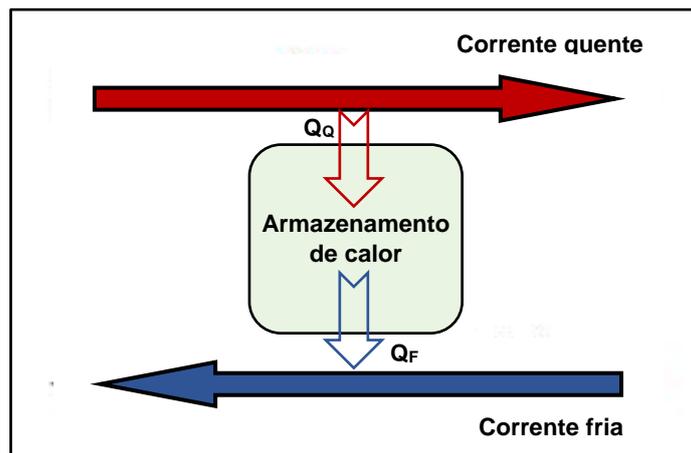


Figura 5 - Integração energética indirecta (adaptado de Fernández et al. 2012)

3.8 Diagramas de Gantt

Clark 1922 explica em que medida os Gantt *charts* (diagramas de Gantt) vieram ajudar o gestor a melhorar o serviço prestado aos clientes. Clark 1922 refere que o uso dos diagramas permite ao gestor o cumprimento das suas promessas em termos de calendário. Permite, também, que se concentre em ultrapassar obstáculos, que consiga evitar atrasos e ainda que, no caso de não ser possível cumprir o prometido, o cliente possa ser informado com antecedência.

Os diagramas de Gantt funcionam como calendários de actividades na forma de diagramas e são também muito utilizados em gestão de projectos. A sua fácil compreensão, associada à sua simplicidade, ajuda o gestor a perceber o progresso das actividades do projecto, relativamente ao que tinha sido planeado. Contudo, na altura em que surgiram, funcionavam como uma ferramenta de planeamento de produção, utilizada para planear e gerir a produção em processos descontínuos. Nesse sentido, eram muito úteis na gestão da utilização do equipamento e dos trabalhadores. Os diagramas de registos de trabalhadores serviam para comparar os resultados que cada trabalhador atingia, a cada dia, com os resultados que deveriam ter obtido. De uma forma semelhante, os diagramas de registos de equipamento pretendiam mostrar se o equipamento estava a ser utilizado na sua máxima capacidade.

A utilidade dos diagramas de Gantt para calendarizar a produção é evidente, quer estes sejam desenvolvidos manualmente, quer por um algoritmo ou heurística. Apresentam informações muito úteis que facilitam a comunicação entre os analistas e os utilizadores, uma vez que indicam: as tarefas a desempenhar, quando e por quanto tempo devem ser desempenhadas, o equipamento utilizado especificamente para cada tarefa e onde ocorrem os períodos de inatividade do mesmo (Wilson, 2003). Até nos processos descontínuos mais simples, o uso de um diagrama de Gantt (Figura 6) é extremamente útil. Através do mesmo, é possível verificar que, quase sempre, existe uma fraca utilização do equipamento. Quer isto dizer que existem vários momentos em que o equipamento está inativo, por vezes denominados de tempos mortos.

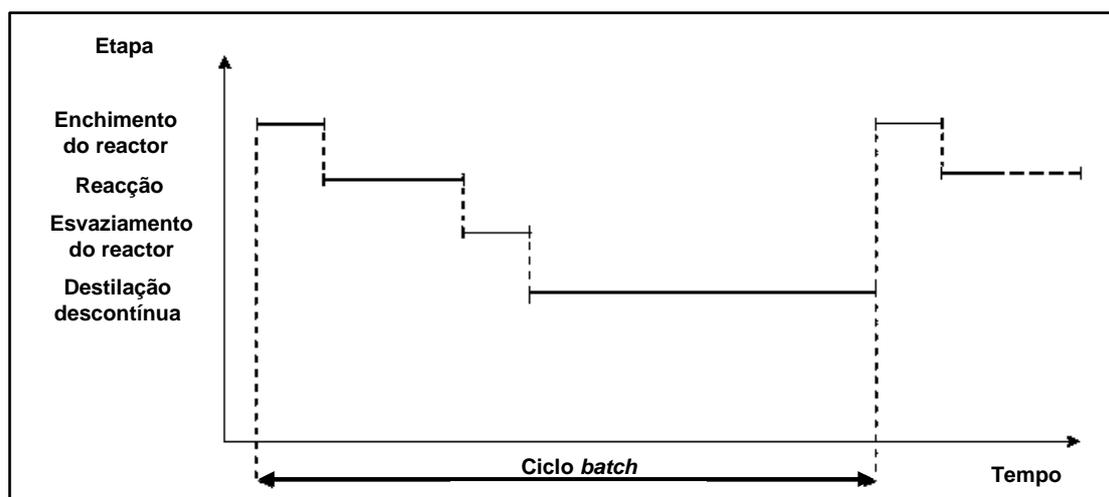


Figura 6 - Diagrama de Gantt para um processo descontínuo simples (adaptado de Smith, 2005)

Um dos objectivos dos processos descontínuos é precisamente que exista uma elevada utilização do equipamento. Se algumas unidades do processo de produção de um lote já se encontram inativas, nomeadamente as iniciais, não é necessário aguardar que este acabe de ser produzido para que a produção de outro comece. Esta forma de atingir maiores taxas de utilização do equipamento é designada de sobreposição de lotes, no sentido em que mais do que um lote, em diferentes fases, coexiste no processo em qualquer momento.

A sobreposição de lotes, representada na Figura 7, vai permitir que o tempo em que ocorre cada ciclo *batch* reduza consideravelmente, isto é, o intervalo de tempo entre lotes consecutivos será menor. Assim sendo, o tempo de ocorrência de um ciclo *batch* é pelo menos igual à duração da fase mais longa do processo (Smith, 2005).

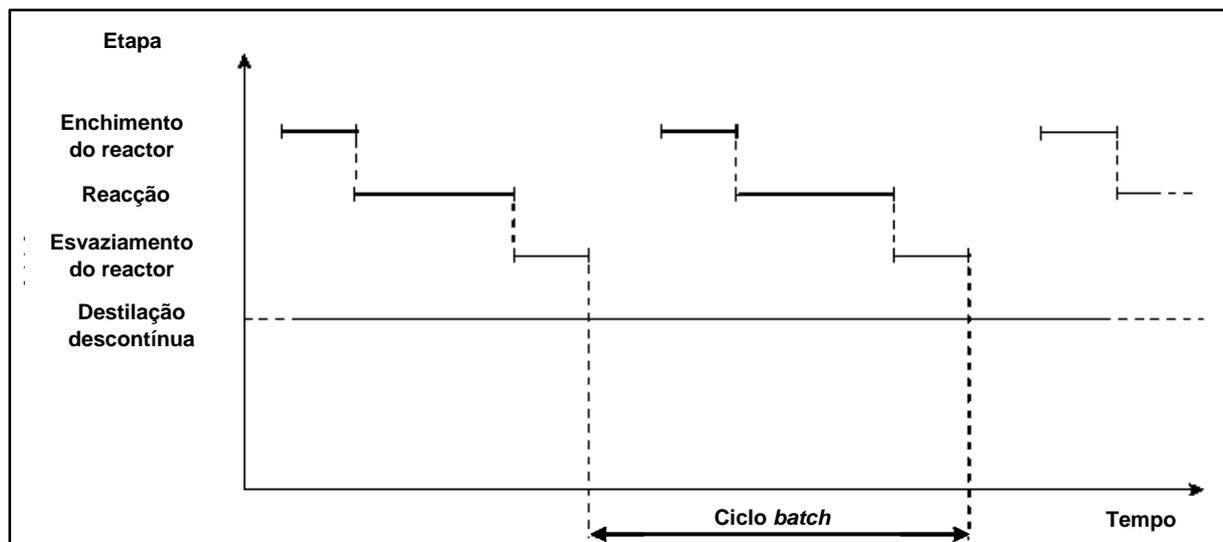


Figura 7 - Sobreposição de lotes num processo descontínuo simples (adaptado de Smith, 2005)

3.9 Melhores Técnicas Disponíveis (*Best Available Techniques, BAT*)

As Melhores Técnicas Disponíveis (*Best Available Techniques, BAT*) correspondem a tecnologias e medidas organizacionais, disponíveis a um preço aceitável, cujo objectivo é minimizar o impacto ambiental (An Derden et al., 2002).

O sector alimentar e de bebidas é composto por um número elevado de diferentes subsectores. Esta característica faz dele um sector heterogéneo, com centenas de processos aplicados em todo o sector industrial. As questões ambientais e a quantidade de desperdício gerada variam consoante os subsectores individuais, os processos e as matérias primas utilizadas. Sendo assim, torna-se complicado determinar BAT específicas para todos os processos aplicáveis neste sector industrial.

Algumas técnicas foram determinadas e denominadas como BAT gerais, uma vez que existe a possibilidade da sua aplicação à grande maioria das operações industriais. Para além destas, existem ainda certas BAT que apenas se aplicam a determinados processos individuais e a operações específicas de certos subsectores (European Commission, 2006).

3.9.1 BAT Gerais para Todo o Sector Alimentar e de Bebidas

Nesta secção são apresentadas as técnicas gerais que são utilizadas de forma regular na globalidade do sector alimentar e de bebidas, independentemente dos processos usados ou dos produtos produzidos.

De acordo com a European Commission 2006, para todas as instalações pertencentes ao sector alimentar e de bebidas, as BAT referem-se a:

1. Assegurar que os funcionários estão cientes dos aspectos ambientais das operações da empresa e das suas responsabilidades pessoais (através de treino, por exemplo);
2. Seleccionar equipamento que optimize o consumo e os níveis de emissões gasosas e que facilite as operações e a sua manutenção;
3. Controlar as emissões sonoras de equipamentos ruidosos através do melhor design, selecção, operação e manutenção dos mesmos;
4. Operar programas regulares de manutenção;
5. Aplicar e manter uma metodologia de prevenção e minimização do consumo de água e energia;
6. Implementar um sistema para monitorizar e rever o consumo e os níveis de emissões gasosas, tanto para os processos de produção individuais como os da unidade industrial, de forma a permitir uma optimização dos níveis de desempenho;
7. Manter a precisão do inventário de entradas (*inputs*) e de saídas (*outputs*) em todas as fases do processo, desde a recepção das matérias primas ao despacho de produtos;
8. Planear a produção de forma a minimizar eventuais desperdícios e frequências de limpeza;
9. Transportar matérias primas solidas do sector, produtos, produtos secundários e resíduos secos;
10. Minimizar os tempos de armazenamento para materiais perecíveis;
11. Segregar saídas (*outputs*), para optimizar o uso, reutilização, recuperação, reciclagem e disposição (e minimizar a contaminação de água residual);
12. Prevenir a queda de matérias para o chão;
13. Optimizar a segregação de correntes de água para optimizar a reutilização e o tratamento;
14. Coleccionar correntes de água separadamente, como água condensada e de arrefecimento para optimizar a reutilização;
15. Evitar a utilização de mais energia do que a necessária para aquecer e arrefecer os processos, de forma a que o produto não seja afectado;
16. Investir em bons serviços de limpeza;
17. Minimizar a poluição sonora proveniente dos veículos;
18. Aplicar métodos de armazenamento e manuseio. Podem ser solicitados controlos adicionais para fornecer e manter os padrões de higiene e segurança alimentar requeridos;
19. Optimizar a aplicação e o uso de controlos de processo para prevenir e minimizar o consumo de água e energia e para minimizar a geração de resíduos;
20. Utilizar controlos automáticos de *start and stop* para fornecer água ao processo apenas quando esta é necessária;
21. Seleccionar matérias primas e materiais auxiliares que minimizem a geração de resíduos sólidos e de emissões gasosas prejudiciais para o ar e para a água.

4 Revisão de Ferramentas para a Modelação de Cargas Térmicas

Neste capítulo são apresentadas as ferramentas disponíveis para a modelação de cargas térmicas, existindo um foco preferencial nas que permitem avaliar cargas dinâmicas, isto é, processos descontínuos. De igual forma, são expostos dois exemplos práticos da aplicação de duas ferramentas na indústria, o GREENFOODS branch concept e o PinCH 3.0.

4.1 Perspetiva geral das Ferramentas Disponíveis

A integração de processos, a modelação e a optimização de problemas em engenharia química e industrial são, na maioria dos casos, tarefas complexas e demoradas, que requerem grande processamento de dados. A utilização de *softwares*, programados especificamente para estas áreas de investigação, são essenciais para a obtenção de novas soluções de uma forma menos demorada (Hon Loong Lam et al., 2011).

Klemeš et al. 2011 fizeram uma revisão de vários *softwares* disponíveis para a simulação de balanços de energia e de massa de unidades de processos químicos. A revisão inclui ferramentas de *software* com propósitos específicos diferentes que, como tal, se inserem em categorias distintas. Segundo os autores, estão disponíveis às empresas vários *softwares* que servem como boas ferramentas para:

1. Integração de processos ([SPRINT](#), [STAR](#), [WORK](#), [WATER](#), [HEXTRAN](#) e [SuperTarget](#));
2. Simulação de balanços energéticos e de diagramas de operações ([Aspen Plus](#), [HYSYS](#), [UniSim Design](#), [gPROMS](#), [CHEMCAD](#) e [PRO/II](#));
3. Optimização geral e síntese de processos ([GAMS](#), [LINDO API](#), [Frontline Systems](#), [MATLAB](#), [SCILAB](#) e [OCTAVE](#));
4. Aproveitamento energético e redução da poluição ([PNS](#)).

Também a principal organização canadiana de pesquisa e tecnologia na área das energias renováveis, CanmetEnergy, tem realizado um excelente trabalho no âmbito da integração energética. De forma a responder à elevada procura por ferramentas computacionais na área em questão, a CanmetEnergy desenvolveu o [INTEGRATION](#), um *software* que representa uma solução prática e economicamente viável. Esta ferramenta tem como objectivo optimizar a recuperação de energia e reduzir o consumo de energia térmica em unidades industriais (Canada, 2015).

A associação independente de pesquisa austríaca AEE – *Institute for Sustainable Technologies* (AEE INTEC) é um dos principais institutos de pesquisa aplicada nas áreas de energia térmica solar e eficiência energética na indústria nacional (Áustria) e internacional. Tendo reconhecido a necessidade de integração de ferramentas tecnológicas de energia renovável na indústria, a AEE INTEC desenvolveu o *pinch software* [SOCO](#), uma ferramenta útil para a implementação de armazenamento de energia térmica sob a forma de calor.

Em 2012, no âmbito do seu programa *Intelligent Energy – Europe* (IEE), a Comissão Europeia iniciou o projecto GREENFOODS (GF) de modo a promover a eficiência energética e a integração de energias renováveis na indústria alimentar e de bebidas. No seguimento de projectos anteriores e auditorias energéticas feitas a par com o projecto GF, surgiu o [GREENFOODS branch concept](#). O

desenvolvimento desta ferramenta teve como objectivo permitir que o utilizador identificasse novas soluções no que diz respeito à eficiência energética e à integração de energias renováveis na indústria alimentar e de bebidas (Fluch et al., 2017).

Petrides et al. 2014 fizeram, também, uma revisão das ferramentas utilizadas para a modelação e calendarização de unidades descontínuas que produzam mais do que um produto. Segundo os autores, dependendo da especificidade de aplicação, as ferramentas enquadram-se nas seguintes categorias:

- ✓ Ferramentas de folha de cálculo;
- ✓ Ferramentas de simulação de processos *batch* ([BATCHES](#) e [Aspen Batch Process Developer](#));
- ✓ Ferramentas de simulação de eventos discretos ([ProModel](#), [Arena](#) e [ExtendSim](#));
- ✓ Ferramentas de optimização matemática ([SAP APO](#), [IBM ILOG Plant PowerOps](#) e [Aspen Plant Scheduler Family](#));
- ✓ Ferramentas de calendarização ([Preactor Express](#), [Orchestrate](#)).

Existe ainda uma outra ferramenta computacional que permite aumentar a eficiência energética nas indústrias de processos, denominada [PinCH](#). A nova versão 3.0 do *software* PinCH, desenvolvido na faculdade de engenharia e arquitectura da universidade de Lucerna, acrescenta às suas versões anteriores (1.0, 1.5 e 2.0) o suporte na análise de processos, dependentes do tempo, que requeiram armazenamento de calor térmico (“PinCH An analysis and design tool for process integration,” 2017). Estas ferramentas informáticas têm vindo a ser bastante utilizadas na simulação, integração e optimização de processos industriais, uma vez que as empresas tiram grande proveito do uso das mesmas. As principais funções dos *softwares* específicos na indústria de processos são:

- ✓ A modelação de unidades de processo, que é particularmente importante para modelar sistemas que ainda não existam;
- ✓ O design ou reconversão/modernização de complexos industriais;
- ✓ Prever os custos de capital investido e o tempo de retorno no investimento;
- ✓ Prever e acompanhar as emissões de gases de efeito de estufa;
- ✓ Avaliar opções de optimização e integração.

O desenvolvimento das tecnologias na sociedade tem um grande impacto na expansão dos *softwares* disponíveis. Na área em questão, os criadores de *softwares* não variam muito dada a especificidade dos programas. Sendo assim, é frequente que quem os desenvolva sejam, ou os departamentos de investigação das universidades e instituições académicas, ou as pequenas empresas de alta tecnologia, ou os líderes de mercado, como as empresas de software GAMS Corporation e a Aspen Technology, por exemplo (Hon Loong Lam et al., 2011).

4.2 Ferramentas Existentes para a Modelação de Cargas Térmicas Dinâmicas

As ferramentas utilizadas na indústria de processos nem sempre correspondem a aplicações informáticas que apenas necessitam de processar os dados, introduzidos pelo utilizador, para reproduzir um conjunto de resultados. Existem certas ferramentas cujo propósito é auxiliar o utilizador na modelação de problemas, ou seja, linguagens de programação que, no fundo, resolvem equações

introduzidas pelo utilizador, tendo em consideração os parâmetros especificados pelo mesmo (Hon Loong Lam et al., 2011).

Na secção 4.1 foram enumeradas várias ferramentas informáticas existentes para a modelação de cargas térmicas e armazenamento térmico na indústria. Contudo, nem todas as que foram mencionadas têm condições ou características que lhes permitam ser aplicadas a processos descontínuos. Sendo assim, a secção 4.2 tem como objectivo apresentar e descrever, detalhadamente, as ferramentas que apresentem essa particularidade. É, ainda, feita uma distinção das ferramentas consoante sejam linguagens de programação ou aplicações informáticas.

4.2.1 Linguagens de Programação

Esta secção dedica-se à exposição das ferramentas que não têm uma interface gráfica, mas sim uma interface de linha de comando. O gPROMS e o CHEMCAD são as linguagens de programação abordadas nas subsecções 4.2.1.1 e 4.2.1.2, respectivamente.

4.2.1.1 gPROMS

O [gPROMS](#) é uma ferramenta que, como referido no capítulo anterior, se enquadra na categoria de softwares disponíveis para simulação de balanços energéticos e de diagramas de operações. Fornece à indústria de processos uma boa capacidade de modelação avançada na simulação de diagramas de fluxos, utilizando uma linguagem de programação orientada a objectos. Sendo um programa próprio para o desenvolvimento de diagramas, o utilizador pode otimizar variadas unidades singulares do processo. É capaz de avaliar todas as fases do ciclo de vida do processo, desde as experimentações laboratoriais ao design do mesmo, por exemplo.

De uma forma sintetizada, o gPROMS é um sistema de modelação que recorre a equações para desenvolver, validar e executar modelos de diagramas de operações processuais (Klemeš et al., 2011). Esta ferramenta é muito utilizada para a modelação e optimização de unidades industriais com produção em lotes devido ao carácter dinâmico destes sistemas (Hon Loong Lam et al., 2011).

4.2.1.2 CHEMCAD

O [CHEMCAD](#) enquadra-se na mesma categoria do gPROMS e é uma ferramenta para a simulação de processos químicos que inclui bibliotecas de componentes químicas, métodos termodinâmicos e unidades de operações. O seu propósito é facilitar a simulação de processos químicos contínuos em estado estacionário. Contudo, o software foi melhorado de forma a permitir análises de diagramas de fluxos com carácter dinâmico. Assim, os modelos para unidades de operação não padronizadas simulam o comportamento do processo em condições de variação dos caudais de alimentação de matérias-primas e de saída de produtos, das temperaturas, das pressões e das composições das correntes ao longo do tempo. O programa tem sido aplicado eficientemente como um simulador que previne a poluição e inclui módulos adicionais, nos quais se inclui o CHEMCAD-BATCH para a simulação de processos de destilação *batch* (Klemeš et al., 2011).

4.2.2 Aplicações Informáticas

Nesta segunda subdivisão da secção 4.2 são apresentadas as ferramentas cuja interface do utilizador é gráfica, ou seja, as aplicações informáticas (*softwares*). Na modelação de cargas dinâmicas destacam-se as seguintes aplicações informáticas: SOCO (4.2.2.1), PinCH (4.2.2.2), GREENFOODS branch concept (4.2.2.3), BATCHES e Aspen Batch Process Developer (ambas em 4.2.2.4).

4.2.2.1 SOCO

O *software* [SOCO](#) (*Storage Optimisation Concepts*) é uma ferramenta programada especificamente para a integração energética, com sistemas inteligentes de armazenamento de energia, de processos industriais. O programa permite conceber e implementar medidas para a redução do consumo de energia primária e melhorar o design de unidades industriais, através da utilização de tecnologias de energia renovável.

No programa estão incluídas as seguintes funções:

- ✓ Análise de Ponto de Estrangulamento (APE) com base em dados reais, provenientes de indústrias, com variações nos perfis de carga de calor e a possibilidade de criar uma rede de permutadores de calor;
- ✓ Ilustração do perfil da carga residual com diferentes níveis de temperatura, de forma a se perceber qual a melhor maneira de integrar tecnologias de energia renovável, como as que utilizem ou produzam energia térmica solar;
- ✓ Ilustração de conceito holístico de optimização de sistemas de armazenamento e de permutadores de calor, bem como os seu potenciais para poupar energia.

O design de sistemas de armazenamento de energia, que é uma das grandes metas subjacentes à utilização do programa, é desenvolvido na sequência da criação da rede de permutadores de calor, previamente calculada com o recurso à APE (Fluch et al., 2012).

A aplicação do *software* SOCO já provou ter potencial na optimização de energia térmica na indústria alimentar e de bebidas. Casos de estudo, inclusive, demonstraram a sua capacidade de lidar eficientemente com processos *batch* (como é o caso da produção de cerveja), simulando sistemas de energia térmica num espaço de tempo definido pelo utilizador (semana, mês ou ano) (Muster-Slawitsch et al., 2014).

4.2.2.2 PinCH (versão 3.0)

O [PinCH](#) é um *software* desenvolvido para profissionais na área da integração energética. O programa permite que qualquer empresa, independentemente do seu tamanho (grandes ou pequenas e médias empresas), possa realizar uma APE clássica. Uma característica que se destaca no *software* é a rede de permutadores de calor, que oferece uma boa variedade de funções para o seu design. Com a sua actualização recente, o PinCH oferece suporte na integração de armazenamento de energia térmica para recuperação indirecta de calor.

O PinCH possui um conjunto de características que o tornam numa excelente ferramenta para a optimização energética de processos industriais. Nesse sentido, o programa oferece ao utilizador boas capacidades:

- ✓ Na análise de recuperação directa de calor em processos contínuos e semicontínuos;
- ✓ Na análise de recuperação directa e indirecta de calor em processos descontínuos;
- ✓ Na optimização de sistemas de utilidades;
- ✓ Na integração de bombas de calor, sistemas de cogeração, unidades mecânicas de recompressão de vapor, etc.;
- ✓ No design de redes combinadas de permutadores de calor e de armazenamento térmico.

Na aplicação do *software*, o utilizador deve inicialmente definir as necessidades do processo que vai analisar (reunir os dados do processo, estabelecer a fronteira do sistema e determinar as necessidades de aquecimento e arrefecimento). Seguidamente, o utilizador deve prosseguir, de forma sequencial, com o cumprimento das seguintes etapas:

1. Inserção dos dados relativos às correntes;
2. Configuração do equipamento;
3. Definição dos processos;
4. Aplicação de calendarização aos processos;
5. Estabelecimento de dados económicos;
6. Preparação dos cálculos referentes às metas a atingir;
7. Análise das metas energéticas;
8. Cálculo das metas energéticas e relativas a custos;
9. Integração de unidades de conversão de energia;
10. Design da rede de permutadores de Calor.

A interface do PinCH é bastante simples e organizada. Assim, mesmo quando o processo é complexo, a aplicação do método do ponto de estrangulamento acaba por ser relativamente rápida e eficaz (“PinCH An analysis and design tool for process integration,” 2017).

4.2.2.3 GREENFOODS branch concept

O [GREENFOODS branch concept](#) é uma ferramenta que orienta o utilizador na procura de soluções específicas para a produção eficiente do ponto de vista energético e para a integração de sistemas de energia renováveis em cinco subsectores da indústria alimentar e de bebidas (pão, cerveja, lacticínios, processamento de fruta e vegetais e processamento de carnes).

O GREENFOODS branch concept inclui a avaliação do consumo energético corrente da empresa, um balanço energético, o cálculo da utilização de energia primária e as emissões de dióxido de carbono. Após a interpretação dos dados, o programa identifica medidas de optimização ao nível do processo e do sistema (integração energética) e a possibilidade de integração de fontes de energia renovável como biomassa, biogás ou energia solar térmica, por exemplo. O grande objectivo da ferramenta é, não só, ajudar o utilizador a encontrar novas soluções que permitam um uso mais racional da energia, mas também avaliá-las de um ponto de vista energético, ecológico e económico.

Associado ao programa está, ainda, uma plataforma *online*, chamada [GREENFOODS WikiWeb](#), que contém informação específica sobre cada unidade de operação e formas alternativas de obter eficiência energética e integrar energia renovável nos vários subsectores da indústria alimentar e de bebidas. O WikiWeb inclui ainda um manual que apresenta alguns eventos e casos de estudo com aplicação na indústria. A plataforma é de fácil acesso e foi desenvolvido no seguimento do projecto GREENFOODS, sob a coordenação da AEE INTEC.

Para o programa sugerir novas medidas para a melhoria da eficiência energética da empresa que é alvo de estudo, o utilizador deve definir os dados correntes (informação) da empresa, relativos aos fluxos energéticos da mesma. A utilização do programa compreende a realização de quatro etapas:

1. Definição do *input* de energia;
2. Definição dos tipos de utilidade;
3. Definição preliminar das perdas energéticas, que pode mais tarde ser alterada depois do balanço de energia ser resolvido;
4. Definição das necessidades energéticas do processo mais importante.

A última etapa corresponde à secção principal da ferramenta. Por um lado, é possível definir processos de uma forma básica e simples, que não segue propriamente os padrões específicos de um subsector. Por outro lado, para certas aplicações e subsectores existe uma versão avançada do programa que permite uma definição detalhada de processos.

São sugeridas alternativas que incluem tecnologias ou optimização do processo, recuperação de calor e integração de energias renováveis. Um algoritmo de APE sugere possíveis permutadores de calor através da combinação das correntes quentes e frias definidas consoante a fronteira do sistema. Finalmente, a integração de energias renováveis é avaliada (Fluch et al., 2017).

4.2.2.4 BATCHES e Aspen Batch Process Developer

Tanto o BATCHES, pertencente à Batch Process Technologies, Inc. (West Lafayette, IN, USA) como o Aspen Batch Process Developer, produto da empresa Aspen Technology (Burlington, MA), são ferramentas próprias para a modelação de vários lotes de vários produtos. Contudo, os programas demoram muito tempo a apresentar soluções porque ambos fazem detalhados balanços de energia e de massa para todos os lotes simulados. Outra particularidade negativa que ambos apresentam é o facto de não considerarem possíveis falhas de equipamento, atrasos, padrões de turnos de trabalho, inatividade para manutenção de equipamento, férias, etc. Assim sendo, estas ferramentas de *software* não serão as mais aconselháveis para a calendarização de unidades industriais que produzam vários produtos (Petrides et al., 2014).

O [BATCHES](#) é uma ferramenta de simulação versátil na gestão de processos descontínuos ou semicontínuos em indústrias farmacêuticas, químicas e alimentares. É o único simulador capaz de representar com precisão as características do processo subjacente, permitindo assim que o utilizador tome, em situações importantes, decisões de forma consciente.

Independentemente da necessidade da indústria, seja ela de modernização, descongestionamento do fluxo de trabalho ou design de processo novo, o programa avalia o processo na sua integridade de

forma a serem atingidos os objectivos. O BATCHES apresenta toda a informação necessária para lidar com os problemas correntes e prevenir os futuros através de:

- ✓ Uma metodologia híbrida de simulação (simulador de eventos discretos e dinâmicos);
- ✓ Uma biblioteca de modelos de dinâmica de processos;
- ✓ Uma lógica para implementar decisões operacionais;
- ✓ Uma interface gráfica para modelação e análise.

O BATCHES é utilizado como suporte no design de processos, na modernização de sistemas, no descongestionamento de fluxo de trabalho e na calendarização da produção. A aplicação do *software* possibilita a redução de riscos associados a melhorias de processos, o aumento da gama de produtos e a redução de custos operacionais e despesas de capital.

O [Aspen Batch Process Developer](#) (ABPD) é uma ferramenta de simulação, que otimiza o desenvolvimento de processos químicos descontínuos e aumenta a taxa de utilização do equipamento. As principais qualidades do ABPD estão relacionadas com o facto do programa:

- ✓ Avaliar rapidamente alternativas ao processo, gerar balanços de massa, calcular o tempo de cada ciclo *batch* e fazer estimativas de custo durante as primeiras fases da definição do processo;
- ✓ Reduzir o tempo que o produto demora até chegar ao mercado;
- ✓ Melhorar a taxa de utilização do equipamento;
- ✓ Eliminar a congestão do fluxo de trabalho;
- ✓ Gerar documentação de forma mais eficiente;
- ✓ Permitir o acompanhamento das emissões gasosas da unidade industrial;
- ✓ Utilizar a maior base de dados mundial de propriedades físicas.

Os processos descontínuos envolvem a realização de várias fases, que requerem diferentes grupos de trabalho. Estes grupos usam representações do processo algo distintas para suportar a sua tomada de decisão. Nesse sentido, por vezes, a partilha de informação entre estes grupos pode não ser clara, o que pode ter consequências ao nível do processo.

O programa permite uma abordagem padronizada para criar e gerir a informação relativa ao processo, à medida que este decorre. Foi desenvolvido de forma a que todos os envolventes no processo pudessem ter acesso à mesma informação no decorrer do processo. Assim, o programa facilita a partilha de informação na empresa, o que é benéfico para as indústrias que são constantemente desafiadas a acelerar eficientemente o desenvolvimento de novos produtos sem que os custo total aumente.

Como consequência da capacidade de prevenir falhas de comunicação, a aplicação do ABPD pode aumentar a produtividade e o lucro da empresa.

4.2.3 Síntese e Análise Crítica das Ferramentas Abordadas

Tal como mencionado na secção 2.1, a indústria alimentar e de bebidas é caracterizada pela elevada quantidade de processos descontínuos ou semicontínuos. Assim, o propósito desta secção é resumir e comparar todas as ferramentas abordadas que possibilitem não só a modelação e optimização de processos contínuos, mas também de processos descontínuos.

A tabela 1 condensa a informação apresentada nas secções anteriores (4.2.1 e 4.2.2) de forma a resumir as principais características das sete ferramentas que nelas foram abordadas.

✓ Tabela 1 - Síntese das características das ferramentas para modelação de cargas térmicas dinâmicas

Ferramenta	Área de aplicação	Metodologias Utilizadas	Acesso
<i>gPROMS</i>	Simulação de balanços energéticos e de diagramas de operações	Simulação; Programação Matemática	Disponível (licença comercial)
<i>CHEMCAD</i>	Simulação de balanços energéticos e de diagramas de operações	Simulação; Programação Matemática	Disponível (Possibilidade de discutir um programa de licenciamento académico)
<i>SOCO</i>	Integração energética com sistemas inteligentes de armazenamento de energia	Análise do Ponto de Estrangulamento	Informação não disponível (necessário contactar a empresa)
<i>PinCH 3.0</i>	Integração energética	Análise do Ponto de Estrangulamento	Disponível (Possibilidade de discutir um programa de licenciamento académico)
<i>GREENFOODS branch concept</i>	Eficiência energética e integração de sistemas de energia renováveis	Análise do Ponto de Estrangulamento	Disponível (o <i>download</i> requer o requisito de uma chave de segurança)
<i>Aspen Batch Process Developer</i>	Criação e gestão de informação relativa ao processo	Simulação	Disponível (licença comercial)
<i>BATCHES</i>	Simulação na gestão de processos descontínuos ou semicontínuos	Simulação	Disponível (licença comercial)

A escolha da ferramenta a utilizar na dissertação apenas será feita numa fase posterior de desenvolvimento da tese. Contudo, algumas ferramentas aparentam ser mais promissoras que outras. Nesse sentido, mediante as características e possível aplicabilidade das ferramentas acima descritas, verifica-se que as aplicações informáticas talvez sejam a melhor opção de apoio computacional. As linguagens de programação apresentam algumas limitações no que diz respeito às capacidades que oferecem ao utilizador quando comparadas com as aplicações informáticas. Considerando ainda as limitações apontadas ao Aspen Batch Process Developer e ao BATCHES no subcapítulo 4.2.2.4, conclui-se que talvez o SOCO, o PinCH 3.0 ou o GREENFOODS branch concept sejam os *softwares* que melhor poderão suportar o utilizador.

4.3 Exemplos Práticos da Aplicação de Ferramentas na Indústria

A secção 4.2 dedicou-se ao estudo de várias ferramentas que podem, efectivamente, ajudar o utilizador a obter novas soluções e de uma forma mais rápida. Uma vez concluído esse estudo, torna-se

interessante poder ter uma noção geral de como é benéfico o auxílio das mesmas na realidade industrial. A actual secção tem esse mesmo propósito, ou seja, pretende apresentar dois casos de estudo, nos quais a colaboração de uma aplicação informática foi fundamental. No primeiro caso, abordado na secção 4.3.1, será apresentado o contributo do GREENFOODS branch concept na obtenção de maior eficiência energética de uma empresa austríaca produtora de cerveja. Posteriormente, na secção 4.3.2, pretende-se esclarecer a forma como a integração de uma bomba de calor numa instalação industrial foi exequível com a ajuda do PinCH 3.0.

4.3.1 GREENFOODS na Produção de Cerveja

No âmbito do projecto “*SolarBrew*” (2012-2015), coordenado pela AEE INTEC, instalou-se um campo com cerca de 1 500 m² de colectores solares térmicos de placas planas com uma capacidade de 1MWth (megawatt térmico) na empresa Goess, uma cervejeira austríaca. A antevisão da oportunidade de integrar grandes sistemas de energia térmica solar em processos industriais de produção de cerveja, tendo em conta que as necessidades de controlo térmico dos seus processos se situam maioritariamente na gama de temperaturas dos 80°C a 120°C, esteve na origem do projecto em questão. A utilização do GREENFOODS branch concept ajudou a empresa a identificar que quase 30% da energia térmica necessária para o processo de produção do mosto (processo de empastagem; numa caldeira ocorre a hidrólise dos amidos de forma a serem convertidos em açúcares simples fermentescíveis, por acção enzimática controlada por um incremento da temperatura desde 58°C a 78°C) podia ser fornecida através de um sistema térmico solar. Mesmo para os processos que necessitavam de temperaturas mais elevadas (por exemplo, fervura do mosto), que não podiam ser suportados pelo sistema de colectores solares, o *software* identificou que estas necessidades podiam ser 100% satisfeitas usando apenas energia renovável. A cervejeira que já usava biogás proveniente de um sistema de cogeração alimentado por lamas provenientes de uma ETAR (estação de tratamento de águas residuais) municipal, passou a produzi-lo a partir dos subprodutos biológicos anteriormente subaproveitados (Fluch et al., 2017).

4.3.2 PinCH 3.0 na Indústria Alimentar – Produção de Bombons

O caso de estudo a abordar nesta secção será exposto de forma clara, seguindo integralmente as ideias e conclusões presentes em (Olsen et al., 2017). A unidade de produção em questão fabrica bombons para o mercado europeu da indústria alimentar e de bebidas. O caso de estudo foi ligeiramente simplificado com o propósito de reduzir a sua complexidade e de modo a poder dedicar-se apenas às principais áreas que utilizem energia térmica. As três principais áreas da instalação que recorrem ao uso de energia térmica são:

- ✓ Produção de gomas de fruta;
- ✓ Produção de rebuçados;
- ✓ Sistemas de utilidades.

Os processos de produção das gomas de fruta e dos rebuçados são semelhantes pois ambos recorrem a unidades de mistura comum, fervura, moldagem, secagem e de etapas de tratamento de produto

final. Os sistemas de utilidades na instalação consistem em circuitos de vapor, água quente e água morna que utilizam vapor comprado a uma instalação local de tratamento de resíduos. As utilidades são usadas para fornecer energia, não só, aos processos de produção das gomas de fruta e dos rebuçados, mas também aos sistemas de tratamento de ar e de água quente doméstica.

4.3.2.1 Necessidades do Processo

Como na maioria dos casos referentes à indústria alimentar e de bebidas, as necessidades de aquecimento e de arrefecimento são dominadas por correntes de ar e água/vapor.

Na produção de gomas de fruta, enquanto a gelatina é cozinhada, é gerada uma corrente de vapor. É, também, produzida uma corrente de ar húmido à saída do secador que será, posteriormente, útil no processo de moldagem da goma (assume-se que o seu coeficiente de transferência de calor aumenta de 50 para 100 W/m²K quando o ar de exaustão é arrefecido até ao seu ponto de orvalho, ou seja, até à sua temperatura de condensação). Durante a produção de rebuçados, também existe geração de vapor no processo de cozimento, sendo que deve ser preparada água quente que tem propósitos de aquecimento. Para ambos os processos é necessária água CIP (*Clean-in-place*) que é mantida no sistema de água residual da empresa depois do seu uso final. No verão existe muita procura de água morna uma vez que o ar frio, previamente arrefecido para desumidificação, deve ser aquecido até à temperatura ambiente. A procura de água morna é menor no outono e primavera (período de transição, assim denominado no caso de estudo) e volta a aumentar no inverno devido ao facto de incluir a procura de água quente para fins de aquecimento doméstico. Água proveniente de um resfriador à base de amoníaco é, também, considerada como potencial fonte de calor.

4.3.2.2 Calendarização

Certos parâmetros das correntes processuais variam dado o facto dos diferentes períodos sazonais do ano referidos (verão, período de transição e inverno) provocarem mudanças nas necessidades de aquecimento e arrefecimento do processo de produção. Para o estudo em questão, devem ser considerados dois casos operacionais para cada período sazonal. Como tal, foram identificados um total de seis casos operacionais que foram utilizados na fase de definição das metas (energia e custos) da análise.

4.3.2.3 Análise Pinch

Dos 6 casos operacionais avaliados no PinCH 3.0, durante a etapa de *targeting*, concluiu-se que o quarto caso (correspondente ao segundo caso do período de transição) era o mais crítico, uma vez que o seu tempo de operação era o mais demorado. Na figura 8 estão representadas as curvas compostas e as curvas compostas globais que o PinCH 3.0 reproduziu, relativamente a esse caso. Com base num cálculo global de *supertargeting* de todos os seis casos operacionais, foi aplicada uma diferença mínima de temperatura de 5 kelvin ($\Delta T_{min} = 5 \text{ K}$).

As curvas compostas, representadas pelo diagrama da esquerda, mostram que as necessidades de aquecimento e arrefecimento do processo apenas podem ser parcialmente cobertas por recuperação

de calor (196 kW), sendo que o resto deve ser coberto por utilidades quentes (UQ, 140 kW) e frias (UF, 217 kW), respectivamente. O ponto de estrangulamento encontra-se a uma temperatura de 37,5°C. O diagrama do meio demonstra a integração de uma bomba de calor (refrigerante R134) baseado na curva composta global associada. O refrigerante evapora à temperatura de 27°C e após a compressão condensa a 73°C. O calor desperdiçado (residual) abaixo do ponto de estrangulamento é transferido para acima do mesmo, onde existe um déficit de calor. Finalmente, o diagrama da direita, ilustra as curvas compostas resultantes após a evaporação e as correntes de energia do condensador (*Condenser*) serem incluídas nos perfis de arrefecimento e aquecimento.

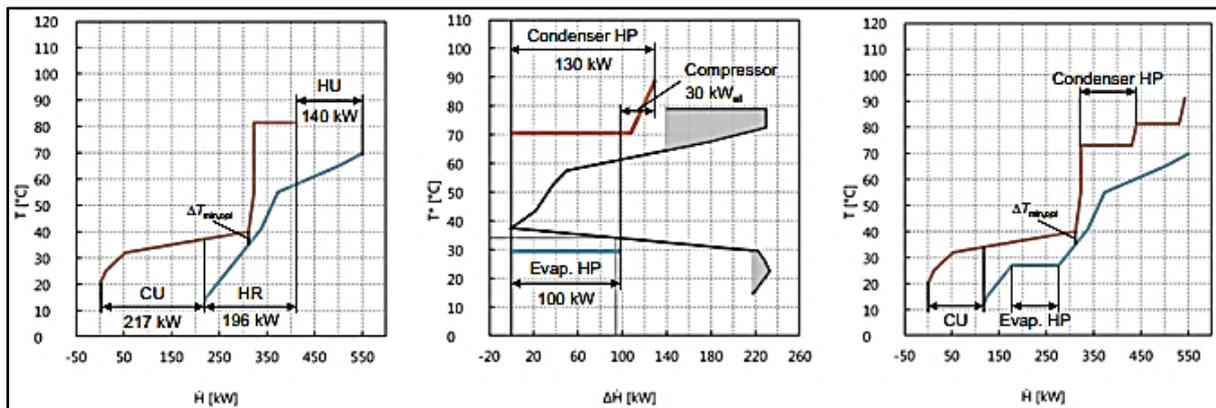


Figura 8 – Curvas compostas e curvas compostas globais do caso operacional 4, para um $\Delta T_{\min} = 5$ K, ilustradas por gráficos provenientes do PinCH 3.0 (Olsen et al., 2016)

4.3.2.4 Poupança Energética Obtida com a Integração da Bomba de Calor

Após a importante fase de *targeting*, foi necessário garantir que as metas calculadas anteriormente pelas curvas compostas eram atingidas e que as três principais regras da análise do ponto de Estrangulamento eram respeitadas. Nesse sentido, determinou-se a rede de permutadores de calor com base na rede MER obtida, que indicou o local óptimo para a integração da bomba de calor. Chegou-se à conclusão que a bomba de calor viria a ter de funcionar a cargas diferentes dada a dependência sazonal do calor residual disponível pela água de refrigeração e da variedade na procura de água morna. A análise das cargas máximas da bomba, através das curvas compostas globais ilustradas na figura 8, foi feita para cada caso operacional. As cargas e as poupanças de potência eléctrica e de utilidades externas estão demonstradas na tabela 2. Considerando que a carga de trabalho da bomba de calor é limitada tanto pela disponibilidade de calor da água de refrigeração ou das necessidades da água morna, foi proposta uma bomba de calor cuja carga máxima do condensador é 155 kW. Como pode ser visto na tabela 2, a bomba proposta opera a plena carga na maioria dos casos operacionais (OC, *Operating Cases*), excepto no segundo e no terceiro, nos quais a carga do condensador é limitada a 70 kW e 130 kW, respectivamente. Talvez fosse possível obter poupanças de energia maiores através da integração de uma bomba de calor mais potente, uma vez que ainda poderia ser transferido mais calor para o circuito de água morna nos primeiros dois casos operacionais (OC1 e OC2). Contudo, essa hipótese não se encontra no âmbito do caso de estudo em questão.

- ✓ Tabela 2 - Cargas máximas e poupanças energéticas num caso ideal e para uma bomba de 155 kW (adaptado de Olsen et al., 2017)

OC	<i>Cargas Máximas da Bomba</i>			<i>Bomba Proposta (155 kW)</i>		
	Carga Máx. Condensador [kW]	Input Eléctrico [kW]	Poupança UQ [MWh/ano]	Carga Máx. Condensador [kW]	Input Eléctrico [kW]	Poupança UQ [MWh/ano]
OC1	310	70	170,50	155	35	85,25
OC2	375	85	356,25	155	35	147,25
OC3	70	15	77,00	70	15	77,00
OC4	130	30	247,00	130	30	247,00
OC5	155	35	85,25	155	35	85,25
OC6	155	35	147,25	155	35	147,25
Total			1 083,25			789,00

4.3.2.5 Análise dos Custos

A análise dos custos associados à modernização do processo de produção foi realizada com recurso à APE baseada nos dados provenientes do parceiro industrial. De acordo com Olsen et al., 2017, concluiu-se que para a análise em questão seriam necessários introduzir os seguintes dados no PinCH 3.0:

- ✓ Tempo máximo de retorno no investimento dos equipamentos: 5 anos;
- ✓ Tempo de vida para cálculo da anuidade: 15 anos;
- ✓ Taxa de rentabilidade: 3%;
- ✓ Custo da electricidade: € 88/MWh;
- ✓ Custo de utilidades quentes: € 61/MWh;
- ✓ Custo de utilidades frias: € 22/MWh;
- ✓ Custo estimado do investimento total para medidas de recuperação de calor (sem a bomba de calor): € 330 677;
- ✓ Custo da bomba de calor proposta: € 140 340.

Note-se, ainda, que ambos os custos de investimento (€ 330 677 e € 140 340) incluem os custos de equipamento, engenharia, tubulação, electricidade, instrumentação e instalação.

Com base na nova rede de permutadores e nos custos apresentados, o PinCH 3.0 estimou serem necessários 3,7 anos para o investimento ter retorno, sendo que anualmente existiria uma poupança de € 125 868, depois de um investimento total de € 471 017.

5 Ferramenta para Análise do Ponto de Estrangulamento

O actual capítulo tem como objectivo apresentar o *software* escolhido, ou seja, pretende expor os princípios pelos quais se rege para solucionar problemas, a disposição e organização da sua interface e, também, a forma como funciona. Inicialmente, é esclarecido o procedimento de obtenção da ferramenta a utilizar na dissertação. Posteriormente, são apresentados o projecto que levou à origem da ferramenta e a metodologia utilizada pela mesma. Finalmente, o funcionamento da ferramenta é explicado por etapas.

5.1 Selecção da Ferramenta

Uma vez terminado o estudo realizado na secção 3.9.2, iniciou-se o processo de escolha da aplicação informática a utilizar no trabalho em questão. A primeira imposição que teve necessariamente de ser considerada foi que seria dada preferência a ferramentas gratuitas (*open source*) e/ou disponíveis no IST ou no ISQ. Ferramentas que não se enquadrassem em nenhum destes parâmetros teriam de ser solicitadas de forma a discutir a possibilidade de obtenção de uma licença de utilização das mesmas para fins académicos.

Tendo em conta as imposições acima descritas, verifica-se que as três ferramentas que ficaram definidas na secção 4.2.3 como as mais promissoras para alcançar os objectivos propostos (SOCO, PinCH 3.0 e GREENFOODS branch concept) se enquadram ou, pelo menos, têm condições para se enquadrar nos critérios de escolha. Assim, para cada ferramenta, obtiveram-se as seguintes informações:

- ✓ Relativamente à ferramenta SOCO, após o contacto com um dos responsáveis pelo projecto na qual esta se inseria, concluiu-se que a sua utilização não iria ser possível. Embora a equipa responsável tenha discutido internamente, o *software* não se encontra disponível para utilização externa (comercial), até porque está a ser actualizado;
- ✓ A Universidade de Lucerna, na Suíça, disponibiliza o PinCH 3.0 sob a forma de versão de teste, durante um período restrito de 15 dias, para qualquer utilizador que esteja interessado em conhecer a aplicação informática. No seguimento da solicitação da versão de teste, após transmitido o enquadramento do trabalho em questão aos responsáveis pelo *software*, uma versão completa da ferramenta foi disponibilizada sem qualquer custo durante um período de 6 meses;
- ✓ O Processo de obtenção do GREENFOODS branch concept foi mais simples, uma vez que a ferramenta é *open source*. Sendo assim, apenas foi necessário descarregá-la.

Sendo a Análise do Ponto de Estrangulamento a metodologia abordada em ambas as ferramentas adquiridas (PinCH 3.0 e GREENFOODS branch concept), tornou-se importante perceber concretamente quais as entradas de dados que cada uma das aplicações informáticas exigia de forma a produzirem a análise em condições. O estudo inicial das ferramentas foi complementado com visitas preliminares a quatro unidades industriais distintas, inseridas no subsector relativo à fabricação de produtos à base de carne. O contacto com a realidade industrial permitiu compreender melhor quais as principais necessidades de recuperação de calor das fábricas, bem como os equipamentos térmicos

utilizados no seu processo de produção. Assim, tornou-se possível verificar se as carências existentes nas mesmas podiam ser satisfeitas pelas características e imposições de funcionamento de cada ferramenta.

A aplicação informática que acabou por ser escolhida para o desenvolvimento da dissertação foi o PinCH 3.0. Embora ambas as ferramentas consigam satisfazer os objectivos propostos para o sucesso da dissertação, a interface do PinCH é bastante mais organizada e a forma como trabalha os dados inseridos é mais simples. O PinCH 3.0 apresenta um vasto conjunto de opções que permite ao utilizador testar múltiplas soluções na presença de vários cenários de entrada de dados.

5.2 Contextualização do Projecto PinCH 3.0

Segundo Olsen et al. 2010, a ferramenta de *software* PinCH (CH são as iniciais de “*Confoederatio Helvetica*” em Latim, que significa Suíça) foi desenvolvida com o intuito de promover o suporte na utilização da metodologia da APE. O projecto foi suportado pelo Departamento Federal Suíço de Energia (SFOE – *Swiss Federal Office of Energy*) para substituir e adicionar novas funcionalidades ao *software* PinchLENI, desenvolvido, no início dos anos noventa, pela Escola Politécnica Federal de Lausana (EPFL - *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*). Esta ferramenta já permitia que estudantes e engenheiros aprendessem a aplicar a APE a casos práticos com sucesso. Contudo, dadas as suas limitações, a ferramenta carecia de melhorias na base de código, pelo que novas funcionalidades e algoritmos deveriam ser implementados. Inerente aos objectivos globais do projecto PinCH estava a necessidade de manter a simplicidade da interface e da utilização que caracterizava o PinchLENI. Assim, as inovações realizadas pela equipa do PinCH tornaram possível:

1. A especificação de dados na tabela de correntes dinâmicas;
2. A auto-segmentação de ar húmido;
3. A gestão de diferentes cenários para as etapas de *targeting* e *design*;
4. A manipulação de correntes suaves (capacidade de verificar facilmente a possibilidade de integração energética nas partes suaves da corrente) nas etapas de *targeting* e *design*;
5. A fusão de correntes no *design* da rede de permutadores de calor;
6. A divisão da visualização das curvas compostas globais;
7. A visualização do gráfico da força motriz.

Wellig and Olsen 2016 referem que até muito recentemente, o foco do PinCH tem sido a análise e optimização de sistemas de recuperação directa de calor para processos contínuos (tradicionalmente os que mais consomem energia). Apesar das suas boas funcionalidades, o seu suporte na análise e optimização de sistemas de recuperação indirecta de calor, que envolvem armazenamento de energia térmica, tem sido limitado.

De forma a satisfazer a necessidade relacionada com o *design* de armazenamento de energia térmica, a última versão do PinCH (versão 3.0) foi desenvolvida. Esta versão fornece uma tecnologia avançada, útil no *design* conceptual, na estimativa de custos e na integração de armazenamento de energia térmica em processos descontínuos e semicontínuos. Como nas versões anteriores, utiliza como base a APE que disponibiliza ao programa uma forte componente na avaliação de novas oportunidades para

recuperação indirecta de calor. Além disso, o PinCH (versão 3.0) permite que utilizador facilmente consiga avaliar possibilidades de recuperação directa e indirecta paralelamente.

As principais características desta versão incluem, por exemplo, o *design* da rede de armazenamento que tem por base o ISSP (*indirect source sink profile*), o desenvolvimento do perfil térmico de carga e descarga, gráficos que mostram os efeitos das limitações na capacidade de armazenamento e, também, esquemas de redes de armazenamento e de permutadores de calor.

Além das características inovadoras que o *software* apresenta, a equipa do PinCH juntamente com a SFOE estabeleceram um centro de Integração de Processos/PinCH (Wellig and Olsen, 2016). O Centro oferece apoio a empresas industriais e de engenharia nas áreas de integração de processos e de APE. Os serviços prestados no centro incluem cursos, formação individual e específica para a empresa, consultoria, orientação e serviços de APE. Estas actividades são importantes para promover a APE na indústria e para eliminar barreiras à optimização da eficiência energética industrial.

5.3 Metodologia

Uma análise do Ponto de Estrangulamento é caracterizada pela sua abordagem estruturada e sistemática para o difícil problema que é o *design* global de um sistema de permutadores de calor. O método coloca uma elevada responsabilidade a quem o está a utilizar, no sentido em que lhe exige a total compreensão do processo a otimizar (Olsen et al., 2010).

A figura 9 ilustra um fluxograma que representa o processo de estudo que é tipicamente realizado numa APE na indústria. Este procedimento envolve três grandes fases: validação de balanços de massa e energia (primeira), cálculos característicos da APE (segunda) e recomendações (medidas) sobre alterações no *design* dos processos (terceira). O PinCH dedica-se maioritariamente ao suporte da segunda fase, ou seja, aos cálculos requeridos nas etapas de *targeting* e *design* da APE. Relativamente às competências associadas à primeira e terceira fase, o *software* apenas as pode providenciar de uma forma pouco abrangente. Sendo assim, estas duas fases requerem que o engenheiro desenvolva as competências e conhecimentos necessários em engenharia de processos e em *design* de operações, através do estudo e da experiência na área. No contexto dos cálculos necessários a uma Análise do Ponto de Estrangulamento, foram identificadas dez etapas que são tipicamente realizadas na mesma, sendo que o PinCH as disponibiliza a todas (Lucerne University of Applied Science and Arts, 2012).

Como exposto na secção 3.4.2, a recolha de dados essenciais à análise é muito importante e, como tal, o PinCH engloba também uma etapa dedicada a esta mesma tarefa, que precede as restantes dez. Na utilização desta aplicação informática, as primeiras cinco etapas (etapas 1 - 5) dedicam-se à percepção e quantificação das necessidades de energia térmica. As restantes cinco etapas (6 - 10) relacionam-se com o estabelecimento de metas (*targets*) e procura de oportunidades de optimização.

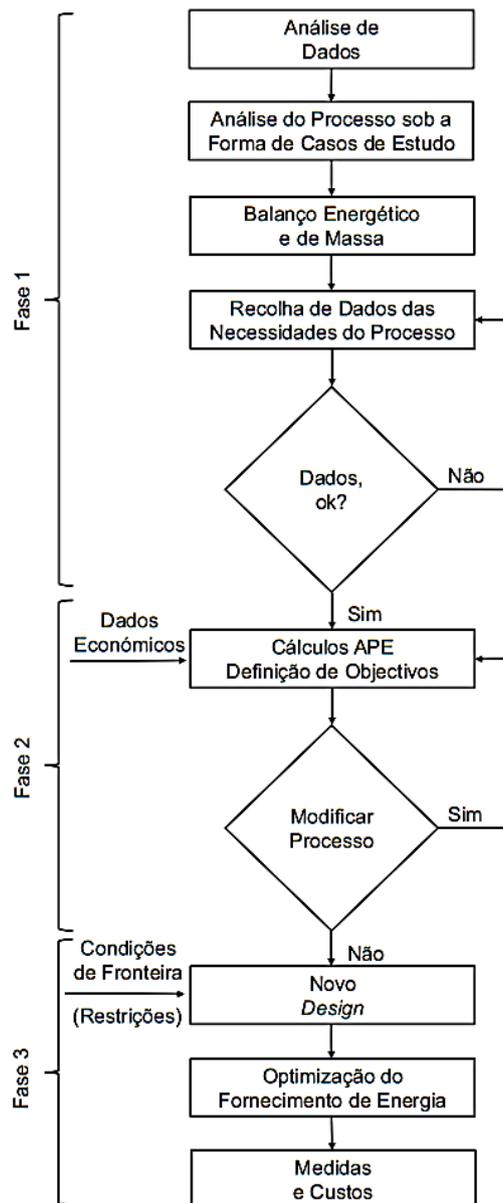


Figura 9 - Processo de estudo tipicamente realizado numa APE na indústria (adaptado de Lucerne University of Applied Science and Arts, 2012)

As cinco etapas iniciais, que caracterizam o processo, são as seguintes:

1. **Inserção dos dados relativos às correntes** (definição das utilidades externas; atribuição de fluidos especiais para cálculo de automático de propriedades chave; importação de dados das correntes processuais);
2. **Configuração do equipamento** (configuração de equipamentos partilhados para reduzir a complexidade do *design* de armazenamento; definição de múltiplos casos operacionais através da utilização do equipamento; partilha de equipamento para otimizar a reutilização da área de permutadores de calor);

3. **Definição dos processos** (criação de processos baseados em diferentes grupos de correntes; preparação de análises de cenários);
4. **Aplicação de calendarização aos processos** (configuração da dependência temporal do processo; modelação de processos contínuos e descontínuos; visualização do calendário das necessidades do processo);
5. **Estabelecimento de dados económicos** (atribuição de parâmetros de custo; aplicação de funções económicas flexíveis).

As restantes cinco etapas (etapas 6 - 10) são providenciadas no PinCH pela seguinte ordem:

6. **Preparação dos cálculos referentes às metas a atingir** (configuração de cenários de análise; estabelecimento de diferentes configurações com base em processos, utilidades, horários ou dados económicos);
7. **Análise das metas energéticas** (análise preliminar das metas energéticas; redução da complexidade do processo; determinação da complexidade do processo; determinação das metas para armazenamento de energia térmica);
8. **Cálculo das metas energéticas e relativas a custos** (análise da procura de energia e das metas relativas a custos; aplicação de *supertargeting* para otimizar a recuperação directa de calor em processos dependentes do tempo; integração sistemática de armazenamento de energia térmica);
9. **Integração de unidades de conversão de energia** (optimização do sistema de utilidades; integração de unidades de conversão de energia no processo, tais como uma bomba de calor, CHP, recompressão de vapor mecânico, recompressão de vapor térmico ou um ciclo de Rankine orgânico);
10. **Design da rede de permutadores de Calor** (optimização de redes de permutadores de calor para processos dependentes do tempo; visualização de redes de armazenamento de energia térmica).

As etapas apresentadas e o suporte dado pelo PinCH facilitam o desafio que é a análise de diferentes cenários. De forma a poder fazer essas análises de sensibilidade, é necessária a repetição das fases de *targeting* e de *design* para diferentes configurações de parâmetros (etapa 6). O PinCH gere cada uma das etapas através da utilização de uma interface gráfica do utilizador. Uma vez terminados os cálculos das metas (*targets*), podem ser criados diagramas representativos da rede de permutadores de calor que reproduzam *designs* de energia mínima (rede MER) (Lucerne University of Applied Science and Arts, 2012).

Na secção seguinte (5.4), as etapas identificadas e os detalhes das principais componentes de visualização do PinCH (versão 3.0) serão abordadas detalhadamente.

5.4 Componentes de Visualização

O PinCH apresenta um ambiente gráfico de trabalho organizado. Esta característica da sua interface torna a ferramenta simples e muito funcional. A figura 10 ilustra o ambiente gráfico de trabalho inicial que o *software* apresenta antes de se iniciar uma nova APE associada a um novo projecto.

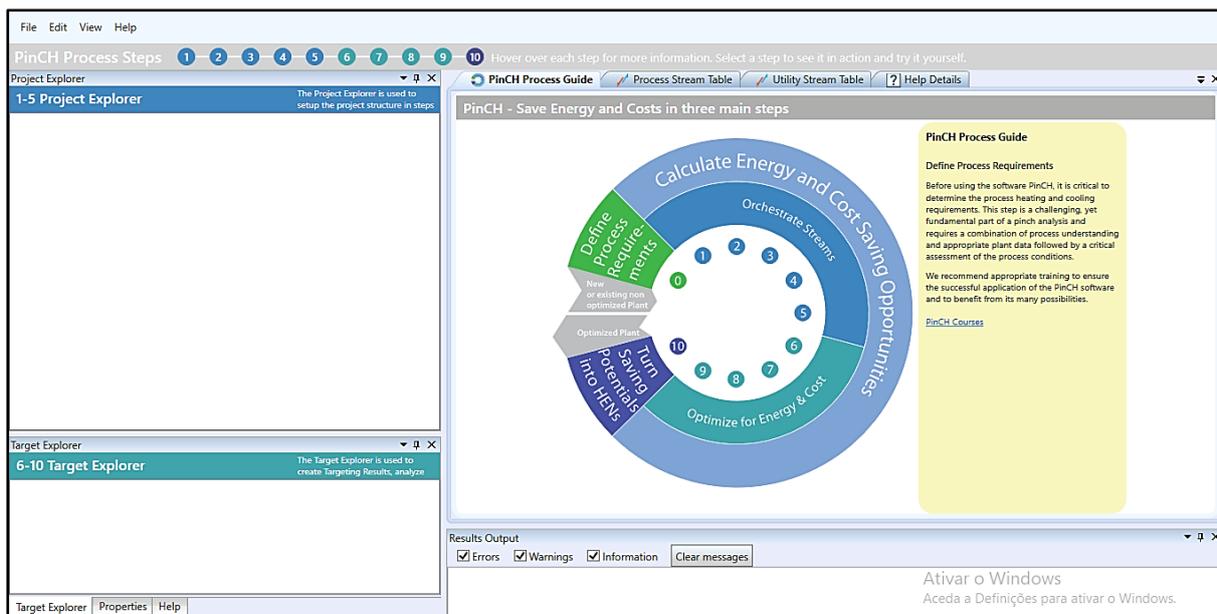


Figura 10 - Ambiente gráfico de trabalho inicial

De modo a auxiliar as dez etapas de estudo, foram criadas componentes de visualização na interface do software. Para gerir estas componentes, a arquitectura global do sistema foi baseada no *n-tier design* (o processamento, a gestão de dados e apresentação das funções estão separados física e logicamente). Este *design* oferece a flexibilidade necessária para extensões futuras. Cada componente de visualização é exibida e gerida dinamicamente no ambiente de trabalho (Olsen et al., 2010).

Duas das principais componentes de visualização encontram-se bem visíveis na figura 9, o Explorador de Projecto (Project Explorer) e o Explorador de Resultados Alvo (Target Explorer). O Explorador de Projecto é utilizado para configurar os dados relevantes do processo nas primeiras cinco etapas (1-5). Nas restantes etapas (6-10) o sistema é otimizado no Explorador de Resultados Alvo. Ambas as componentes funcionam como painéis de navegação do projecto.

Tanto os detalhes das principais componentes de visualização do PinCH (versão 3.0), como as etapas apresentadas anteriormente (secção 5.3), serão discutidas nesta secção. De forma a tornar esta tarefa o mais clara possível, a exposição dos conteúdos basear-se-á no manual de utilização da ferramenta, nos tutoriais disponibilizados pela equipa do PinCH e, também, na experiência de manuseio da ferramenta.

5.4.1 Inserção dos Dados Relativos às Correntes (Etapa 1)

A entrada de dados relativos às correntes processuais tem o propósito de especificar as necessidades do processo que foram identificadas durante a recolha de dados. Estes dados devem ser introduzidos na tabela de correntes processuais (ex.º figura 11). Nesta tabela podem ser adicionadas correntes contínuas ou descontínuas, dependendo do tipo de processo que se quer otimizar. Sempre que uma nova corrente é adicionada, deve ser-lhe atribuído um nome. Seguidamente, devem seleccionar-se as células adicionais, correspondentes às propriedades da corrente, para modificar os valores padrão pelos valores originais recolhidos. Na figura 11 pode observar-se a tabela de correntes processuais de

um processo contínuo com quatro correntes (*Reactant A*, *Product C*, *Recycling Stream* e *Reaction Mixture*). As correntes “*Reactant A*” e “*Reaction Mixture*” estão representadas por uma seta azul apontada para cima, querendo isto dizer que são consideradas correntes frias. As outras duas, cuja seta é vermelha e aponta para baixo, são correntes quentes.

+/-	Name	Hot/Cold	T _{in} °C	T _{out} °C	ṁ kg/s	c _p kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m ² K)	Pressure bar(a)	CP kW/K	ΔH kW	Fluid	Humidity Ratio In kg/kg	Soft	t _{start} h	t _{stop} h
	Reactant A	Blue arrow up	20	60	1	2.5	-	1000	-	2.5	100	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Product C	Red arrow down	90	20	1.5	2.5	-	1000	-	3.75	262.5	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Recycling Stream	Red arrow down	130	60	2.5	2	-	1000	-	5	350	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-
	Reaction Mixture	Blue arrow up	70	110	4	2.4	-	1000	-	9.6	384	Simple	-	<input type="checkbox"/>	-	-

Figura 11 – Tabela de correntes processuais de um processo contínuo (tutorial 1, disponível em [PinCH](#))

A tabela de correntes processuais é dinâmica e actualiza automaticamente os dados necessários assim que existir informação suficiente para satisfazer os graus de liberdade. Na figura 11, esta particularidade pode verificar-se através da cor verde das colunas que correspondem à capacidade calorífica média (CP) e à variação de entalpia ($\Delta\dot{H}$). Uma vez introduzidos os valores da temperatura inicial (T_{in}), da temperatura final (T_{out}), do calor específico médio (c_p) e do caudal mássico (\dot{m}), o PinCH calculou automaticamente o valor de CP e $\Delta\dot{H}$. Existe, também, a possibilidade de introduzir diferentes combinações de dados na tabela, tais como (T_{in} , T_{out} , c_p , $\Delta\dot{H}$) ou (T_{in} , T_{out} , c_p , CP), que o PinCH calcula (\dot{m} , CP) ou (\dot{m} , $\Delta\dot{H}$), respectivamente.

Note-se, ainda, que na coluna de fluidos (figura 11) é possível seleccionar diferentes fluidos de forma a que o calor específico médio e, caso necessário, o calor de evaporação (mudança de fase) sejam automaticamente calculados. Neste tipo de situação, a pressão deverá ser definida para que as equações termodinâmicas subjacentes possam ser devidamente resolvidas. A coluna referente à proporção de humidade (*Humidity Ratio*) apenas é utilizada quando é seleccionado ar húmido na coluna de fluidos. Existe, também, a possibilidade de definir correntes suaves na coluna “*Soft*”, ou seja, as correntes que saem do sistema para o ambiente. No caso de processos descontínuos, devem utilizar-se as colunas “*tstart*” e “*tstop*” para especificar o espaço de tempo no qual se verifica a existência das correntes relativamente ao início do processo.

Numa fase posterior, devem ser introduzidos na tabela de utilidades (ex.º figura 12), os dados relativos às fontes externas de aquecimento e arrefecimento usadas no processo (fluidos de aquecimento e arrefecimento). Uma vez que as utilidades devem estar sempre disponíveis, não existe a necessidade de especificar os tempos de início (*tstart*) e de fim (*tstop*). Como se pode verificar na figura 12, a opção de seleccionar fluidos diferentes também existe na tabela de utilidades. Como utilidade, a utilização de água (vapor de aquecimento, água de refrigeração) ou refrigerantes (R134a, R717, etc.) é bastante comum. Qualquer processo requer, pelo menos, a utilização de duas utilidades padrão: uma utilidade fria (*Cold Utility*, CU) e uma utilidade quente (*Hot Utility*, HU).

+/-	Name	Hot/Cold	Tin °C	Tout °C	c_p kJ/(kg K)	Phase Change kJ/kg	α W/(m ² K)	Pressure bar(a)	Utility Cost EUR/MWh	Fluid	Humidity Ratio ln kg/kg
	Cooling Water (CU)	Blue arrow	6	12	4.1862	-	2000	3	40.000	Water	-
	Heating Steam (HU)	Red arrow	x1	x0	-	2133.77	5000	4	70.000	Water	-

Figura 12 - Tabela de utilidades de um processo contínuo (tutorial 1, disponível em [PinCH](#))

Meios de condensação ou evaporação podem ser descritos pelo título de vapor (*vapour quality*, x) à entrada e saída do condensador ou evaporador. No caso da figura 12, o vapor de condensação considera apenas a energia de condensação, considerando que x_1 (100% ponto de orvalho) é introduzido na coluna referente à temperatura inicial e x_0 (0% ponto de bolha da água, sendo o ponto de bolha a temperatura para a qual é formada a primeira bolha de vapor quando um líquido composto por dois ou mais componentes é aquecido) na coluna referente à temperatura final. Um teor de vapor de 0,5 (vapor húmido) é representado no PinCH por $x_{0.5}$. Note-se que o título de vapor apenas pode ser definido quando se selecciona água na coluna de fluidos, ou seja, não é aplicável caso se escolha ar húmido ou fluido simples. Deve ainda especificar-se o custo energético associado às utilidades (€/MWh). Os custos das utilidades são utilizados posteriormente para calcular o custo energético anual.

5.4.2 Configuração do Equipamento (Etapa 2)

No PinCH, pelo menos uma necessidade do processo deve ser verificada em cada equipamento. Durante a configuração do equipamento no Explorador de Projecto, existe a opção de criar um equipamento individual ou partilhado. A equipamentos individuais é atribuída apenas uma corrente processual, enquanto que aos partilhados devem ser atribuídas pelo menos duas. Ao atribuir adequadamente as necessidades do processo que ocorrem num mesmo equipamento, a reutilização da área de permutadores de calor pode ser devidamente contabilizada, reduzindo, assim, o custo dos permutadores associados.

Esta etapa é particularmente importante em processos descontínuos. Através da definição do equipamento é possível analisar a sobreposição de lotes consecutivos para que o potencial de recuperação directa de calor seja aumentado. De forma a assegurar a sobreposição, deve garantir-se que nenhum equipamento está a ser utilizado ao mesmo tempo em dois lotes diferentes. Assim, é importante definir os períodos em que o equipamento se encontra bloqueado em tarefas de pré-processamento e pós-processamento (limpeza do equipamento, por exemplo).

O procedimento a desenvolver na configuração do equipamento é sempre o mesmo, embora em processos contínuos não seja necessário especificar os períodos de pré e pós-processamento. Através da figura 13 é possível verificar as propriedades de um dos equipamentos (C100, realçado a azul) de um processo descontínuo com quatro equipamentos individuais. Em cada lote produzido, este equipamento está bloqueado num total de duas horas. Note-se que também é possível especificar o número de vezes que o equipamento está disponível (*“Max. Equipment Items”*), ou seja, para quantos motivos este pode ser utilizado simultaneamente.

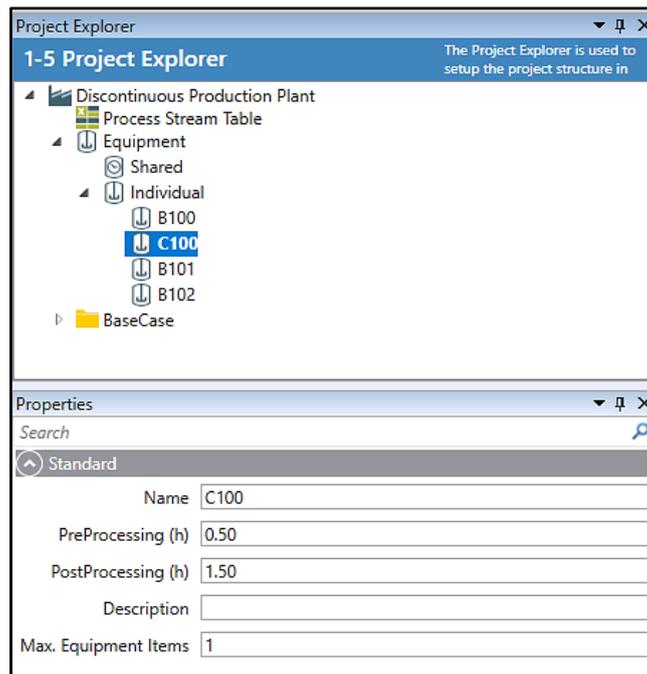


Figura 13 – Explorador de Projecto e Propriedades do equipamento C100 (Tutorial 3, disponível em [PinCH](#))

5.4.3 Definição dos Processos (Etapa 3)

No PinCH é possível alocar as necessidades de aquecimento e arrefecimento, definidas na tabela de correntes processuais (ex.º figura 11), a diferentes processos. Esta tabela apresenta as correntes associadas a um determinado processo. Tanto processos contínuos como descontínuos podem ser criados, contudo, estão limitados a conter correntes do mesmo tipo (contínuas ou descontínuas).

A definição de diferentes processos visa permitir uma optimização energética das operações industriais que têm múltiplos equipamentos espacialmente e tecnicamente independentes. Um processo não é mais do que um “conjunto de correntes processuais”, pelo que a definição de múltiplos processos admite a consideração de diferentes cenários. Por exemplo, os processos podem ser otimizados separadamente, como processos singulares e independentes, ou juntos em grupos diferentes.

Um processo contínuo considera somente um caso operacional, ou seja, o processo opera sempre da mesma forma. Caso mais do que um processo de produção seja definido, existe a possibilidade de definir diferentes casos operacionais (MOC, *Multiple Operating Cases*), que podem ser atribuídos a um grupo para ser utilizado no MOC *supertargeting*. Múltiplos casos operacionais são constantemente utilizados na indústria devido a variações nas condições das necessidades de aquecimento e arrefecimento (ex.º inverno e verão, alteração da matéria prima, etc.). O MOC *supertargeting* fornece novos resultados alvo que consideram a reutilização da área de transferência de calor entre permutadores comuns. Para tal ser exequível, as correntes em casos operacionais consecutivos devem ser primeiramente mapeadas para indicar quais delas estão associadas ao mesmo equipamento. Contudo, note-se que o PinCH não suporta a sobreposição de processos semicontínuos. Sendo assim, é essencial definir o calendário (etapa 4) de forma a que nenhum dos processos com múltiplos casos

operacionais se sobreponha. Caso os processos se sobreponham, o PinCH redefine os tempos de operação para garantir que a sobreposição não ocorra.

5.4.4 Aplicação de Calendarização aos Processos (Etapa 4)

A calendarização é necessária para definir a componente temporal dos processos configurados na etapa 3. Esta etapa é importante para garantir o rigor dos horários de operação e que os custos operacionais resultantes sejam calculados.

No PinCH, os processos contínuos e descontínuos podem ser configurados separadamente. No entanto, para qualquer processo, seja ele contínuo ou descontínuo, a configuração do calendário de produção é semelhante. A figura 14 exemplifica o procedimento subjacente à calendarização de uma unidade de produção contínua com dois casos operacionais (OC *Product C* e OC *Product F*). Os dois casos operacionais ocorrem em intervalos escalonados. A produção decorre anualmente, sem interrupções, durante um total de 7 000 horas. O primeiro caso operacional (OC *Product C*) está activo nas primeiras 3 000 horas e o segundo (OC *Product F*) nas restantes 4 000. Comum a cada tipo de processo, é necessário estabelecer a base temporal (*Timebase*) para a produção, juntamente com o horário de começo correspondente (*Daytime Start*). A base temporal pode ser diária, semanal ou anual.

4 Scheduling																	
The Scheduling is used to position processes in time. Especially for batch processes it's critical to check for overlap and the use of extra items of																	
Continuous Processes																	
+/-	Process	Timebase	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su	Daytime Start hhmm	CW Start week	# Weeks	Duration h	Prod. Campaign Start h	Prod. Campaign End h	Gross Op. Time h/y	Net Op. Time h/y
	Chemical Process																
	OC Product C	Cont. Year	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	07:00	1	-	3'000.00	7.00	3'007.00	3'000.00	3'000.00					
	OC Product F	Cont. Year	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	07:00	19	-	4'000.00	3'031.00	7'031.00	4'000.00	4'000.00					

Figura 14 - Calendarização de um processo químico com dois casos operacionais (tutorial 2, disponível em [PinCH](#))

Na figura 14, a coluna referente ao início da campanha de produção (*Prod. Campaign Start*) especifica o momento em que se inicia o processo relativamente ao começo do ano e a coluna alusiva ao fim da campanha (*Prod. Campaign End*) define o momento em que o processo termina a produção. O tempo de operação bruto (*Gross Op. Time*) indica o tempo operacional do processo, incluindo interrupções (diferença entre *Prod. Campaign Start* e *Prod. Campaign End*). O tempo de operação líquido (*Net Op. Time*) indica o número total de horas anuais em que o processo se encontra efectivamente a produzir (ex.º interrupções durante a noite, fins-de-semana, etc.) e é utilizado para calcular o custo de energia necessário.

Embora não seja obrigatório, para garantir que não existem interrupções na produção, é possível estabelecer a semana do calendário (*CW Start, Calendar Week Start*), o dia semanal e a hora (*Daytime Start*) de início da produção de um caso operacional o mais próximo possível do fim da produção de outro. Para o processo químico descrito, a consecutividade dos casos operacionais é atingida ao estabelecer que a produção do segundo caso operacional (OC *Product F*) tem início na semana 19 (figura 14). A duração dos dois casos operacionais encontra-se bem explícita no diagrama geral de processo (*Overall Process Gantt*) ilustrado na figura 15. Note-se que o segundo caso operacional (OC *Product F*) inicia imediatamente após o segundo terminar (OC *Product C*).

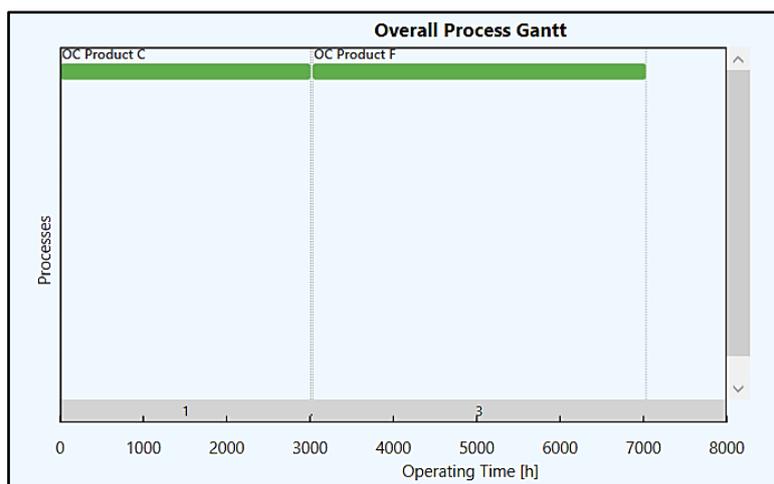


Figura 15 - Diagrama de Gantt de um processo químico com dois casos operacionais (tutorial 2, disponível em [PinCH](#))

Como já foi mencionado nesta secção, no PinCH, a configuração do calendário de produção é semelhante para qualquer tipo de processo. Contudo, os processos descontínuos têm correntes dependentes do tempo. Nesse sentido, um diagrama de Gantt (ex.º figura 16) pode ser utilizado para exibir convenientemente os tempos de existência das correntes no processo e os intervalos de tempo (*Time Slices*, TS) individuais que são criados. Os TS funcionam como múltiplos casos operacionais (MOC) para processos descontínuos (mas numa escala de tempo menor) e representam os períodos nos quais existem necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento. Assim, a possibilidade de recuperação directa de calor entre as correntes presentes nesses intervalos de tempo torna-se mais simples. Contudo, para aumentar a produção, a sobreposição de lotes é bastante recorrente em processos individuais e permite explorar a possibilidade de transferir calor directamente entre lotes diferentes. Assim, pode identificar-se um período de operação repetida do Equipamento (*Equipment-Wise Repeated Operation Period*, EROP) que representa um novo conjunto de TS. O PinCH calcula automaticamente o EROP (e.g. figura 15) com base na quantidade de sobreposição de lotes consecutivos, definida na calendarização. O parâmetro chave para definir a quantidade de sobreposição é a duração de cada ciclo *batch* (*Batch Cycle Duration*, BCD), ou seja, o intervalo de tempo entre lotes consecutivos (ver secção 3.8).

A figura 16 representa o período de operação repetida do equipamento (*Equipment-Wise Repeated Operation Period*, EROP) de um processo com quatro correntes descontínuas (*Solvent*, *Vapor*, *Reaction Mixture* e *Base*), considerando um cenário de sobreposição de lotes. Neste diagrama, que apresenta a ordem cronológica do processo, o eixo horizontal refere-se ao tempo (tempo diário, neste caso em concreto) e ao número e duração de TS. Os TS podem ser seleccionados na barra cinzenta que se encontra na parte inferior do diagrama (figura 16, TS3 ou período de tempo 4).

O EROP especifica após quanto tempo é que os TS identificados irão periodicamente surgir de novo.

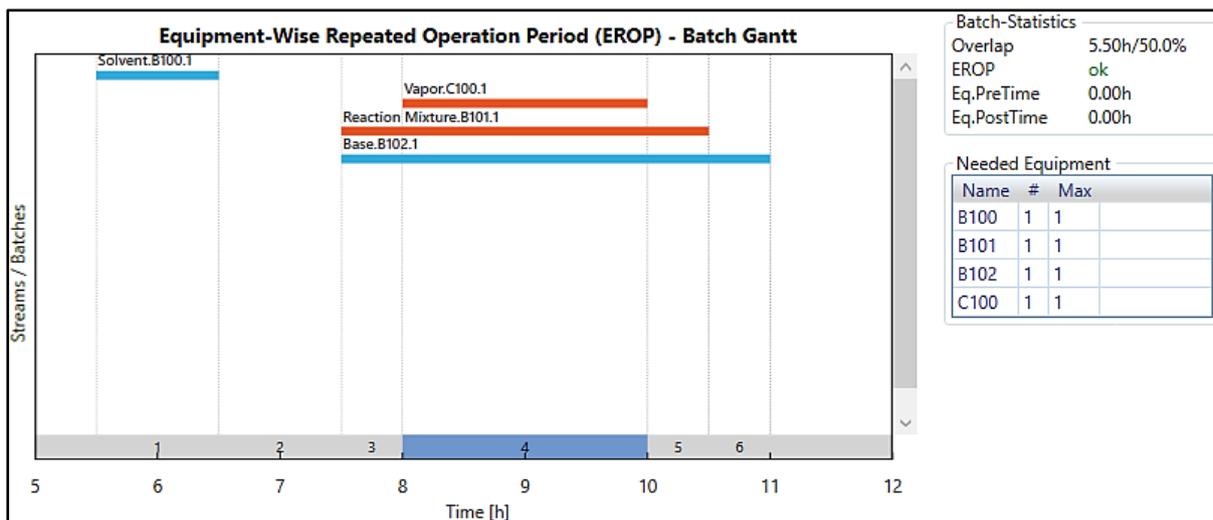


Figura 16 - Período de Operação Repetida do Equipamento (EROP) de um processo descontínuo com sobreposição de lotes (tutorial 3, disponível em [PinCH](#))

Como se pode verificar no EROP ilustrado na figura 16, as correntes “Vapor”, “Reaction Mixture” e “Base” existem simultaneamente no processo. Como tal, existe potencial de recuperação directa de calor. Adicionalmente, no lado direito da figura 16, são apresentados alguns detalhes sobre as estatísticas de lote (*Batch-Statistics*) e sobre o equipamento necessário (*Needed Equipment*) no processo, que complementam a informação apresentada no EROP. Nas estatísticas de lote, pode verificar-se que para um ciclo *batch* (BCD) com duração de 5.50h (cinco horas e meia), correspondente a uma sobreposição (*Overlap*) de 50%, o EROP se encontra identificável (i.e. não é possível identificar o EROP quando lotes não se sobrepõem). Relativamente ao equipamento necessário, é especificado o número de vezes que cada um dos equipamentos é requerido no processo (#), bem como o número máximo de vezes que pode ser utilizado (configurado na etapa 2, secção 5.4.2).

5.4.5 Estabelecimento de Dados Económicos (Etapa 5)

A configuração dos dados económicos é necessária para o cálculo dos valores anuais (€/a) do investimento (C_{Inv}) e do custo operacional (C_{Op}). Posteriormente, através da soma destes dois valores, é possível determinar o custo total (€/a). O custo total (C_{tot}) pode ser então obtido pela seguinte expressão, na qual α é o factor de anuidade:

$$C_{tot} = \alpha \cdot C_{Inv} + C_{Op} \quad \text{sendo} \quad \alpha = \frac{Z \cdot (1 + Z)^n}{(1 + Z)^n - 1} \quad (5.1)$$

A expressão indica, também, que o custo total varia consoante a taxa de rentabilidade (*Interest Rate*, Z) e o tempo de retorno (*Pay off Period*, n) associados ao investimento. O valor destes dois parâmetros pode facilmente ser alterado no PinCH, como se pode verificar na figura 17. O valor da anuidade (*Annuity*), é automaticamente ajustado pelo PinCH quando qualquer um dos parâmetros é alterado.

Amortisation Parameters ?			
Pay Off Period	<input type="text" value="3"/> y	Independent	<input type="text" value="0"/> EUR
Interest Rate	<input type="text" value="6"/> %	Personnel	<input type="text" value="0"/> %/y Investment Costs
Annuity	0.374 1/y	Maintenance	<input type="text" value="0"/> %/y Investment Costs

Figura 17 - Parâmetros de amortização (tutorial 1, disponível em [PinCH](#))

Custos de Investimento

Os dados económicos são utilizados principalmente para o cálculo do custo de investimento da rede de permutadores de calor (C_{HEN}). Esta rede pode incluir diferentes tipos de permutadores de calor (*Heat Exchanger*, HEX), pelo que o PinCH permite a definição de quatro parâmetros de custo distintos, relacionados com o tipo de dispositivo a investir:

- ✓ HEX para troca de calor entre correntes processuais;
- ✓ HEX para troca de calor entre utilidades quentes e correntes processuais;
- ✓ HEX para troca de calor entre utilidades frias e correntes processuais;
- ✓ HEX para troca de calor entre circuitos intermediários (*Intermediate Loops*, ILs) e correntes processuais.

Os custos associados à rede de permutadores de calor (C_{HEN}) são definidos pela soma dos custos individuais de cada permutador (C_{HEX}). Assim, no PinCH, o custo do investimento na rede de permutadores de calor é calculado pela expressão:

$$C_{Inv} = C_{HEX} = \sum_{HEX} C_{HEX} = \sum_{HEX} (C_0 + C_b \cdot (\frac{A_{HEX}}{A_b})^m) \quad (5.2)$$

A equação 5.2 descreve o custo de um permutador com uma área específica de transferência de calor (A_{HEX}), baseado num permutador de referência de custo base (C_b) e de área (A_b). Independentemente do tipo de permutador, os parâmetros de custo são considerados pelo PinCH da seguinte forma:

- ✓ Custo fixo de um permutador de calor, independente da sua área: $C_0 = 0$ €;
- ✓ Custo base de um permutador de calor de referência (b = base): $C_b = 110\,000$ €;
- ✓ Área de um permutador de calor de referência: $A_b = 100$ m²;
- ✓ Factor de regressão: $m = 0,71$.

No PinCH, a área do permutador de calor (A_{HEX}) é calculada de acordo com a expressão 5.3, na qual \dot{Q} e ΔT_m representam a taxa de transferência de calor e a diferença de temperatura média, respectivamente.

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T_m} \quad \text{com} \quad \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5.3)$$

O coeficiente global de transferência de calor (k) é calculado de acordo com os dois coeficientes de transferência de calor α_1 e α_2 (coeficientes de transferência de calor correspondentes a películas finas

de fluido formadas na superfície do permutador), assumindo que a resistência térmica da parede do permutador pode ser considerada desprezível.

Em situações nas quais seja necessário o armazenamento de energia térmica (ex.º processos descontínuos em que as correntes possuem tempos de existência não simultâneos), o custo de investimento associado à rede combinada de permutadores de calor e de armazenamento térmico (*Heat Exchanger and Storage Network*, HESN) deve ser considerado. O custo associado a uma HESN considera o custo de aquisição dos permutadores (descrito pela equação 5.2) e o custo relacionado com o armazenamento de calor (*Heat Storage*, HS). Nestas condições, o custo do investimento (C_{Inv}) é obtido através da seguinte expressão:

$$C_{Inv} = C_{HESN} = \sum_{HEX} C_{HEX} + \sum_{HS} (C_{HS} + C_{SM} + C_{IL})_{HS} \quad (5.4)$$

O valor do custo de armazenamento de calor (descrito pelo segundo somatório da equação 5.3) engloba a soma de três custos individuais distintos: o custo de armazenamento C_{HS} (*Heat Storage*, HS), o custo do meio de armazenamento C_{SM} (*Storage Medium*, SM) e uma quantia fixa C_{IL} (*Intermediate Loop*, IL) por circuito intermediário, independente da capacidade de armazenamento. Os custos C_{HS} e C_{SM} são calculados em função do volume de armazenamento (V) e da massa do meio de armazenamento (m_{SM}), respectivamente:

$$C_{HS} = C_0 + C_b \cdot \left(\frac{V}{V_b}\right)^m \quad (5.5)$$

$$C_{SM} = m_{SM} \cdot c_{SM} \quad (5.6)$$

O PinCH tem predefinidos dois meios de armazenamento de calor: água e óleo de transferência de calor. É possível ajustá-los e definir qual deles se pretende utilizar, tendo em conta que cada um tem o seu custo específico de armazenamento (c_{SM}). Para o armazenamento de energia térmica, os parâmetros de custo padrão considerados pelo PinCH são os seguintes:

- ✓ Custos básicos de HS (independentes do volume de armazenamento): $C_0 = 0$ €;
- ✓ Custo para HS de referência ($b = base$): $C_b = 150\,000$ €;
- ✓ Volume de HS de referência: $V_b = 100$ m³;
- ✓ Expoente de regressão: $m = 0,71$.

Caso ainda sejam integradas no processo unidades de conversão de energia (*Energy Conversion Units*, ECU) adicionais, tais como uma unidade de cogeração ou uma bomba de calor, o PinCH inclui o custo associado a estes equipamentos (C_{ECU}) no cálculo do valor do investimento.

Custos Operacionais

Os custos operacionais anuais C_{Op} (€/a) correspondem apenas aos custos energéticos C_{En} (€/a), dado que os custos com pessoal e despesas de manutenção podem considerar-se insignificantes. O cálculo deste custo depende das horas anuais de operação τ (h/a), da necessidade térmica \dot{Q} (kW) associada à utilização de utilidades quentes (UQ) e frias (UF) e do custo específico c das mesmas (€/kWh).

$$C_{Op} = C_{En} = \tau \cdot (\dot{Q}_{UQ} \cdot c_{UQ} + \dot{Q}_{UF} \cdot c_{UF}) \quad (5.7)$$

Caso a produção solicite múltiplos casos operacionais, os custos de operação (€/a) são compostos pelo somatório do custo individual de cada OC. Nestas condições, o custo C_{Op} é dado pela seguinte expressão:

$$C_{Op} = \sum_{OC} C_{Op,OC} = \sum_{OC} \tau_{OC} \cdot (\dot{Q}_{UQ,OC} \cdot c_{UQ,OC} + \dot{Q}_{UF,OC} \cdot c_{UF,OC}) \quad (5.8)$$

Da mesma forma, mas em processos descontínuos, o valor anual de C_{Op} é dado pela soma dos custos operacionais por TS:

$$C_{Op} = \sum_{TS} C_{Op,TS} = \sum_{TS} \tau_{TS} \cdot (\dot{Q}_{UQ,TS} \cdot c_{UQ,TS} + \dot{Q}_{UF,TS} \cdot c_{UF,TS}) \quad (5.9)$$

5.4.6 Preparação dos Cálculos Referentes às Metas a Atingir (Etapa 6)

Uma vez terminadas as etapas que caracterizam o processo (1 - 5), o PinCH reúne todos as condições (dados processuais e económicos) para proceder com a Análise do Ponto de Estrangulamento. Esta etapa destina-se ao cálculo de novas oportunidades de economizar custos e quantidades de energia consumida. Como tal, torna-se relevante estudar diferentes cenários para determinar a sensibilidade que os resultados possam ter a variações na entrada de dados. Estes cenários podem ser implementados num Grupo de Resultados Alvo (*Target Group*), gerado no Explorador de Resultados Alvo (*Target Explorer*). Várias análises de cenários podem ser realizadas utilizando diferentes combinações de dados (figura 18).

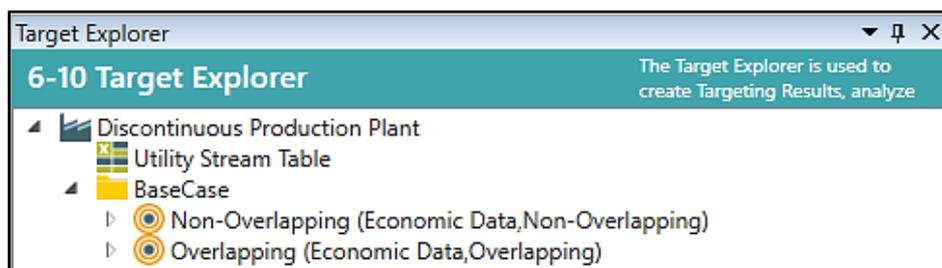


Figura 18 – Explorador de Resultados Alvo (tutorial 3, disponível em [PinCH](#))

Na figura 18 podem ser identificados dois Grupo de Resultados Alvo (*Non-Overlapping* e *Overlapping*), nos quais lhes foram atribuídos os mesmos dados económicos. Contudo, para determinar a sensibilidade dos resultados relativamente ao calendário da produção, foram-lhes atribuídos diferentes casos operacionais. Ao grupo *Non-Overlapping* atribuiu-se o caso operacional que não considera sobreposição de lotes, enquanto que ao grupo *Overlapping* atribuiu-se o cenário que considera sobreposição.

Consoante as combinações de dados (dados económicos, casos operacionais, processos e utilidades), diferentes metas (*targets*) são estabelecidas no PinCH. Caso haja apenas uma utilidade fria ou quente definida, o PinCH atribui-a automaticamente aos Grupos de Resultados Alvo gerados. O mesmo é verificado caso haja apenas um processo definido.

5.4.7 Análise das Metas Energéticas (Etapa 7)

Antes de se prosseguir com o cálculo das metas (*targets*) na etapa 8, é possível analisar detalhadamente o potencial de recuperação de calor para os cenários considerados na etapa anterior. Nesta secção, é realizada uma análise detalhada em relação aos resultados que se pretende obter (*targets*) para a recuperação de calor, sendo que o potencial de recuperação indirecta de calor identificado pode posteriormente ser analisado mais profundamente na etapa 8. No PinCH, a ferramenta de análise das metas energéticas (*Energy Targeting Analysis*, ETA) permite investigar a influência que processos individuais têm no potencial de recuperação de calor, quando vários processos operam paralelamente no mesmo período de tempo. Nesse sentido, a ETA é bastante útil em sistemas complexos, nos quais existem múltiplos casos operacionais que devem ser otimizados. Em processos descontínuos pode, ainda, ser realizada uma análise do potencial de recuperação directa e indirecta de calor. A recuperação directa de calor é normalmente preferível, uma vez que o armazenamento de energia térmica, necessário para a recuperação indirecta de calor, resulta em custos adicionais. A recuperação directa de calor pode ser aumentada através da sobreposição de lotes. Outra vantagem associada à sobreposição de lotes em processos descontínuos é o aumento da produtividade. Contudo, sobrepor lotes restringe a flexibilidade no planeamento da produção. Como tal, torna-se necessário ter todos os aspectos em consideração e perceber o que é mais vantajoso.

Sempre que se inicia uma ETA, o PinCH disponibiliza um novo separador que exhibe três janelas nas quais são representados:

- ✓ Gráficos de Tempo (*Time Charts*): Vários diagramas de Gantt podem ser visualizados. O EROP (ex.º figura 19) é novamente representado, sendo que nesta fase de estudo os TS relevantes para recuperação directa de calor se encontram realçados a verde;
- ✓ Dados relativos aos TS (*TS Data*): É apresentada uma tabela na qual se encontra explícita, para cada TS, a diferença mínima de temperatura (ΔT_{\min}) seleccionada, o potencial de recuperação de calor e as necessidades utilidades externas (kWh);
- ✓ Gráficos relativos aos TS (*TS Charts*): Gráficos relacionados com os TS seleccionados na tabela de “*TS Data*”.

A máxima recuperação de calor possível (directa e indirecta) pode ser estudada pelo Modelo do Tempo Médio (*Time Average Model*, TAM). Neste modelo considera-se o período que recorre ciclicamente e é calculada a média das necessidades de calor de cada corrente ao longo de todo o período. Na figura 19 encontram-se tabelados os dados referentes a cada um dos cinco TS associadas ao EROP do processo descontínuo apresentado anteriormente na etapa 4 (secção 5.4.4).

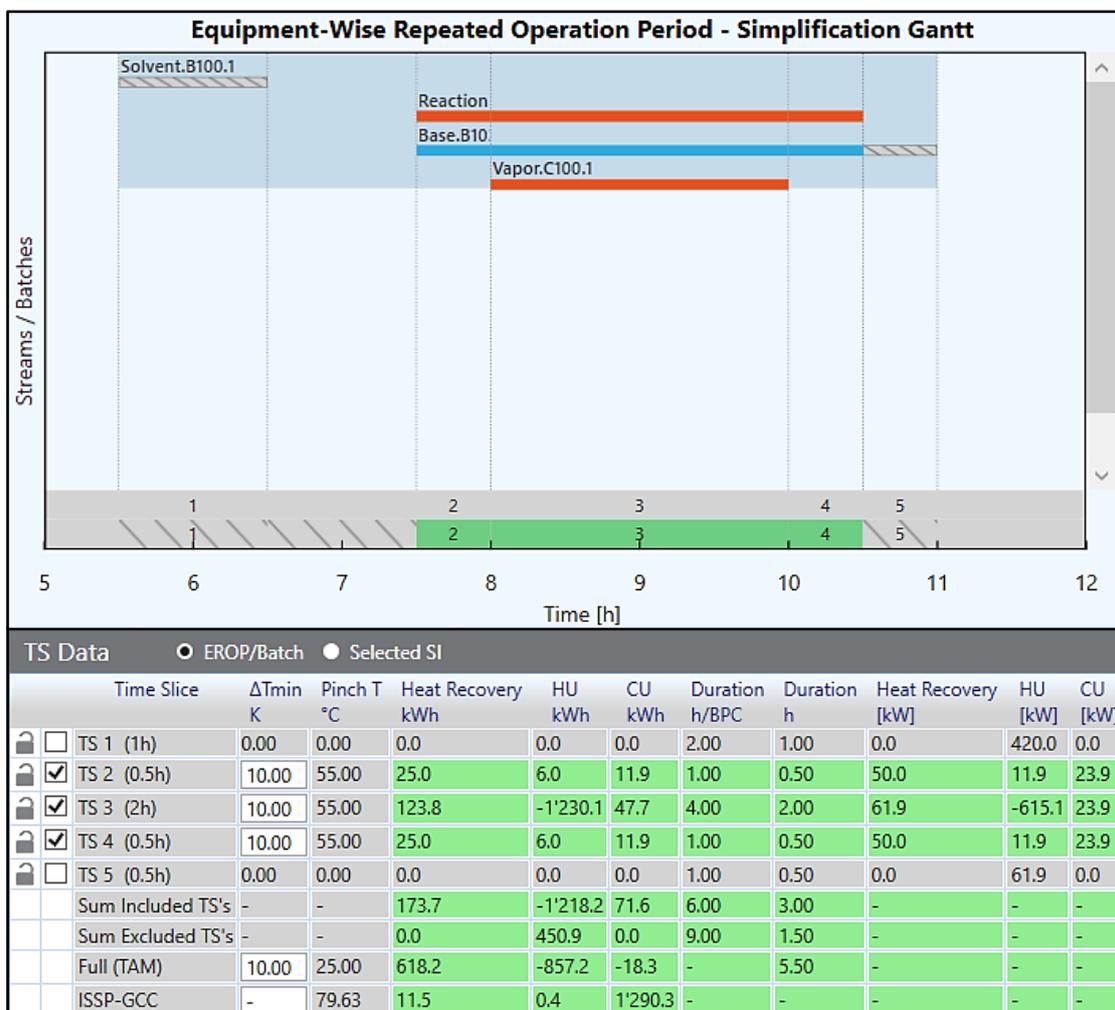


Figura 19 – ETA de um processo descontínuo com sobreposição de lotes (tutorial 3, disponível em [PinCH](#))

Como se pode verificar, apenas os períodos nos quais a recuperação directa de calor é possível estão seleccionados na tabela (TS 2, TS 3, TS 4), o que resulta num isolamento dos mesmos depois no EROP (TS 1 e TS 5 estão excluídos, representados pela cor cinzenta às riscas). O valor da máxima recuperação de calor possível encontra-se explícito na coluna “*Heat Recovery*” (Recuperação de Calor, kWh), correspondente à linha “*Full (TAM)*” (TAM total) da tabela. Esse valor (618.2 kWh/lote) considera ambos os tipos de recuperação de calor (directa e indirecta), sendo que o potencial de recuperação directa de cada TS pode ser interpretado na linha da tabela correspondente ao mesmo, na coluna de recuperação de calor (“*Heat Recovery*”). Neste caso em concreto, o total de recuperação directa de calor é 173.7 kWh/lote (linha “*Sum Included TS's*”, coluna “*Heat Recovery*”). Para se poder identificar

na tabela o valor total do potencial de recuperação indirecta de calor (kWh), na linha “ISSP-GCC”, é necessário que todos os TS estejam seleccionados.

5.4.8 Cálculo das Metas Energéticas e Relativas a Custos (Etapa 8)

Uma característica importante de uma APE é o facto do cálculo das metas (*targets*) ser feito antes de examinar as medidas de recuperação de calor, caso contrário estas seriam altamente influenciadas. A fase de *targeting* realizada nesta etapa 8 tem o propósito de calcular não só os valores óptimos da utilização de utilidades, do potencial de recuperação de calor e da área de transferência de calor a instalar, mas também o número necessário de permutadores de calor a instalar e o custo total anual mínimo associado. No PinCH, o cálculo dos resultados alvo (*Target Result*) pode ser realizado com recurso a três opções diferentes: *design* separado (*Separate Design*), *SuperTargeting* combinado (*Combined SuperTargeting*) ou recuperação indirecta de calor (*Indirect Heat Recovery*).

Num *Design* separado, os principais resultados alvo encontram-se expostos em forma de tabela. É realizada uma análise gráfica muito útil, na qual é possível estudar para cada caso operacional: a variação dos vários custos consoante o ΔT_{\min} escolhido (curvas de custos), o potencial de recuperação de calor (curvas compostas) e a utilização óptima do sistema de utilidades (curvas compostas globais). O cálculo com recurso ao *SuperTargeting* combinado permite prosseguir com o mesmo tipo de estudo elaborado com a utilização de um *design* separado. Contudo, diferentes tipos de *design* (*design* separado, convencional e de sequência repetida) podem ser comparados uns com os outros, de forma a perceber quais os resultados mais vantajosos. O *design* convencional e o de sequência repetida (*resequence*) baseiam-se na utilização de permutadores de calor em múltiplos casos operacionais. Nestas condições, o recurso a um destes dois tipos de *design* permite reduzir o número de permutadores de calor.

O *targeting* para recuperação indirecta de calor é uma das principais componentes que surge no seguimento da versão mais recente do PinCH (3.0) e tem o propósito de integrar o armazenamento de energia térmica no processo através do ISSP. O ISSP baseia-se no TAM, mas avalia a relevância das correntes para recuperação indirecta de calor. A duração e o coeficiente de transferência de calor α (equação 5.3, secção 5.4.5) de cada corrente processual são incorporados nesta ponderação. Quanto mais tempo a corrente existir no processo e quanto maior o seu coeficiente α , maior a sua relevância para a recuperação indirecta de calor. Antes de se seleccionarem as correntes para a recuperação indirecta de calor, torna-se relevante discutir as propriedades do Armazenamento Estratificado (*Stratified Storage*, SS). Na figura 20 encontra-se representado um típico SS geral com três camadas. As correntes quentes são utilizadas para carga e as frias para descarga de calor. O meio de armazenamento é bombeado de uma camada para outra através de um IL e, durante esse processo, é aquecido ou arrefecido no permutador de calor. As temperaturas das camadas devem ser seleccionadas de forma a que as correntes processuais atinjam as temperaturas finais desejadas e que as temperaturas das camadas sejam respeitadas. A temperatura inicial das correntes frias é limitada pela temperatura da camada inferior, enquanto que a das correntes quentes se encontra limitada pela da camada superior. Uma vez que o SS é um armazenamento de calor sensível, a diferença entre as temperaturas das camadas é significativa para a capacidade de armazenamento. Se a diferença de

temperaturas puder ser aumentada através de uma “melhor” seleção das Fontes (*Sources*) e dos Receptores (*Sinks*), torna-se possível armazenar quantidades semelhantes de energia em unidades de armazenamento mais pequenas.

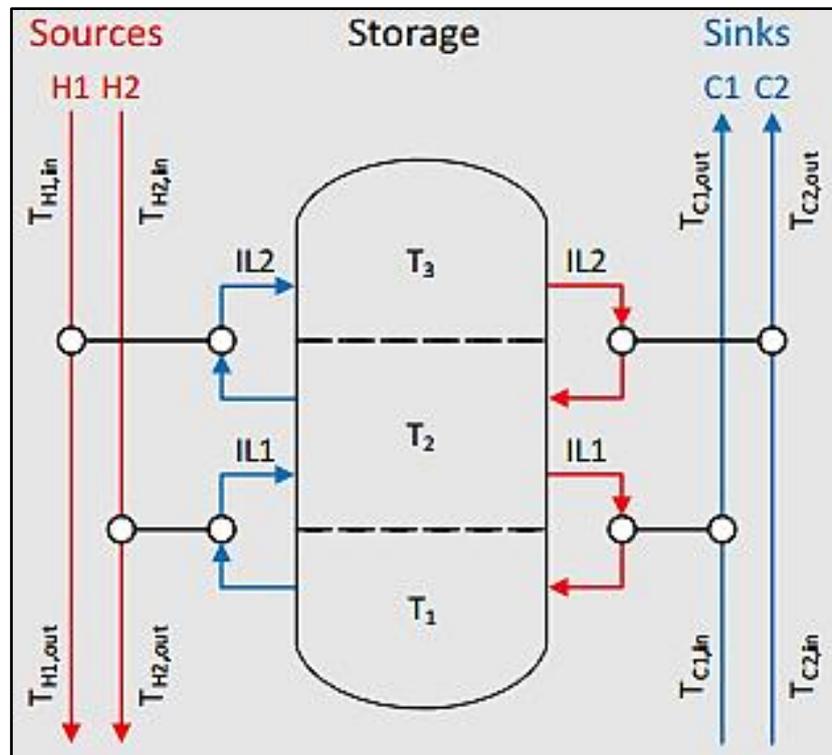


Figura 20 – *Stratified Storage* (SS) geral com três camadas, dois ILs com duas fontes e dois receptores cada (tutorial 4, disponível em [PinCH](#))

A figura 21 representa o ISSP associado ao cenário que não considera sobreposição de lotes do processo de produção descontínuo abordada anteriormente. As curvas azuis e vermelhas indicam as necessidades de aquecimento e arrefecimento e estão deslocadas em termos de temperatura, de acordo com a sua importância para a recuperação de calor. A curva preta entre elas descreve o SS, na qual os pontos azul e vermelho simbolizam a camada fria e camada quente, respectivamente.

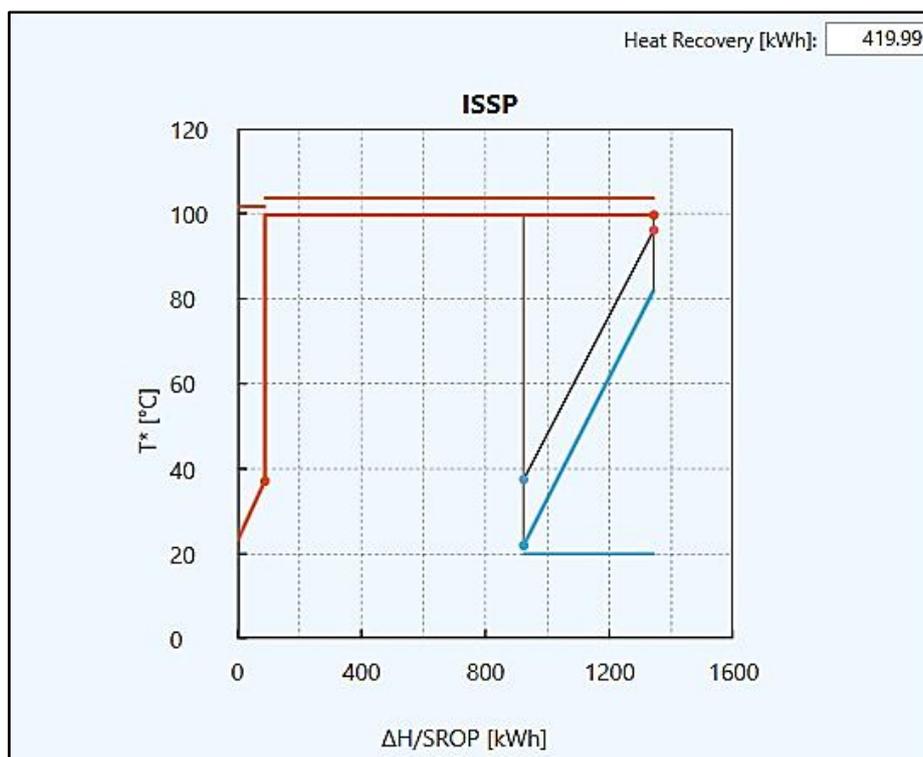


Figura 21 – ISSP (tutorial 4, disponível em [PinCH](#))

A exclusão de correntes na análise de recuperação indirecta de calor pode ser feita no PinCH através das tabelas de fontes e de receptores (*Sources and Sinks*) representadas pelas figuras 22 e 23, respectivamente. Como se pode verificar na figura 23, as correntes “Base, TS3” e “Base, TS4” não estão seleccionadas. A corrente “Base, TS3” foi excluída pois iria limitar significativamente a temperatura da camada inferior no SS, dada a sua temperatura de entrada (T_{in}^*) ser elevada comparada com as duas outras correntes (“Base, TS4” e “Solvente”). Caso esta corrente não fosse excluída, a unidade de armazenamento a instalar, para uma mesma capacidade de armazenamento, teria de ser bastante maior. Sem esta corrente, a temperatura da camada inferior pode ser teoricamente reduzida até 22°C. De forma a reduzir mais um circuito intermediário (IL), considerando a reduzida quantidade de calor (30,97 kWh), a corrente “Base, TS4” foi, também, excluída. Assim, neste caso em concreto, a quantidade de recuperação de calor que o armazenamento deve cobrir é 420 kWh (canto superior direito da figura 21), correspondente à necessidade de calor total da corrente “Solvente”.

Sources							
	Stream	T_{in}^* °C	T_{Out}^* °C	ΔH [kWh]	ΔT_{mins} K	Equipment	Info
<input checked="" type="checkbox"/>	Vapor	99.63	99.63	1254.03	0	C100	T T PC
<input checked="" type="checkbox"/>	Reaction Mixture	37.10	23.00	89.13	-2	B101	

Figura 22 - Tabela de fontes (tutorial 4, disponível em [PinCH](#))

Sinks							
	Stream	TIn* °C	TOut* °C	ΔH [kWh]	ΔT_{mins} K	Equipment	Info
<input checked="" type="checkbox"/>	Solvent	22.00	82.00	420.00	+2	B100	T
<input type="checkbox"/>	Base, TS3	47.00	62.00	53.60	+2	B102	
<input type="checkbox"/>	Base, TS4	10.00	62.00	30.97	+2	B102	

Figura 23 - Tabela de receptores (tutorial 4, disponível em [PinCH](#))

Após esta análise, o PinCH calcula automaticamente as metas (targets). Estes valores podem ser verificados na tabela de custos (*Savings/Costs*), referentes exclusivamente ao armazenamento de calor, ilustrada na figura 24. Com a integração de SS, a unidade de produção descontínua, pode poupar 241 914 kWh anualmente. Associado a esta opção está um investimento total de 79 689 € (incluindo a instalação de dois permutadores de calor, correspondente a uma área de transferência de calor de 33 m²), que resulta numa redução anual de 26 610 €/ano (7 257 + 19 353) nos custos operacionais (utilidades).

Savings/Costs (Heat storage system only)						
#IL	Utility savings [EUR/y]		HR/y [kWh/y]	Total costs		IL fix costs [EUR]
	cold	hot		[EUR/y]	EUR	
#1.1	7'257	19'353	241'914	18'726	79'014	0
Sum	7'257	19'353	241'914	18'726	79'014	0

Figura 24 - Tabela de custos (tutorial 4, disponível em [PinCH](#))

O PinCH disponibiliza, ainda, uma análise de limitação de capacidade com o intuito de calcular qual a recuperação de calor possível quando o volume de armazenamento é limitado. Nesta análise é possível definir o volume e obter a recuperação de calor possível tanto em kilowatt hora como em percentagem. É, também, possível visualizar o perfil térmico de carga e descarga baseado no período de operação repetida de uma corrente (*One-Stream Repeated Operation Period, SROP*), que indica o volume das camadas de armazenamento ao longo do tempo. Através do ISSP, a computação deste perfil resulta da alocação directa das correntes a cada circuito intermediário juntamente com a sequência das mesmas durante o período de repetição.

5.4.9 Integração de Unidades de Conversão de Energia (Etapa 9)

Em vários processos industriais, as necessidades de aquecimento e arrefecimento permanecem elevadas depois de serem implementadas medidas de recuperação de calor. Nestas situações, vale a pena averiguar a possibilidade de integrar unidades de conversão de energia (ECU's). Uma ECU é uma técnica utilizada para transformar energia de menor qualidade (menor temperatura) em energia de maior qualidade (maior temperatura), de forma a melhorar a eficiência energética. Esta transformação permite uma melhor integração de calor residual num processo. A APE tem um papel bastante importante na percepção da utilidade que a integração de uma ECU pode vir a ter.

A versão mais recente do PinCH (3.0) permite a adição de unidades de conversão de energia a cada caso operacional (OC) ou TS de um resultado alvo (*Target Result*) individual, calculado na etapa anterior. Contudo, apenas um tipo de ECU pode ser aplicado a cada OC/TS. As principais unidades de conversão de energia incluídas no PinCH são: bombas de calor, recompressão mecânica de vapor, recompressão térmica de vapor, motor de combustão interna e ciclos orgânicos de Rankine (ORC). Embora um motor de combustão interna não seja propriamente uma ECU, foi incluído como sendo uma.

Ao cálculo económico de cada ECU está associada uma equação de custo padrão versus capacidade, expressa como uma lei de potência em função da capacidade (figura 25).

$$C = \left[a + \left(C_b \cdot \left(\frac{Q}{Q_b} \right)^m \cdot f_m \cdot f_p \cdot f_T \cdot f_I \cdot \left(\frac{Index}{Index (Base)} \right) \right) \right]$$

Figura 25 – Equação do custo de investimento de uma ECU (interface do PinCH 3.0)

O investimento (C) de uma ECU varia consoante a componente do custo fixo do mesmo (α), o custo base (C_b), o índice de custo (Index) e, também, consoante os factores dos materiais de construção (f_m), de pressão (f_p), de temperatura (f_T) e de instalação (f_I). Cada tipo de ECU tem um parâmetro exclusivo de quantidade base de custo (Q_b) diferente:

- ✓ Bomba de calor: energia eléctrica do compressor (kW);
- ✓ Motor de combustão interna: energia eléctrica gerada pelo motor (kW);
- ✓ Recompressão mecânica de vapor: energia eléctrica do compressor (kW);
- ✓ Recompressão térmica de vapor: taxa total do fluxo de massa do vapor (kg/s);
- ✓ Ciclo orgânico de Rankine: energia eléctrica gerada (kW).

Os custos de investimento em bombas de calor, recompressão mecânica de vapor e recompressão térmica de vapor não incluem gastos em permutadores de calor, uma vez que são considerados no cálculo da área de transferência de calor óptima na etapa anterior. Relativamente ao motor de combustão interna, um factor de custo foi incluído com base em dados relativos a uma unidade CHP que utiliza gás natural. Neste tipo de ECU, os factores f_m , f_p e f_T não são aplicados.

5.4.10 Design da Rede de Permutadores de Calor (Etapa 10)

A última etapa no PinCH envolve o *design* de uma rede que respeite o Mínimo de Energia Requerida (MER) e que represente a rede de permutadores de calor (MER HEN), correspondente às necessidades mínimas de energia. A MER HEN identifica quais as correntes processuais que devem ser conectadas umas às outras e por que ordem. No caso de processos descontínuos é, também, possível optar por prosseguir com o *design* de uma rede combinada de permutadores de calor e de armazenamento térmico (HESN), que não tem de ser elaborada da mesma forma que uma HEN convencional. A informação relativa à fase de *targeting* define todas as ligações (entre as correntes e os permutadores

com armazenamento de energia térmica) e posteriormente PinCH pode apenas exibir automaticamente a HESN, sem esta ter de ser construída (o mesmo não acontece numa HEN). Assim, para criar uma HESN apenas é necessário seleccionar a opção de que permite exibi-la, no resultado alvo (com ISSP) previamente calculado. A HESN para integração de armazenamento associada ao ISSP descrito na etapa 8 encontra-se representada na figura 26. Note-se que as correntes “Reaction Mixture” e “Base” não se encontram conectadas ao armazenamento.

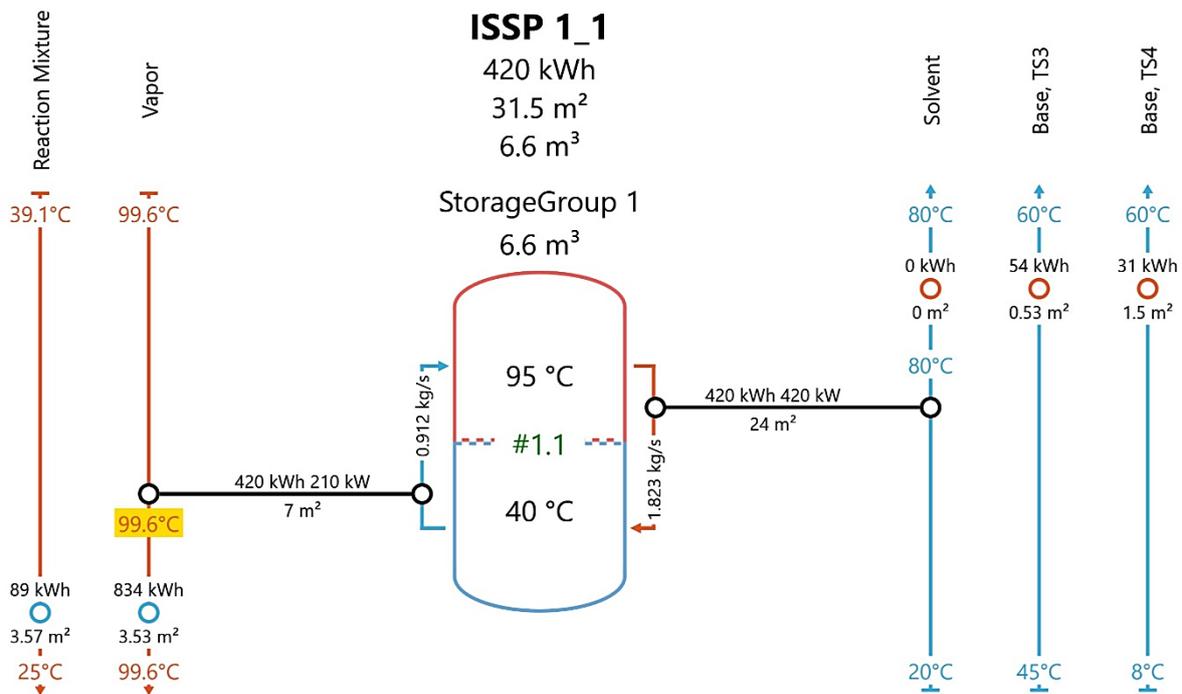


Figura 26 - HESN para o processo otimizado (tutorial 4, disponível em PinCH)

Relativamente a uma MER HEN, a temperatura do ponto de estrangulamento (PE) divide-a em dois subsistemas (zona acima e abaixo do PE). Durante o processo de construção da MER HEN, estes dois subsistemas devem ser abordados separadamente, sendo que o PinCH não permite a violação das seguintes três regras principais da APE:

1. Não pode existir transferência de calor através do PE;
2. Não pode existir arrefecimento externo (UF) acima do PE;
3. Não pode existir aquecimento externo (UQ) abaixo do PE.

Uma vez construída a rede MER, é possível comparar numa tabela os valores referentes às metas propostas na etapa 8 com os valores obtidos com o novo *design*. A possibilidade dos custos de investimento associados ao *design* da nova HEN diferirem substancialmente dos valores obtidos no cálculo das metas está relacionada com o facto de ocorrer transferência de calor não vertical (figura 27).

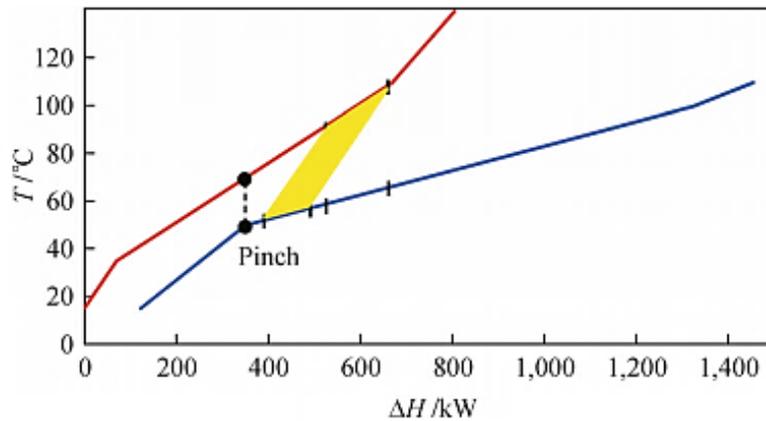


Figura 27 - Transferência de calor não vertical (Nemet et al., 2015)

Para verificar essa situação, o PinCH disponibiliza os gráficos de força motriz (*Driving Force Plots*) de cada permutador de calor presente na HEN. Assim, é possível aceder a uma nova janela no qual todos os permutadores de calor e todos os detalhes necessários para a devida análise estão listados em forma de tabela. Ao seleccionar cada permutador de calor na tabela, podem ser interpretados dois tipos de gráficos:

- ✓ Um gráfico ($T/\Delta\dot{H}$) que representa as duas correntes individuais que se conectam através do respectivo permutador;
- ✓ Um gráfico da força motriz que indica a diferença de temperatura num permutador de calor como função da variação de temperatura da corrente fria.

A optimização da HEN com o recurso ao gráfico da força motriz obtém uma área de transferência de calor mínima. Para optimizar a força motriz, a capacidade calorífica média (CP) da respectiva corrente processual deve ser ajustada. Este procedimento apenas é possível através de uma maior divisão das correntes ou recomeçando o *design* (transferência de calor para outras correntes).

6 Caso de Estudo Industrial

O propósito deste capítulo é apresentar um estudo, sobre o potencial de recuperação de calor de uma empresa industrial, que reúna as condições necessárias à Análise do Ponto de Estrangulamento utilizada na ferramenta PinCH. De forma a elaborar um estudo com dados reais, estabeleceu-se o contacto presencial com uma empresa inserida na indústria alimentar e de bebidas. Esta empresa pertence ao sector das carnes e produtos cárneos, sendo que daqui em diante, por motivos de confidencialidade de dados, passar-se-á a chamar de “CarneMestra”.

Infelizmente, os dados fornecidos pela “CarneMestra” não reúnem todas as condições necessárias para uma Análise do Ponto de Estrangulamento. Assim, tornou-se necessário complementar este capítulo com a inclusão de um segundo caso de estudo. Nesse sentido, de forma a expor claramente os resultados práticos da aplicação do PinCH a uma indústria, foi realizada uma adaptação/recriação de um caso de estudo presente nos tutoriais de aprendizagem do mesmo. Este segundo caso de estudo está relacionado com a produção de sal nutritivo utilizado na indústria de fertilizantes.

6.1 Indústria de Carnes

A “CarneMestra” é uma empresa do sector das carnes e produtos cárneos que se especializa essencialmente no abate de porcos e no processo de desmancha da carne dos mesmos. Tanto o processo de abate como o de desmancha são actividades que decorrem durante toda a manhã. Uma vez que se trata de uma indústria na qual a higiene e a segurança alimentar são uma das principais preocupações, a “CarneMestra” dedica todo o período da tarde (até fecho das instalações) à lavagem e higienização das salas e dos equipamentos. Nesse sentido, o consumo de água quente associado a estas tarefas é muito elevado. Contudo, são tarefas essenciais pois os equipamentos e as salas devem estar limpos para que se possa dar início ao processo de desmancha no dia seguinte.

O caso de estudo sobre a “CarneMestra” está associado ao circuito de distribuição de vapor produzido na central térmica da empresa.

6.1.1 Central de Produção de Vapor

Para produzir vapor, a “CarneMestra” utiliza uma caldeira Ambitermo SBM-C2800 que trabalha de forma contínua. Uma vez que a caldeira trabalha entre dez e catorze horas diariamente, de segunda a sexta-feira (5 dias por semana), assume-se que, por mês, esta deverá ter cerca de 240 horas de funcionamento ($12h \times 20 \text{ dias}$). A central térmica é a única unidade de consumo de gás natural da empresa, pelo que o consumo total de gás natural está exclusivamente relacionado com a alimentação da caldeira.

Na tabela 3 encontram-se registados os valores absolutos (metros cúbicos e toneladas equivalentes de petróleo) e específicos (quilogramas equivalentes de petróleo por tonelada de vapor produzido) de gás natural consumido em cada mês do ano 2018.

✓ Tabela 3 - Consumo de gás natural relativo ao ano de 2018

<i>Consumo mensal de Gás Natural (2018)</i>			
	Absoluto		Específico
	m ³	tep	Kgep/ton
<i>Janeiro</i>	10 601	9,6	2,72
<i>Fevereiro</i>	10 085	9,1	3,16
<i>Março</i>	10 000	9,1	2,95
<i>Abril</i>	8 945	8,1	2,92
<i>Maio</i>	8 735	7,9	2,95
<i>Junho</i>	7 909	7,2	2,63
<i>Julho</i>	7 964	7,2	2,57
<i>Agosto</i>	8 632	7,8	2,59
<i>Setembro</i>	7 211	6,5	2,38
<i>Outubro</i>	9 188	8,3	2,76
<i>Novembro</i>	8 810	8,0	2,41
<i>Dezembro</i>	7 455	6,7	2,60

Assume-se que os valores de consumo volumétrico (m^3) listados na tabela 3 reportam gás natural nas condições de pressão e temperatura normais (PTN). Uma vez que a composição final do gás natural varia de acordo com a sua proveniência e mistura, a distribuição da percentagem molar das substâncias presentes na mesma é assumida. A tabela 4 apresenta a composição do combustível que entra na caldeira de acordo com valores médios nacionais.

✓ Tabela 4 - Composição e peso molecular do gás natural

<i>Substância</i>	<i>% molar</i>	<i>Peso Molecular (g/mol)</i>
<i>Metano (CH₄)</i>	87,885	16,043
<i>Etano (C₂H₆)</i>	8,056	30,070
<i>Propano (C₃H₈)</i>	1,378	44,097
<i>Isobutano (C₄H₁₀)</i>	0,108	58,124
<i>n-Butano (C₄H₁₀)</i>	0,158	58,124
<i>Isopentano (C₅H₁₂)</i>	0,022	72,151
<i>n-pentano (C₅H₁₂)</i>	0,018	72,151
<i>n-hexano (C₆H₁₄)</i>	0,02	86,178
<i>Azoto (N₂)</i>	1,088	28,0134
<i>Dióxido de Carbono (CO₂)</i>	1,266	44,01
<i>Total (Gás Natural)</i>	100,00	18,192

Perante as condições PTN ($T = 273,15 K$ e $P = 1 atm$), a quantidade de substância (número de moles) do gás natural consumido na caldeira (m^3) é dada pela equação de estado, também conhecida como lei dos gases perfeitos:

$$PV = nRT \quad (6.1)$$

Sendo R a constante dos gases perfeitos ($m^3 \cdot atm \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$), conclui-se que a cada m^3 de gás natural consumido estão associadas 44,614 mol:

$$n = \frac{1 m^3 \times 1 atm}{8,206 \times 10^{-5} (m^3 \cdot atm \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}) \times 273,15 K} = 44,614 mol$$

Sabe-se, ainda, que o peso molecular do gás natural calculado na tabela 4 é 18,192 g/mol. Facilmente se obtém a massa equivalente a 1 m^3 de gás natural consumido:

$$44,614 mol \times 18,192 \frac{g}{mol} = 811,619 g = 0,812 kg/m^3$$

A utilização deste valor (0,812 kg) como factor de conversão dos consumos mensais em m^3 (apresentados na tabela 3) para quilograma (kg) permite, posteriormente, o cálculo do caudal mássico do gás natural que entra na caldeira (kg/h). A tabela 5 indica os valores mensais do consumo de gás natural em quilogramas (kg).

✓ Tabela 5 - Consumo mensal de gás natural em quilogramas (2018)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
kg	8608	8189	8120	7263	7093	6422	6467	7009	5855	7461	7154	6054	85695

Sabendo que a caldeira trabalha 240 horas todos os meses e que o consumo mensal médio de gás natural é 7 141 kg (85695 kg/12 meses), obtém-se um caudal de 29,76 kg/h (7 141 kg/240 h).

Relativamente a 2018, o caudal volumétrico de água fresca (m^3/dia) consumido pela caldeira de vapor foi registado diariamente pela “CarneMestra”. O consumo foi controlado ao longo dos 248 dias úteis (dias de funcionamento da caldeira) do ano, sendo que o caudal total verificado em cada mês ($m^3/mês$) se encontra exposto na tabela 6.

✓ Tabela 6 – Caudal de água fresca consumida pela caldeira em 2018 (m^3)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
m^3	80,0	78,0	85,0	57,0	65,0	16,0	93,0	107,0	97,0	102,0	79,0	68,0	927,0
dias	22	19	21	20	22	19	21	22	20	23	21	18	248

Facilmente se conclui que, por dia de funcionamento, a caldeira consome em média 3,7 m^3 de água fresca (927 m^3 /248 dias). Assim, considerando que a caldeira trabalha doze horas por dia (em média), o caudal de água fresca consumido por hora é 0,31 m^3/h .

Sabe-se, ainda, que o rendimento médio (eficiência) da caldeira é $\eta = 84,9\%$, considerando que:

✓ A pressão média para o vapor produzido é de 6 bar, (que corresponde a $h_v = 2 756,8 kJ/kg$);

- ✓ A temperatura da água de alimentação é de 18°C (que corresponde a $h_a = 75,5 \text{ kJ/kg}$);
- ✓ Energia necessária para produzir 1kg de vapor é $2 681,3 \text{ kJ/kg}$ ($h_v - h_a$);
- ✓ O PCI (poder calorífico) do combustível (gás natural) é igual a $45 110 \text{ kJ/kg}$.

É possível calcular o vapor que a caldeira produz por hora (kg/h) através da equação 6.1, na qual m_a e m_c são as massas de água evaporada e de combustível usado na evaporação, respectivamente.

$$\frac{m_a}{m_c} = \frac{PCI \times \eta}{(h_v - h_a)} \quad (6.1)$$

Assim, utilizando os valores acima apresentados, conclui-se que o caudal de vapor produzido é:

$$m_a = \frac{29,76 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 45 110 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0,849}{2 681,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 425,1 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

6.1.2 Descrição do Processo

Como se pode observar no diagrama de processos (figura 28), o vapor produzido pela caldeira é recolhido por um colector que, posteriormente, o distribui em simultâneo para duas linhas de produção distintas. Cerca de 70% do vapor segue para a lavagem dos equipamentos que foram utilizados durante a desmancha da carne. Os restantes 30% seguem para um sistema de águas quentes sanitárias (AQS), com o propósito de aquecer a água que os trabalhadores utilizam para lavar as mãos. Em ambas as linhas de produção, o vapor retorna à caldeira sob a forma de condensado.

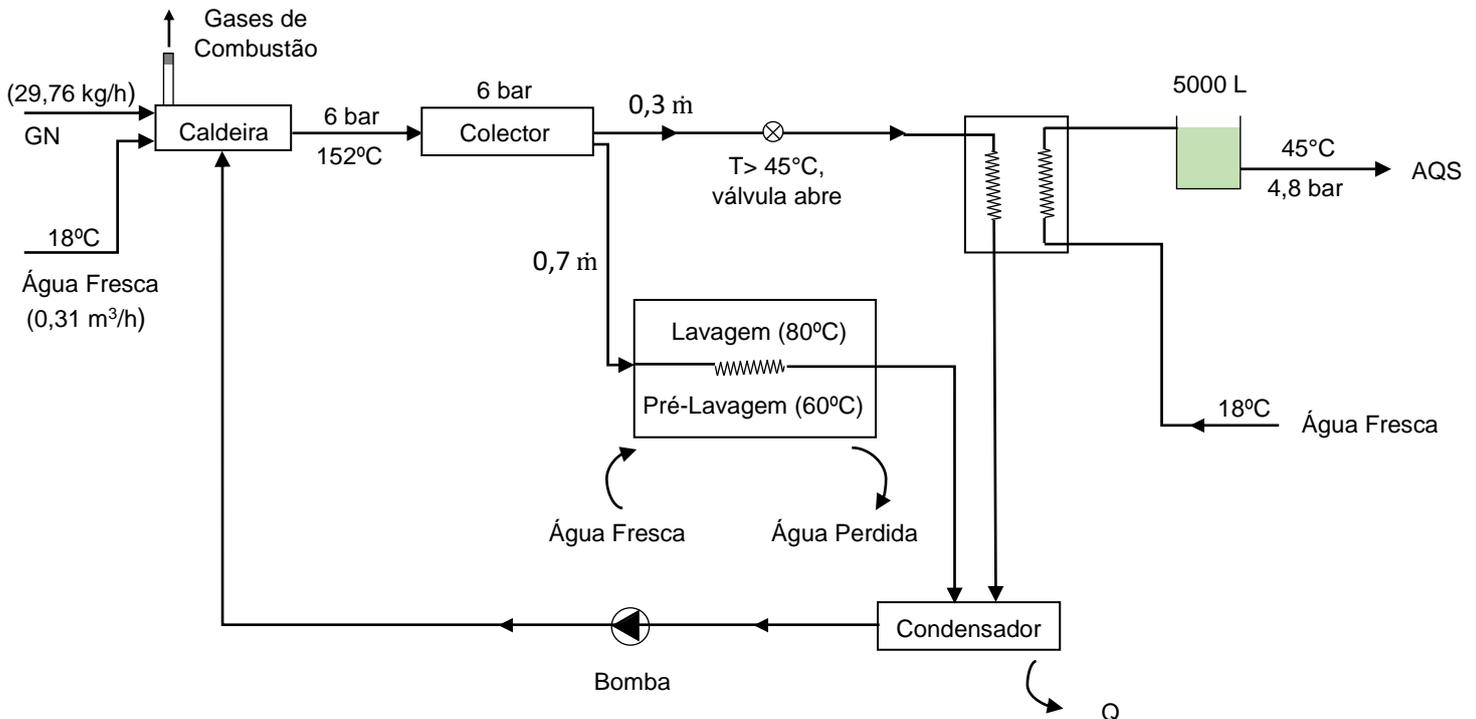


Figura 28 - Diagrama de Processos

6.1.3 Necessidades Processuais

O vapor produzido (utilidade quente) tem o propósito de aquecer duas correntes frias. Contudo, não existem correntes quentes, pelo que o processo descrito na secção anterior (6.1.2) apenas apresenta necessidades de aquecimento (figura 28). Uma vez que não existem necessidades de arrefecimento, a hipótese de permuta de calor entre correntes torna-se impossível. Como tal, o estudo de integração energética fica sem efeito.

Por outro lado, a caldeira emite gases durante a combustão do gás natural que estão a ser desperdiçados e estão a poluir o ambiente. A “CarneMestra” não está a tirar proveito do potencial dos mesmos para fins de aquecimento, uma vez que estes representam uma boa fonte de calor. Nesse sentido, sugere-se que a empresa considere o aproveitamento dos gases de combustão. Assim, não só poderá equacionar a possibilidade de aquecimento de uma oficina (presente nas suas instalações) cuja temperatura é muito baixa, como poderá, também, reduzir a sua pegada ecológica.

Conclui-se, assim, que não existem condições para se realizar uma Análise do Ponto de Estrangulamento, pelo que a utilização da ferramenta PinCH a este caso não é uma mais valia.

6.2 Produção de Sal Nutritivo para Fertilizantes

As plantas contêm praticamente todos os noventa e dois (92) elementos naturais, sendo que dezassete dos quais são identificados como sendo nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. Estes nutrientes são obtidos pelas plantas através do solo, resíduos provenientes de animais e de plantas ou através de fertilizantes minerais. O carbono, hidrogénio e oxigénio são três dos nutrientes essenciais que são utilizados em grande quantidade pelas plantas e lhes são fornecidos pelo ar e água. Os restantes são elementos minerais que as plantas obtêm no solo através das suas raízes.

O solo, por si só, já fornece às plantas a grande maioria de azoto (N), fósforo (P) e potássio (K), os três principais macronutrientes que estas necessitam. Ainda assim, dadas as grandes necessidades que as colheitas apresentam no que diz respeito a estes macronutrientes, múltiplos fertilizantes minerais são desenvolvidos com o intuito de os suplementar. Os fertilizantes distinguem-se consoante o conteúdo dos três principais macronutrientes. O conteúdo de nutrientes, ou grau, pode referir-se tanto ao conteúdo total como ao disponível, podendo ser expresso para alguns nutrientes sob a forma de óxido (P_2O_5 , K_2O) ou na forma elementar (N, P, K). Por exemplo, um grau de 7-28-14 indica que o conteúdo do fertilizante contém 7% N, 28% P_2O_5 e 14% K_2O (Reetz, 2016).

A evaporação e a cristalização são técnicas muito comuns nesta indústria, sendo que a utilização das mesmas na síntese de fertilizantes N, P e K pode ter inúmeras aplicações. A selecção do processo é influenciada pelos tipos de matéria prima, da qualidade do produto final desejada, do comportamento físico dos materiais e dos critérios específicos do projecto. Uma das diferentes opções processuais abrangida neste tipo de técnicas é a cristalização por arrefecimento. Este tipo de cristalização é utilizado quando determinados compostos, cuja solubilidade depende da temperatura, precipitam facilmente em cristalizadores de arrefecimento. A cristalização por arrefecimento é extremamente comum em processos de mineração para produção de cloreto de potássio (KCl). Relativamente a este tipo de processos, a evaporação é utilizada como tratamento inicial para remover o cloreto de sódio (NaCl) presente na silvinita, o minério originalmente extraído (Bourgier et al., 2017).

6.2.1 Descrição do Processo Produtivo

Para produzir sal nutritivo, utilizado na composição de fertilizantes com múltiplos nutrientes (N, P e K), uma unidade de produção industrial recorre a um processo descontínuo que envolve três etapas: dissolução, evaporação e cristalização por arrefecimento (figura 29). Uma vez que a unidade em questão já utiliza o mesmo processo há vários anos, decidiu-se que o melhor seria avaliar novas opções de optimização do mesmo. Dado ser uma unidade de produção já existente, assume-se que a mesma já foi totalmente depreciada. Assim, as únicas despesas incorridas anualmente pela fábrica a considerar são os custos associados à utilização de utilidades (custos operacionais).

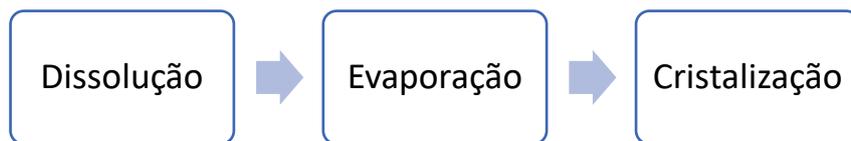


Figura 29 - Esquema sequencial das etapas do processo

- 1. Dissolução:** Uma reacção de dissolução ocorre num tanque de mistura. Nesta reacção, um sal inorgânico (2,5t) à temperatura ambiente é dissolvido num solvente aquoso (água), sendo que este processo é endotérmico. O solvente (7t por lote) é pré-aquecido para 75°C antes de ser colocado no tanque de mistura de forma a que este atinja uma temperatura que lhe permita, com pouca quantidade do mesmo, solubilizar várias toneladas de matéria prima (sal inorgânico). O facto de se gastar energia para se dissolver o sal inorgânico (reacção endotérmica) faz com que a temperatura da solução, à saída do tanque, seja inferior (55°C).
- 2. Evaporação:** Enquanto a solução proveniente do tanque entra no evaporador (encamisado lateralmente) a 55°C, uma tonelada e meia (1,5t) de um aditivo é acrescentada à formação do sal nutritivo. O aditivo fará com que a precipitação não ocorra durante a etapa de evaporação. Posteriormente, é injectado vapor (UQ) na camisa lateral até se evaporar água suficiente para concentrar a solução. Um total de uma tonelada e meia (1,5t) de água é evaporada, sendo que depois o vapor é condensado com o recurso a água de arrefecimento (UF). Depois de concentrar a solução, mantendo tudo dissolvido, esta é arrefecida com água (UF) através da camisa lateral, passando de 100°C para 65°C, sendo posteriormente adicionada ao tanque de drenagem. O tanque de drenagem (tanque tampão) é utilizado para manter a solução à temperatura desejada (65°C), sem que esta precipite, uma vez que a etapa de cristalização (etapa seguinte) é um processo contínuo integrado num processo descontínuo.
- 3. Cristalização:** O sal nutritivo vai ser extraído sob a forma de cristais puros através da etapa de cristalização, assumindo que não existe coprecipitação de impurezas e do aditivo acrescentado e que, portanto, não são necessários processos subsequentes de lavagem e de recristalização. Antes de entrar no cristalizador, o concentrado proveniente do tanque de drenagem é pré-arrefecido para 19°C (UF). Primeiro, duas toneladas e meia (2,5t) de sementes de pequenos cristais são adicionadas ao cristalizador de forma a induzir a formação de núcleos de cristalização, sobre os quais, mais tarde, irá crescer o precipitado. O processo de cristalização começa após a

introdução das sementes, enquanto se dá o arrefecimento por recirculação. Posteriormente, quando os núcleos estiverem formados, o arrefecimento (UF) é intensificado para 7°C e, ao mesmo tempo, o concentrado proveniente do tanque de drenagem é adicionado lentamente ao cristalizador. Para não exceder a capacidade do mesmo, enquanto o concentrado vai sendo adicionado, a suspensão de cristais já formados e o licor vão sendo removidos. Uma vez utilizada toda a solução proveniente do tanque de drenagem, a cristalização é interrompida. Contudo, a suspensão de cristais e o licor continuam a ser removidos até o cristalizador estar vazio. O licor (6t por lote) é depois aquecido (UQ) de 7°C para 65°C para posterior processamento ao longo do processo de remoção.

6.2.2 Dados Processuais

As quantidades (toneladas) por cada lote produzido, os calores específicos médios e os coeficientes de transferência de calor referentes às várias substâncias intervenientes no processo encontram-se sumarizados na tabela 7.

✓ Tabela 7 - Quantidades por lote, calores específicos médios e coeficientes de transferência de calor

Substância	m (t)	c_p [kJ/(kg K)]	α [W/(m ² K)]
Solvente (água)	7,0	4,18	1 000
Aditivo	1,5	1,60	1 500
Concentrado	9,5	3,25	400
Suspensão de Cristais	3,5	2,85	250
Licor	6,0	2,85	600

As utilidades disponíveis para aquecimento e arrefecimento das correntes processuais, referidas ao longo da descrição das três etapas do processo de produção do sal nutritivo, encontram-se especificadas na tabela 8. O vapor é utilizado como utilidade quente e está disponível no estado saturado, sendo que as temperaturas inicial e final não se encontram especificadas, mas sim o título de vapor. O fluido frio disponível é água de arrefecimento, proveniente de uma unidade de arrefecimento externa.

✓ Tabela 8 - Dados relativos aos fluidos de arrefecimento e aquecimento

Utilidade	T_i [°C]	T_f [°C]	p [bar(a)]	α [W/(m ² K)]	c [€/kWh]
Vapor (UQ)	x1	x0	4,0	4 500	0,075
Água de Arrefecimento (UF)	7	13	2,0	2 500	0,025

A produção deste sal nutritivo é realizada através do processo descontínuo descrito na secção anterior (6.2.1). De Setembro a Julho (44 semanas), a unidade industrial produz três lotes por dia, durante toda a semana (de Segunda a Domingo). O tempo operacional de cada lote é de sete horas e trinta minutos (7,5h).

A cada equipamento utilizado na produção de cada lote estão associadas várias tarefas. Estas tarefas encontram-se discriminadas nas tabelas associadas a cada um dos quatro equipamentos industriais utilizados (tabelas 9, 10, 11 e 12). Através das tabelas é, ainda, possível interpretar a distribuição das tarefas ao longo do tempo.

✓ Tabela 9 - Tanque de Mistura

<i>Descrição</i>	<i>Modo</i>	<i>Começo</i>	<i>Duração</i>
1. Pré-aquecimento do solvente, enchimento (7t)	Processamento	0h00'	0h45'
2. Adição do sal, processo de dissolução (2,5t)	Pós-processamento	0h45'	0h45'
3. Esvaziamento (9,5t)	Pós-processamento	1h30'	0h15'
4. Limpeza	Pós-processamento	1h45'	0h15'

✓ Tabela 10 - Evaporador

<i>Descrição</i>	<i>Modo</i>	<i>Começo</i>	<i>Duração</i>
5. Enchimento (9,5t)	Pré-processamento	1h30'	0h15'
6. Acrescento do aditivo (1,5t)	Pré-processamento	1h45'	0h15'
7. Evaporação da solução, condensação (1,5t)	Processamento	2h00'	1h15'
8. Arrefecimento da camisa	Pós-processamento	3h15'	0h30'
9. Esvaziamento (9,5t)	Pós-processamento	3h45'	0h15'
10. Limpeza	Pós-processamento	4h00'	0h15'

✓ Tabela 11 - Tanque de Drenagem

<i>Descrição</i>	<i>Modo</i>	<i>Começo</i>	<i>Duração</i>
11. Enchimento (9,5t)	Pré-processamento	3h45'	0h15'
12. Esvaziamento (2,5t)	Pré-processamento	4h00'	0h15'
13. Esvaziamento, arrefecimento do concentrado (7t)	Processamento	5h00'	2h00'

✓ Tabela 12 - Cristalizador

<i>Descrição</i>	<i>Modo</i>	<i>Começo</i>	<i>Duração</i>
14. Enchimento (2,5t)	Pré-processamento	4h00'	0h15'
15. Início da cristalização	Pré-processamento	4h15'	0h45'
16. Cristalização, esvaziamento da suspensão (9,5t)	Processamento	5h00'	2h30'

A capacidade calorífica média (CP) das correntes frias e quentes é obtida através da multiplicação do caudal mássico (\dot{m}) pelo calor específico médio das mesmas, como referido na secção 3.4.1. Para se obter o caudal mássico de uma corrente processual descontínua no tempo é necessário dividir a massa da substância em questão pelo intervalo de tempo em que a necessidade de aquecimento ou arrefecimento ocorre. Assim, para se obter o \dot{m} e o CP das correntes frias e quentes deste processo, deve prosseguir-se de acordo com os cálculos apresentados na tabela 13.

✓ Tabela 13 - Caudais mássicos e capacidades caloríficas médias das correntes processuais

Corrente	Caudal mássico	Capacidade Calorífica Média
Solvente	$\dot{m} = \frac{7\,000\text{kg}}{2\,700\text{s}} = 2,593\text{ kg/s}$	$CP = 2,593 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 10,84\text{ kW/K}$
Licor	$\dot{m} = \frac{6\,000\text{kg}}{9\,000\text{s}} = 0,667\text{ kg/s}$	$CP = 0,667 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2,85 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 1,90\text{ kW/K}$
Concentrado	$\dot{m} = \frac{7\,000\text{kg}}{7\,200\text{s}} = 0,972\text{ kg/s}$	$CP = 0,972 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 3,16\text{ kW/K}$
Vapor-Condensado	$\dot{m} = \frac{1\,500\text{kg}}{4\,500\text{s}} = 0,333\text{kg/s}$	-

*entalpia de condensação do vapor a 1 bar(a) é 2 257 kJ/kg

Com base nestas tabelas (9, 10, 11, 12 e 13), é possível construir um diagrama de Gantt (figura 30) que demonstre as necessidades de aquecimento (azul) e arrefecimento (vermelho) ao longo do tempo. Este diagrama permite identificar os intervalos de tempo nos quais existem necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento. Para este modo de operação, apenas é possível recuperar calor directamente em TS3. Nos restantes TS (TS1 TS2 e TS4) apenas existem necessidades de aquecimento ou arrefecimento que têm de ser satisfeitas com o recurso a utilidades externas.

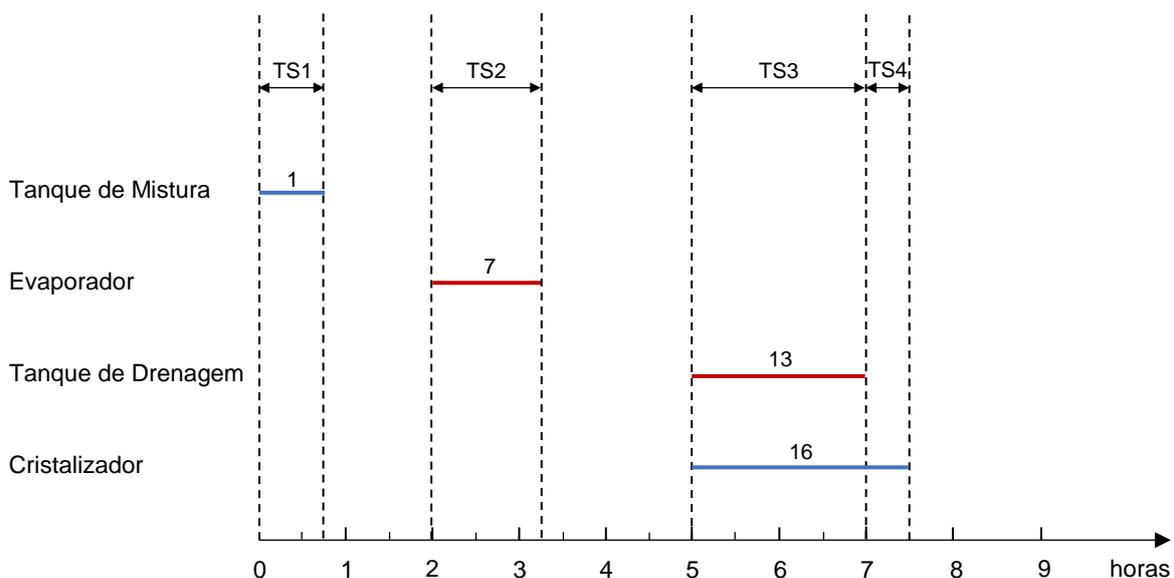


Figura 30 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento por lote

Como referido na secção anterior (6.2.1), a unidade industrial já se encontra totalmente depreciada, pelo que as únicas despesas incorridas anualmente pela fábrica são os custos associados à utilização de utilidades (custos operacionais). O consumo de utilidades e os custos operacionais anuais, associados à produção de 924 lotes anuais [$3(\text{lotes}/\text{dia}) \times 7(\text{dias}/\text{semana}) \times 44(\text{semanas}/\text{ano})$], encontram-se expostos na tabela 14.

✓ Tabela 14 - Consumo de utilidades e custos operacionais associados à produção de 924 lotes por ano

TS	h/lote	τ (h/ano)	\dot{Q}_{HU} (kW)	\dot{Q}_{CU} (kW)	C_{Op} (€/ano)
TS1	0,75	693	533	-	27 703
TS2	1,25	1 155	-	752	21 714
TS3	2	1 848	110	145	21 945
TS4	0,5	462	110	-	3 812
Total	4,5	4 158	-	-	75 174

6.2.3 As Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento

Antes de serem avaliadas quaisquer medidas de integração energética do processo de produção, identificou-se uma clara oportunidade de redução do consumo de solvente na produção de cada lote. Para tal, o vapor produzido na segunda etapa do processo (evaporação), deve regressar sob a forma de condensado ao tanque de mistura. Esta alteração pode ser verificada através da cor verde presente no diagrama de processos (figura 31).

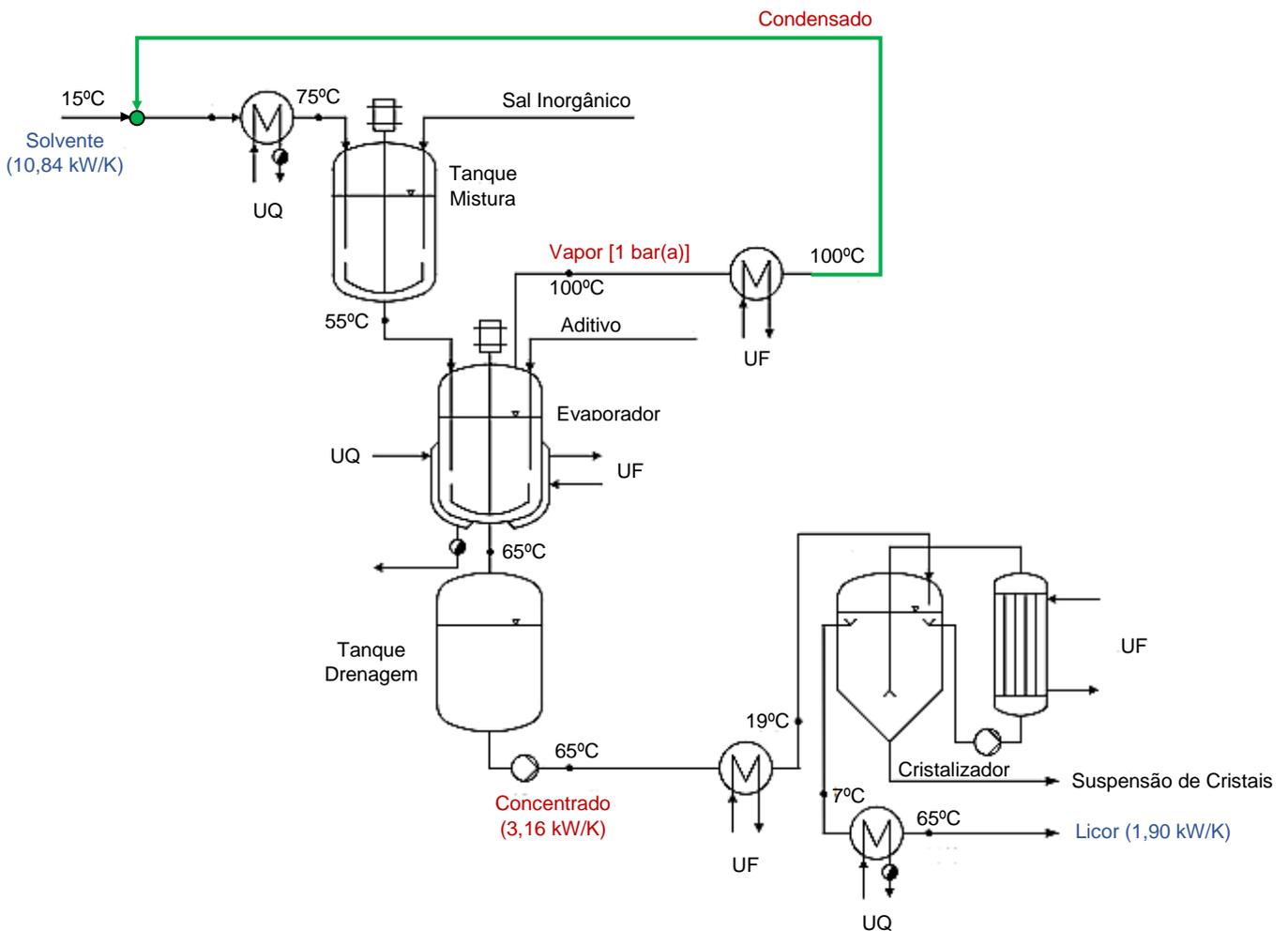


Figura 31 - Diagrama de Processos

Observe-se que, inicialmente, o solvente teria de ser aquecido de 15°C até 75°C (como mencionado na secção 7.1). Contudo, ao retornar ao sistema, o condensado que se encontra a 100°C mistura-se com a água fresca de 15°C. Assim sendo, é necessário aferir qual a nova temperatura do solvente proveniente desta fusão. O cálculo desta temperatura envolve a realização de um balanço entálpico em torno do nó de junção das correntes envolvidas, “Solvente” e “Condensado” (figura 32).

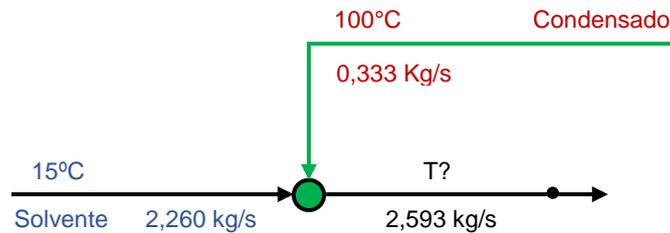


Figura 32 - Nó de junção das correntes

O balanço entálpico que permite calcular a temperatura em questão (T?) pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\Delta H1 + \Delta H2 = \Delta H3 \quad (7.1)$$

Então,

$$2,260 \frac{kg}{s} \times 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K} \times (15^\circ C - 15^\circ C) + 0,333 \frac{kg}{s} \times 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K} \times (100^\circ C - 15^\circ C) = 2,593 \frac{kg}{s} \times 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K} \times (T - 15^\circ C) \Leftrightarrow$$

Dado que o calor específico médio não varia (água), obtém-se:

$$0,333 \frac{kg}{s} \times 85^\circ C = 2,593 \frac{kg}{s} \times (T - 15^\circ C) \Leftrightarrow$$

$$T = \frac{28,305 \frac{kg \cdot ^\circ C}{s}}{2,593 \frac{kg}{s}} + 15^\circ C = 25,9^\circ C$$

Como mencionado anteriormente, o retorno do condensado ao tanque de mistura permite um menor consumo de água fresca na produção de cada lote. Em vez de 2,593 kg/s, o consumo passa a ser 2,260 kg/s, como indicado na figura 32. Para além do referido, note-se que a temperatura do solvente aumenta de 15°C para 25,9°C. Este aumento de temperatura do solvente permite, ainda, reduzir o consumo de utilidades externas (€/kWh) para o aquecimento do mesmo até 75°C (temperatura a que deve entrar no tanque de mistura), que corresponde a uma percentagem de redução de 18,2%.

$$\% \text{ redução} = \frac{2,593 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (75^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) - 2,593 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (75^\circ\text{C} - 25,9^\circ\text{C})}{2,593 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (75^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C})} \times 100$$

⇔

$$\frac{60 - 49,1}{60} \times 100 = \mathbf{18,2 \%}$$

6.2.4 Potencial de Recuperação de Calor

O potencial de recuperação de calor é estudado no PinCH através da ferramenta de análise das metas energéticas (ETA). O estudo do potencial de recuperação directa é realizado em primeiro lugar, uma vez que as despesas associadas ao armazenamento de energia térmica tornam o modo de recuperação indirecta menos preferível. Assim, o estudo do potencial de recuperação indirecta de calor é realizado posteriormente. Desta forma, as necessidades de aquecimento e arrefecimento (consumo de utilidades externas) associadas à recuperação indirecta irão corresponder àquelas que não conseguem ser satisfeitas pela recuperação directa.

6.2.4.1 Recuperação Directa

Uma vez que a permuta directa entre correntes apenas é possível em TS3, a diferença mínima de temperatura pode ser otimizada em função do custo total sem influenciar os restantes TS e, conseqüentemente, a complexidade da rede de permutadores de calor. Assim, os resultados alvo podem ser calculados no PinCH com o recurso a um *design* separado na fase de *targeting*, como exposto na secção 5.4.8 (etapa 8). Através da tabela de dados relativos ao TS3, o PinCH indica que o custo total é minimizado para um $\Delta T_{min} = 10,53 \text{ K}$, correspondente a uma temperatura de ponto de estrangulamento de $59,7^\circ\text{C}$. Posteriormente, terminado o design da MER HEN, identifica-se que com um investimento de 35 613€ num novo permutador, é possível reduzir o consumo de UQ de 110 kW para 20 kW (82% de redução) e o de UF de 145 kW para 55 kW (62% redução). Esta redução de 90 kW equivale a uma poupança anual de 166 MWh ($90 \text{ kW} \times 10^{-3} \times 1\,848 \text{ h/ano}$) em utilidades quentes (UQ) e frias (UF). Considerando que o investimento tem uma taxa de rentabilidade de 5% e que é depreciado ao longo de 7 anos (correspondendo a um factor de anuidade equivalente a 0,173), o custo anual associado a esta medida de integração energética é de 6 161 €/ano ($35\,613 \times 0,173$). A tabela 15 compara as despesas actuais da unidade industrial com as despesas que teria caso optasse por recuperar calor directamente. Os custos associados aos restantes TS (TS1, TS2 e TS4) mantêm-se após esta medida de optimização, uma vez que a recuperação de calor directa apenas é possível em TS3. Como tal, a alteração nas despesas totais da unidade industrial apenas é influenciada por alterações nos custos em TS3.

✓ Tabela 15 - Comparação de custos em TS3

Situação actual						
UQ		UF		C_{Op}	C_{Inv}	C_{tot}
kW	MWh/ano	kW	MWh/ano	(€/ano)	(€/ano)	(€/ano)
110	203	145	268	21 945	0	21 945

Processo optimizado						
UQ		UF		C_{Op}	C_{Inv}	C_{tot}
kW	MWh/ano	kW	MWh/ano	(€/ano)	(€/ano)	(€/ano)
20	37	55	102	5 313	6 161	11 474

Poupança						
UQ		UF		C_{Op}	C_{Inv}	C_{tot}
kW	MWh/ano	kW	MWh/ano	(€/ano)	(€/ano)	(€/ano)
90	166	90	166	16 632	-6 161	10 471

Embora seja necessário investir num novo permutador de calor, durante o período de retorno no investimento (7 anos) existe uma poupança anual de 10 471€/ano. Existe, portanto, uma redução de 48% dos custos anuais. A configuração da rede de permutadores de calor associada à recuperação directa de calor no processo de produção encontra-se representada pelo anexo A.

6.2.4.2 Recuperação Indirecta

Após o potencial de recuperação directa ter sido estudado e devidamente identificado, verifica-se que ainda existem necessidades de aquecimento e arrefecimento para satisfazer. O potencial de recuperação indirecta foi estudado com base no ISSP. Assim, foram seleccionadas as correntes a considerar para o armazenamento de energia térmica. As duas correntes que não permutam calor directamente (“Solvente” e “Vapor-condensado”) são as que apresentam melhores condições para trocar calor indirectamente. As restantes correntes (“Concentrado” e “Licor”) têm coeficientes de transferência de calor mais baixos, tornando-as menos “aptas” para trocar calor indirectamente. Além disso, a quantidade de calor (kWh) das mesmas não é suficiente para justificar o custo associado ao incremento de novos circuitos intermediários (ILs) e de novas camadas no armazenamento estratificado (SS).

Para um processo que já recupera calor directamente, a quantidade ideal de calor a considerar no armazenamento corresponde à necessidade total de calor da corrente “Solvente” (400 kWh). Nestas condições, o PinCH identifica que o custo total (€/ano) é minimizado para um armazenamento estratificado no qual a temperatura da camada inferior e superior é 51°C e 93°C, respectivamente. Com base no perfil térmico de carga e descarga, o PinCH estima ser necessária uma unidade de armazenamento com as seguintes características:

- ✓ volume necessário (8 m³);
- ✓ Massa (8 t);
- ✓ Número de permutadores de calor necessários (2);
- ✓ Área total de transferência de calor necessária (60 m²).

Segundo a tabela de custos de armazenamento do PinCH, a implementação desta medida de integração energética envolve um investimento de 118 601 € em armazenamento que é depreciado ao longo de sete anos, pelo que o custo anual incorrido é de 20 518 €/ano (factor de anuidade equivalente a 0,173). Contudo, existe uma redução anual de 369 389 kWh/ano no consumo de utilidades externas, ou seja, o consumo de UQ diminui 81% e o de UF 38%, em relação ao processo otimizado apenas com recuperação directa. Esta redução resulta num decréscimo de 36 939 €/ano nos custos operacionais (9 235 €/ano em utilidades frias e 27 704 €/ano em utilidades quentes). A configuração da rede de permutadores de calor associada à integração de armazenamento estratificado no processo de produção encontra-se representada no anexo B.

Os custos e as necessidades energéticas do processo nos diferentes cenários de integração encontram-se expostos na tabela 16.

✓ Tabela 16 – Recuperação directa vs recuperação directa e indirecta

	<i>UQ</i> (MWh/ano)	<i>UF</i> (MWh/ano)	<i>C_{Op}</i> (€/ano)	<i>C_{Inv}</i> (€/ano)	<i>C_{tot}</i> (€/ano)
(1) <i>Situação actual</i>	624	1 137	75 174	0	75 174
(2) <i>Recuperação Directa</i>	457	970	58 542	6 161	64 703
(3) <i>Directa + Indirecta</i>	88	601	21 603	26 679	48 282
(4) <i>Poupança (1-3)</i>	536	536	53 571	-26 679	26 892

Os custos operacionais podem ser reduzidos em 71% caso se implementem as medidas de recuperação directa e indirecta. O custo total (€/ano) pode reduzir 36% durante os primeiros sete anos. Após estes sete anos, o investimento é totalmente depreciado e os custos totais passam a corresponder apenas aos custos operacionais. Desta forma, ao fim de 15 anos, a unidade industrial pode poupar:

$$(15 \times 75\,174) - (7 \times 48\,282 + 8 \times 21\,603) = \mathbf{616\,812\,€}$$

Conclui-se, portanto, que recuperar calor directa e indirectamente é a opção mais aconselhável para a unidade industrial. A implementação desta medida de integração energética permite uma redução substancial de 86% e 47% no actual consumo de utilidades quentes e frias, respectivamente.

6.2.5 Análise de Cenários de Produção

Esta análise pretende demonstrar o impacto que diferentes cenários de produção têm no potencial de recuperação de calor e nos custos totais da unidade. O estudo incide essencialmente na variação do número de lotes produzidos por dia.

A sobreposição de lotes permite explorar a possibilidade de transferir calor directamente entre lotes diferentes. Nesse sentido, quando lotes são sobrepostos, o potencial de recuperação directa é consideravelmente aumentado.

Actualmente, a unidade industrial produz três lotes por dia, cada um com a duração de sete horas e trinta minutos. Para aumentar a produção, estudou-se a possibilidade de sobreposição através da diminuição do intervalo de tempo entre lotes consecutivos (*Batch Cycle Duration*) e do aumento do número de lotes por dia. Assim, foram estudados os seguintes cenários alternativos:

1. Produção de 4 lotes por dia, cada um com a duração de cinco horas;
2. Produção de 6 lotes por dia, cada um com a duração de quatro horas;

Sem alterar o volume de produção (924 lotes anuais), o número de semanas de trabalho pode, assim, diminuir de quarenta e quatro (44) para trinta e três (33) no primeiro cenário. Através desta alteração no processo, a recuperação directa de calor passa a ser possível em três dos quatro TS (TS1, TS2 e TS3), em vez de apenas em TS3. O custo anual associado a este modo de operação é de 75 169 €/ano (anexo C), sendo o valor muito semelhante ao valor do custo operacional actual (75 174 €/ano). Relativamente ao segundo cenário, o número de semanas de produção pode diminuir para vinte e duas (22), sendo que um TS adicional é criado. Neste cenário, dos cinco TS existentes, a recuperação directa é possível em três deles (TS2, TS3 e TS4). Neste cenário, o valor do custo operacional é 75 175 €/ano (anexo C), sendo, portanto, também semelhante ao actual.

A tabela 17 compara o modo de operação actual (3 lotes/dia) com os dois cenários referidos relativamente ao potencial de recuperação directa de calor em cada TS. No PinCH, verifica-se que a diferença mínima de temperatura associada ao custo total mínimo da integração é de 40 K para o primeiro cenário e de 35 K para o segundo. Identifica-se que, em relação ao modo de operação actual, o potencial de recuperação de calor aumenta 46% e 66% nos cenários 1 (4 lotes) e 2 (6 lotes), respectivamente. Contudo, mesmo recuperando menos calor, o modo actual é mais indicado caso se implemente esta medida de integração energética (recuperação directa), uma vez que o custo anual é inferior em relação aos restantes cenários (64 703 €).

✓ Tabela 17 - Comparação dos cenários de produção: Potencial vs Custos

	<i>Potencial de Recuperação Directa (kW)</i>							C_{Op} (€/ano)	C_{inv} (€/ano)	C_{tot} (€/ano)
	ΔT_{min} (k)	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	Total			
3 lotes	10,53	0	0	90	0	-	90	58 542	6 161	64 703
4 lotes	40	34	34	100	0	-	168	64 270	5 383	69 653
6 lotes	35	0	44	110	110	0	264	58 404	6 637	65 041

7 Conclusões e Recomendações Futuras

Este estudo mostrou que existe a escassa disponibilidade de ferramentas que analisam os efeitos das necessidades energéticas em condições de variação ao longo do tempo. Este facto pode constituir uma significativa razão para pequenas empresas, de setores com elevada variabilidade de consumos ao longo do tempo, ainda não terem efetuado as análises necessárias no sentido de aumentar a sua eficiência energética por utilização do seu potencial energético, em termos térmicos. A diversidade de processos de produção na indústria alimentar e a grande variedade de produtos produzidos dificulta o desenvolvimento de ferramentas capazes de modelar as unidades processuais. De forma a compreender melhor as opções de apoio informático que as empresas nesta indústria têm, foi realizado um estudo abrangente que se caracterizou por identificar a disponibilidade de ferramentas para modelação de cargas térmicas dinâmicas (processos descontínuos). No total, foram identificadas sete ferramentas, contudo um processo de selecção conduziu àquela que viria a servir de apoio à obtenção de resultados desta dissertação. Como critério inicial de selecção, foi dada preferência a ferramentas cuja obtenção fosse gratuita (*open source*) e/ou estivesse disponível no IST ou no ISQ. Assim, dentro destes critérios, foi investigada a possibilidade de obtenção de três ferramentas: SOCO, PinCH 3.0 e GREENFOODS branch concept. Destas três, apenas foi possível obter o PinCH 3.0 e o GREENFOODS branch concept, sendo que, numa fase posterior, se optou por recorrer ao PinCH (versão 3.0) para trabalhar os dados desta dissertação.

O estudo de recuperação de calor na indústria alimentar e de bebidas acabou por não ser aprofundado, uma vez que os dados reais obtidos através do contacto com a empresa “CarneMestra” não garantiram todas as condições necessárias à realização de uma APE com o PinCH. A não existência de necessidades de arrefecimento no processo impossibilita a recuperação de calor entre correntes, pelo que o estudo de integração energética ficou sem efeito. Contudo, a análise das necessidades de calor da empresa “CarneMestra” incentivou o contacto com a realidade industrial portuguesa, no sector das carnes e produtos cárneos, tendo sido identificado um potencial de recuperação de energia nos gases de exaustão da caldeira. O aproveitamento dos gases de combustão poderá servir para o aquecimento de ar que, por sua vez, poderá fazer o aquecimento de uma oficina (presente nas suas instalações) cuja temperatura é muito baixa.

O PinCH provou ser capaz de modelar processos descontínuos e identificar novas medidas de integração energética para os mesmos. De igual forma, demonstrou ser bastante útil na optimização de um processo industrial, de carácter académico, que produz sal nutritivo utilizado na composição de fertilizantes. Relativamente ao potencial de recuperação directa de calor deste processo (fertilizantes), o PinCH identificou que através de um investimento de 35 613€ num novo permutador de calor, o processo poderia reduzir o consumo de utilidades quentes (UQ) e frias (UF) em 82% e 62%, respectivamente. Considerou-se que o investimento tem uma taxa de rentabilidade de 5% e que é depreciado ao longo de 7 anos, pelo que o custo anual associado a esta medida de integração energética é de 6 161 €/ano. A implementação desta medida de optimização permite uma poupança anual de 10 471€/ano durante o período de retorno no investimento, reduzindo em 14% os custos anuais. Contudo, o processo optimizado (com recuperação directa) ainda teria necessidades de

aquecimento e de arrefecimento por satisfazer, pelo que o potencial de recuperação indirecta foi, posteriormente, analisado no PinCH. A aplicação do *software* identificou, na fase de *targeting*, que o custo anual total seria minimizado para um armazenamento estratificado com as temperaturas da camada inferior e superior fixadas em 51°C e 93°C, respectivamente. Assim, com um investimento anual de 20 518 €/ano (durante o período de retorno), reduzir-se-iam os consumos de utilidades externas em 369 389 kWh/ano, pelo que os custos operacionais reduziriam no valor de 36 939 €/ano (9 235 €/ano em UF e 27 704 €/ano em UQ). Para este estudo com componentes de cargas térmicas variáveis, concluiu-se que a implementação de ambas as medidas de integração energética (recuperação directa e indirecta) seria a opção mais vantajosa para o processo, visto permitir reduzir em 36% o custo anual total durante os primeiros sete anos. Após este período, o investimento seria totalmente depreciado e os custos totais passariam a corresponder apenas aos custos operacionais do processo. Concluiu-se, ainda, que caso a unidade industrial prosseguisse com a implementação das duas medidas de integração energética, ao fim de 15 anos, poderia poupar 616 812 €.

Posteriormente, foi realizado um estudo sobre o impacto que diferentes cenários de produção teriam no potencial de recuperação directa de calor e nos custos totais da unidade. O estudo incidiu essencialmente na variação do número de lotes produzidos por dia, assegurando, ao mesmo tempo, que o volume de produção não fosse alterado. Como tal, dois novos cenários de produção foram definidos no PinCH: 4 lotes/dia (cenário 1) e 6 lotes/dia (cenário 2). Em relação ao modo de operação actual da unidade industrial (3 lotes/dia), o potencial de recuperação directa de calor aumentaria 46% e 66% nos cenários 1 e 2, respectivamente. Contudo, verificou-se que manter o modo de operação actual seria mais indicado caso se investisse em medidas de recuperação directa de calor, uma vez que o custo anual acabaria por ser inferior em relação aos restantes cenários (64 703 €).

Considerando que uma das dificuldades desta dissertação foi a obtenção de dados que possibilitassem o estudo da recuperação de calor, em contexto industrial português, sugere-se como trabalho futuro a definição de um plano de recolha de dados que se adapte à metodologia da Análise do Ponto de Estrangulamento em processos descontínuos.

Futuramente, recomenda-se também a continuação da exploração do *software* PinCH na optimização dos mais variados processos existentes na indústria portuguesa. As várias funcionalidades desta ferramenta podem ser muito úteis no apoio à decisão em abordagens a problemas reais de aumento da eficiência energética na indústria dos processos descontínuos. A utilização desta ferramenta poderá também ser uma mais valia a nível académico, nomeadamente na aprendizagem prática de conceitos de integração energética neste tipo de processos.

Bibliografia

Al-Riyami, B.A., Klemes, J., Perry, S., 2001. Heat integration retrofit analysis of a heat exchanger network of a fluid catalytic cracking plant. *Appl. Therm. Eng.* 21, 1449–1487. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00028-X).

An Derden, Peter Vercaemst, Roger Dijkmans, 2002. Best available techniques (BAT) for the fruit and vegetable processing industry. *Resour. Conserv. Recycl.* 34, 261–271.

Asante, N.D.K., Zhu, X.X., 1997. An automated and interactive approach for heat exchanger network retrofit. *Chem. Eng. Res. Des.* 75, 349–360. <https://doi.org/10.1205/026387697523660>.

Bon, J., Clemente, G., Vaquiro, H., Mulet, A., 2010. Simulation and optimization of milk pasteurization processes using a general process simulator (ProSimPlus). *Comput. Chem. Eng.* 34, 414–420. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.013>.

Bourgier, V., Schooley, K., Lawson, R., Technologies, W., 2017. Phosphates 2017 conference , Tampa
Canola crop nutrition Phosphates market report Evaporation & crystallisation technology Applying evaporators & crystallisers to fertilizer production.

Canada, N.R., 2015. OPTIMIZING HEAT RECOVERY AND REDUCING WASTE HEAT INTEGRATION SOFTWARE.

Chaturvedi, N.D., Bandyopadhyay, S., 2014. Indirect thermal integration for batch processes. *Appl. Therm. Eng.* 62, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.042>.

Clark, W., 1922. *The Gantt Chart, A Working Tool of Management*. Ronald Press Company.

Douglas, J.M., 1988. *Conceptual design of chemical processes*. McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1002/jctb.280460308>.

European Commission, 2006. Integrated pollution prevention and control. Reference document on best available techniques in the food, drink and milk industries 682. <https://doi.org/10.1787/dcr-2005-11-en>.

Fernandes, M.C.S., Matos, H.A., Nunes, C.P., 2016. Medidas Transversais de Eficiência Energética para a Indústria. Direcção-Geral de Energia e Geologia.

Fernández, I., Renedo, C.J., Pérez, S.F., Ortiz, A., Mañana, M., 2012. A review: Energy recovery in batch processes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2260–2277. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.017>.

Fluch, J., Brunner, C., Grubbauer, A., 2017. Potential for energy efficiency measures and integration of renewable energy in the European food and beverage industry based on the results of implemented projects. *Energy Procedia* 123, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.243>.

Fluch, J., Brunner, C., Muster-slawitsch, B., 2012. SOCO – Storage Optimisation Concepts in Industries , Commerce and District Heating Businesses 29, 493–498. <https://doi.org/10.3303/CET1229083>.

Foo, D.C.Y., El-Halwagi, M.M., Tan, R.R., 2017. *Process Integration for Sustainable Industries A2* - Abraham, Martin A. *BT - Encyclopedia of Sustainable Technologies*. Elsevier, Oxford, pp. 117–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10032-6>.

Herrera, A., Islas, J., Arriola, A., 2003. Pinch technology application in a hospital. *Appl. Therm. Eng.* 23, 127–139. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00157-6](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00157-6).

Hon Loong Lam, Klemeš, J.J., Zdravko Kravanja, Varbanov, P.S., 2011. Software tools overview: process integration, modelling and optimisation for energy saving and pollution reduction. <https://doi.org/10.1002/apj.469>.

Klemeš, J., Friedler, F., Bulatov, I., Varbanov, P.S., 2011. *Sustainability in the Process Industry. Integration and Optimization*. McGraw-Hill.

Linnhoff, B., Hindmarsh, E., 1983. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chem. Eng. Sci.* 38, 745–763. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(83\)80185-7](https://doi.org/10.1016/0009-2509(83)80185-7).

Lucerne University of Applied Science and Arts, 2012. *PinCH - An analysis and design tool for process integration*.

Magueijo, V., Fernandes, M.C., Matos, H. a., Nunes, C.P., Calau, J.P., Carneiro, J., Oliveira, F., 2010. *Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa: Um enquadramento tecnológico sucinto. Medidas Eficiência Energética Indústria -SGCIE*.

Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., Bailey, M.B., 2014. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Inc.

- Muster-Slawitsch, B., Brunner, C., Fluch, J., 2014. Application of an advanced pinch methodology for the food and drink production. *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* 3, 561–574. <https://doi.org/10.1002/wene.117>.
- Olsen, D., Abdelouadoud, Y., Liem, P., Hoffmann, S., Wellig, B., 2017. Integration of Heat Pumps in Industrial Processes with Pinch Analysis. 12th IEA Heat Pump Conf. 0–000.
- Olsen, D., Egli, A., Wellig, B., 2010. PinCH: An analysis tool for the process industries. *Proc. 23rd Int. Conf. Effic. Cost, Optim. Simulation, Environ. Impact Energy Syst. ECOS 2010* 1.
- Petrides, D., Carmichael, D., Siletti, C., Koulouris, A., 2014. Biopharmaceutical Process Optimization with Simulation and Scheduling Tools. *Bioengineering* 1, 154–187. <https://doi.org/10.3390/bioengineering1040154>.
- PinCH An analysis and design tool for process integration, 2017.
- Reetz, H.F., 2016. Fertilizers and their Efficient Use.
- Relvas, S., Fernandes, M.C., Matos, H.A., Nunes, C.P., 2002. Grupo Nacional para a Integração de Processos (GNIP). *Integr. Process. - Uma Metodol. Optim. energética e Ambient.* 129.
- Smith, R. (Chemical engineer), 2005. Chemical process design and integration. <https://doi.org/10.1529/biophysj.107.124164>.
- U.S. Energy Information Administration, 2016. International Energy Outlook 2016, International Energy Outlook 2016. [https://doi.org/www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://doi.org/www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf).
- Vannoni, C., Battisti, R., Drigo, S., 2008. Potential for solar heat in industrial processes. IEA SHC Task 33 and and SolarPACES Task IV: Solar heat for industrial processes. *lea* 1–21.
- Wellig, B., Olsen, D., 2016. Intelligent energy solutions. *Pan Eur. Networks Gov.* 20 1–2.
- Werner, S., Constantinescu, N., 2006. EcoHeatCool WP1: The European heat market. *Work Packag. Deliv. Ecohaetcool EU Proj.* 58–62.
- Wilson, J.M., 2003. Gantt charts: A centenary appreciation. *Eur. J. Oper. Res.* 149, 430–437. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00769-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00769-5).

Galp Gás Natural Distribuição, S.A., “Características do gás natural”,
<https://galpgasnaturaldistribuicao.pt/Centro-de-Infoma%C3%A7%C3%A3o/Monitorizacao-do-gas-natural>, (acedido em 28/03/2019).

Anexos

Anexo A

Representação da rede de permutadores de calor correspondente ao processo otimizado com recuperação directa

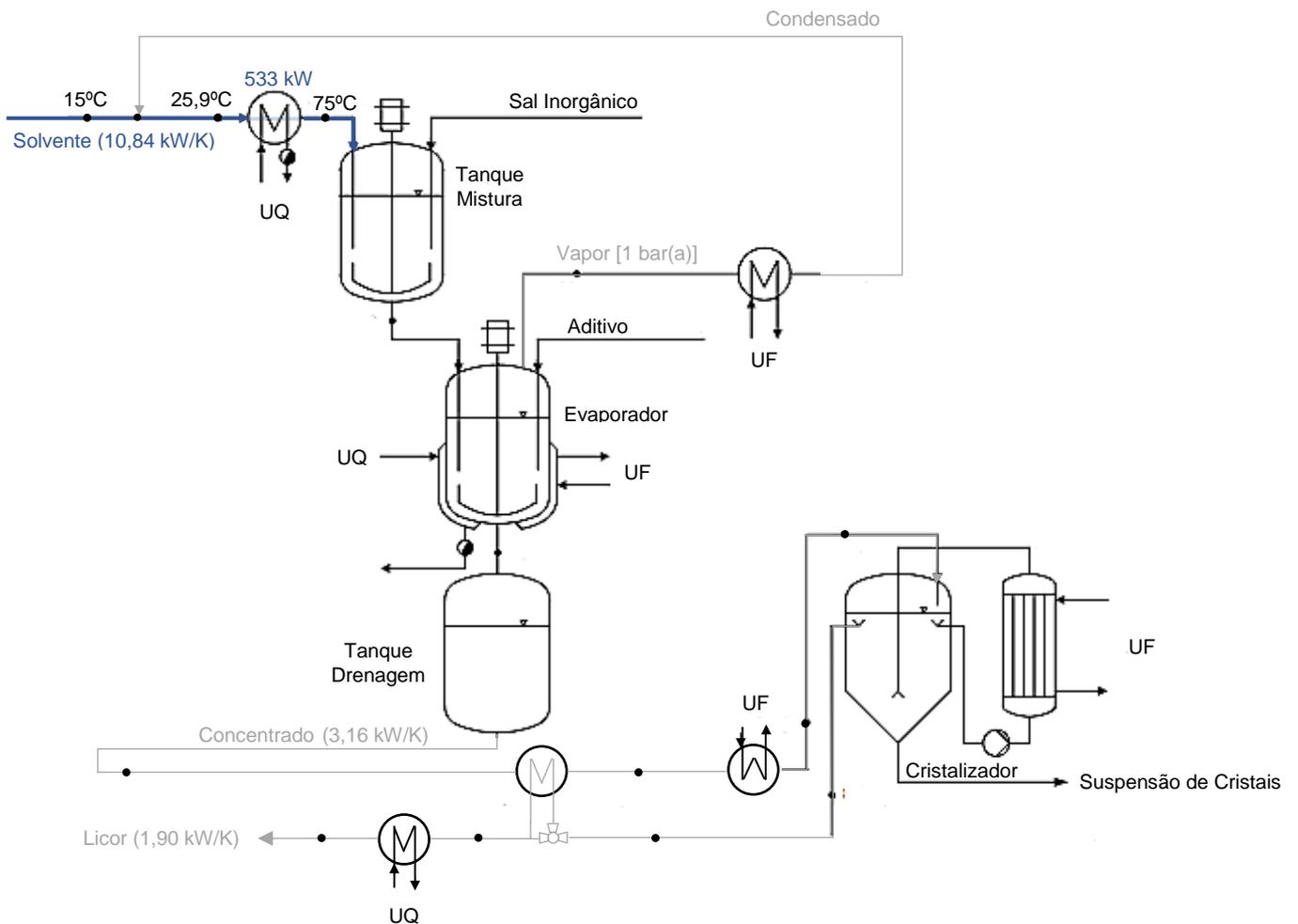


Figura 33 – Diagrama de processos para a unidade otimizada em TS1

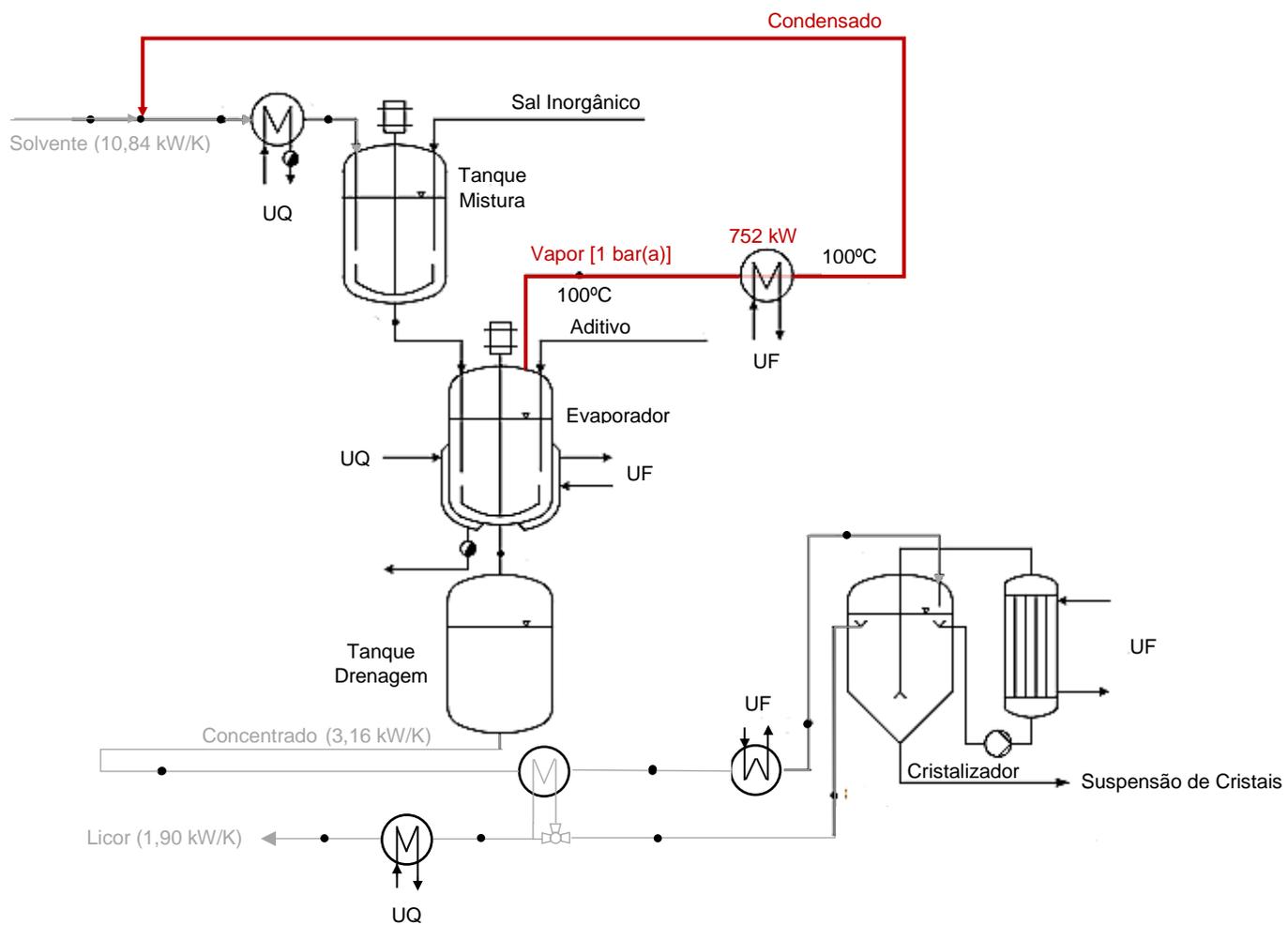


Figura 34 - Diagrama de processos para a unidade otimizada em TS2

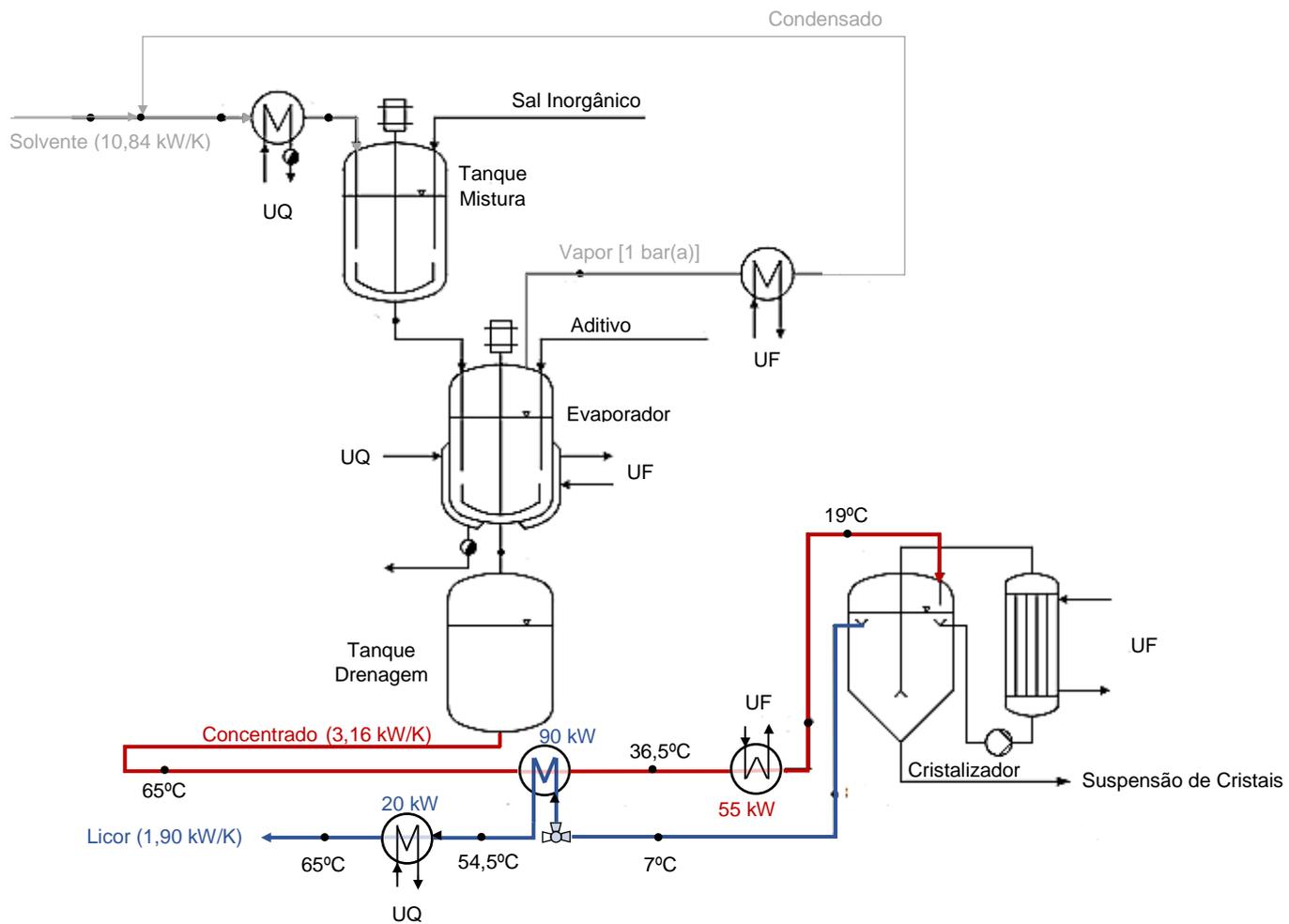


Figura 35 - Diagrama de processos para a unidade otimizada em TS3, com permuta directa entre as correntes "Concentrado" e "Licor"

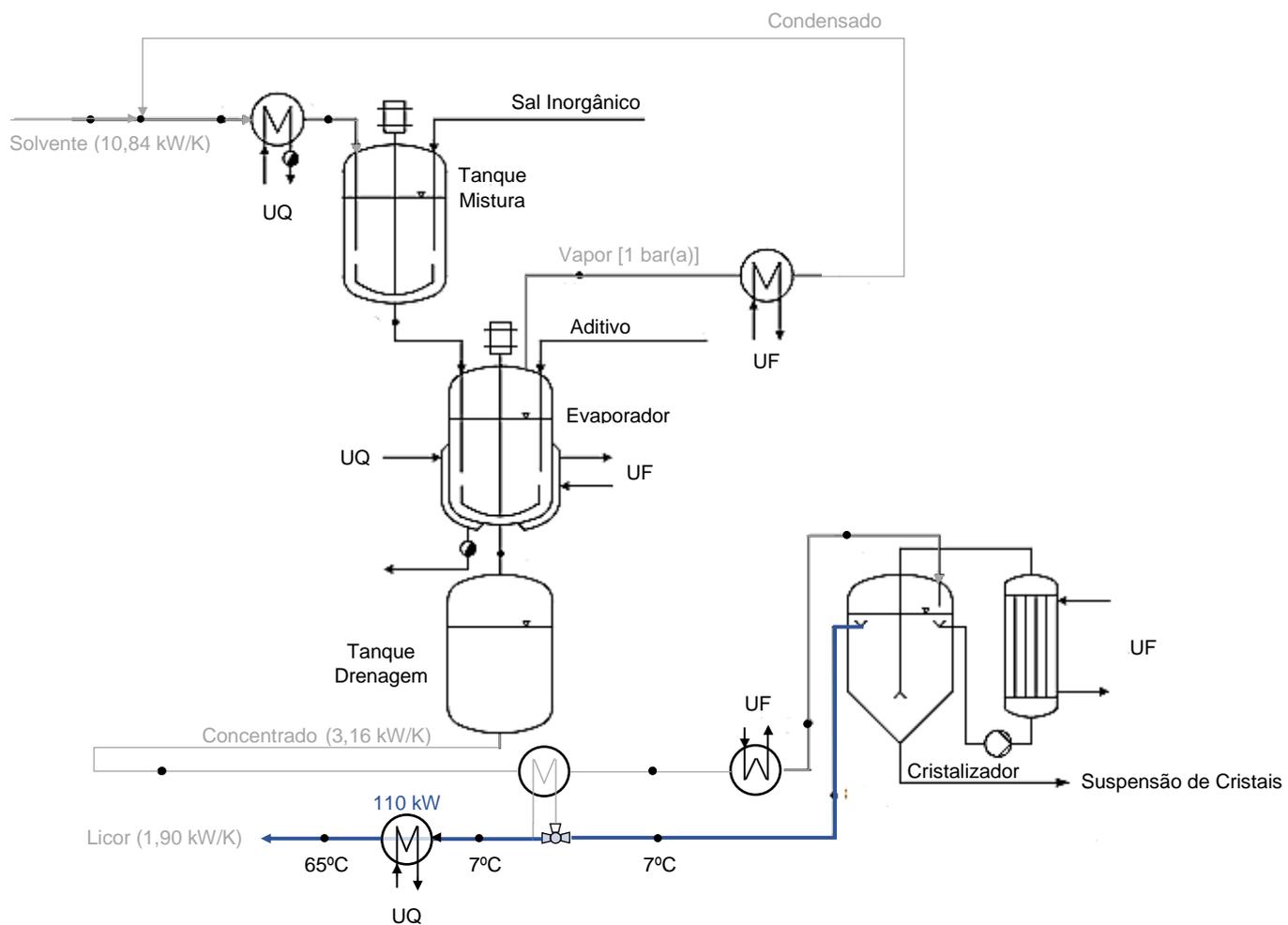


Figura 36 - Diagrama de processos para a unidade otimizada em TS4

Anexo B

Ilustração do armazenamento de energia térmica no processo de produção

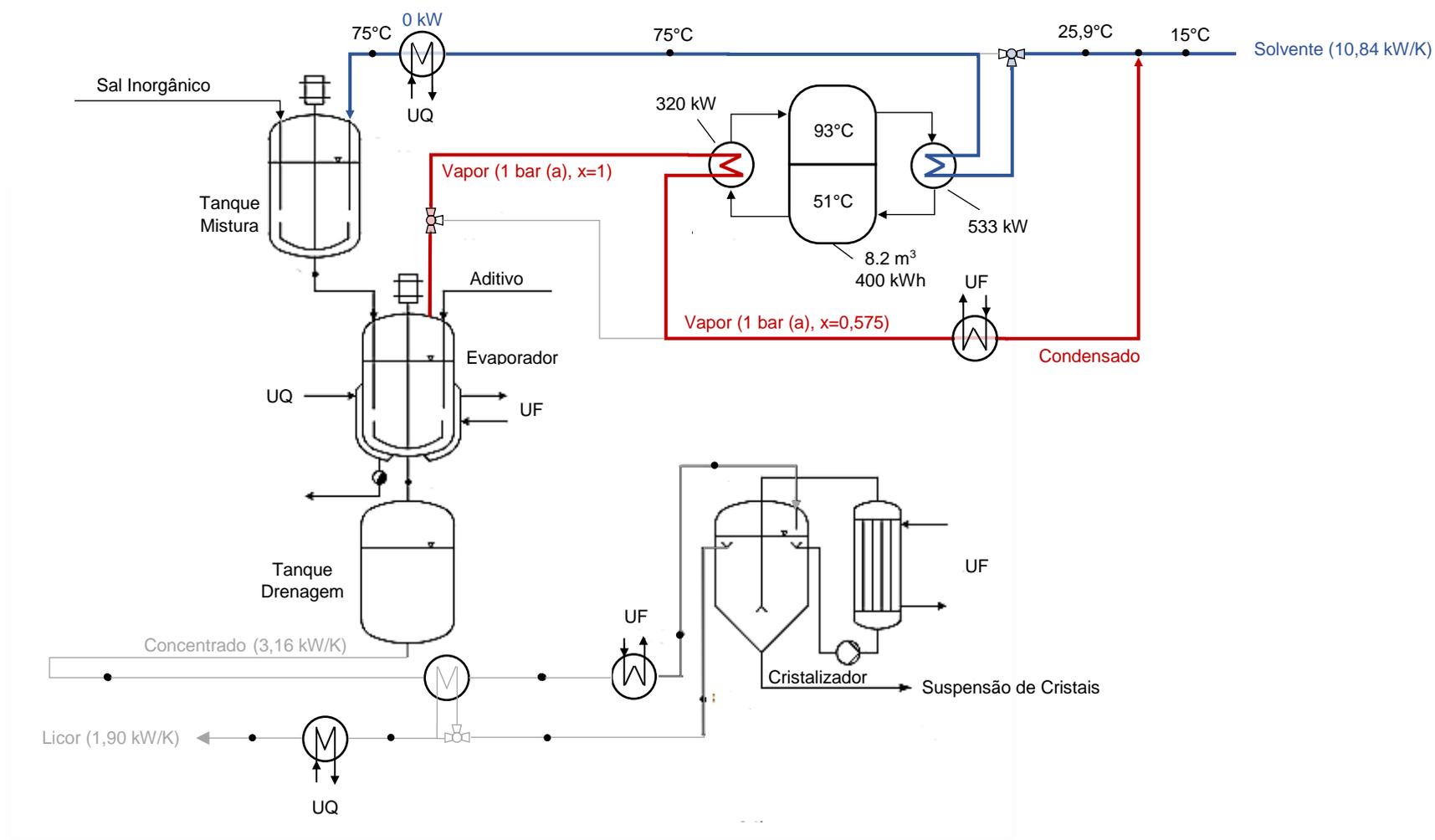


Figura 37 - Diagrama de processos para a unidade otimizada com armazenamento de energia térmica

Anexo C

Consumo de utilidades e custos operacionais para diferentes modos de operação

- ✓ Tabela 18 - Consumo de utilidades e custos operacionais associados à produção de 924 lotes por ano (4 lotes/dia)

TS	<i>h/lote</i>	τ (h/ano)	\dot{Q}_{HU} (kW)	\dot{Q}_{CU} (kW)	C_{Op} (€/ano)
TS1	0,75	693	533 + 110	145	35 932
TS2	1,25	1 155	110	145	13 716
TS3	0,5	462	110	752	12 497
TS4	0,75	693	-	752	13 028
Total	3,25	3 003	-	-	75 169

- ✓ Tabela 19 - Consumo de utilidades e custos operacionais associados à produção de 924 lotes por ano (6 lotes/dia)

TS	<i>h/lote</i>	τ (h/ano)	\dot{Q}_{HU} (kW)	\dot{Q}_{CU} (kW)	C_{Op} (€/ano)
TS1	0,75	693	533	-	27 703
TS2	1	924	110	145	10 973
TS3	1	924	110	145 + 752	28 344
TS4	0,25	231	110	752	6 249
TS5	0,25	231	110	-	1 906
Total	3,25	3 003	-	-	75 175