

RELATÓRIO DE UNIDADE CURRICULAR APRESENTADO A PROVAS DE AGREGAÇÃO



**TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO
PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS**

Rui Manuel Machado da Costa

Fevereiro 2023

O relatório que aqui se apresenta visa dar cumprimento legal ao estabelecido no Decreto-Lei n.º 239/2007; Art.º 5º, alínea b), que exige “um relatório sobre uma unidade curricular, grupo de unidades curriculares, ou ciclo de estudos, no âmbito do ramo do conhecimento ou especialidade em que são prestadas as provas”.

Sumário

1. Notas introdutórias.....	1
1.1. A unidade curricular	1
1.2. Competência pedagógica do docente.....	2
1.3. Organização do relatório	2
2. Objetivos de aprendizagem	4
3. Conteúdos programáticos	5
4. Demonstração da coerência dos conteúdos programáticos com os objetivos de aprendizagem da unidade curricular	6
5. Metodologias de ensino	8
6. Metodologias de avaliação	11
7. Demonstração da coerência das metodologias de ensino com os objetivos de aprendizagem da unidade curricular	14
8. Plano de aulas detalhado e descrição da sua execução.....	16
9. Bibliografia recomendada	23
Anexo A – Descrição dos trabalhos práticos	24
Anexo B – Fichas de exercícios	31
Anexo C – Teste modelo de avaliação de estado estacionário	46
Anexo D – Teste modelo de avaliação de estado transitório	49

1. Notas introdutórias

1.1. A unidade curricular

O relatório de unidade curricular **Transferência de calor no processamento de alimentos** aqui apresentado, tem como objetivo demonstrar a capacidade pedagógica do docente substanciada pelo conhecimento científico da matéria. Foi escolhida uma unidade curricular tipicamente lecionada em licenciaturas de Tecnologia ou Engenharia Alimentar, etapa de evolução do estudante onde as competências pedagógicas dos docentes são mais importantes para apoio ao desenvolvimento do estudante, comparativamente às etapas de mestrado e doutoramento.

O ensino da transferência de calor é fundamental na formação de profissionais na área da transformação alimentar. A transferência de calor é um processo importante na produção de alimentos, pois é responsável por conservar a qualidade e a segurança dos alimentos, mas também para o meio ambiente, a saúde pública e a economia. Além disso, o ensino da transferência de calor pode ser aplicado em outras áreas, como as engenharias ambiental e química, o que torna ainda mais importante sua inclusão na formação de profissionais.

Nesta unidade curricular, é importante que o estudante tenha bases de matemática ao nível de derivadas, integrais e equações diferenciais, e ao nível da física tenha abordado as bases da termodinâmica e mecânica de fluidos.

A transferência de calor em alimentos é um processo essencial para perceber e dimensionar operações desde a esterilização à refrigeração. Mais tarde no curso, ou em unidades curriculares que têm lugar em paralelo, é essencial que o estudante estabeleça a ligação da transferência de calor a alterações químicas, microbiológicas e físicas (incluindo sensoriais) dos alimentos. Só com a integração destas dimensões o estudante tira total proveito deste conhecimento, em cursos de Tecnologia ou Engenharia Alimentar.

O conhecimento de transferência de calor é estável há muito tempo, sem desenvolvimentos que alterem significativamente o conteúdo científico, com exceção de desenvolvimentos em aquecimento por micro-ondas, aquecimento por radiofrequência e aquecimento óhmico, que podem ser incorporadas, possivelmente numa unidade curricular de mestrado, enquadradas em Novas Tecnologias de Processamento Térmico.

Esta unidade curricular foi organizada para 15 semanas letivas, com uma carga horária total de 60 horas de ensino teórico-práticas (TP), com 6 ECTS. As aulas teórico-práticas contêm

uma introdução teórica, de duração variável e uma aplicação imediata de cálculos. As aulas práticas são dedicadas a cálculo e acompanhamento de cada grupo pelo docente.

1.2. Competência pedagógica do docente

O docente tem procurado desenvolver as suas competências pedagógicas desde o início da sua carreira, especialmente após o doutoramento. Participou em inúmeras formações e workshops e acompanhou o processo de Bolonha em envolvimento direto em redes internacionais, onde participou e liderou diversos grupos de trabalho em redes temáticas Erasmus e outros projetos Erasmus (ver *curriculum vitae*).

Desde 2009 que é o coordenador do mestrado em Engenharia Alimentar da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Coimbra.

Na sua larga atividade internacional, esteve envolvido na definição de critérios de qualidade de cursos em Ciência e Tecnologia Alimentar pela *ISEKI-Food Association*, na qual é o Presidente da Comissão de Acreditação e atual Secretário-Geral (www.iseki-food.net). Em 2022-23 é também Presidente da *European Alliance for Subject-Specific and Professional Accreditation and Quality Assurance* (www.easpa.org/), associação que agrega os detentores de selos de qualidade em diversas áreas tais como engenharia (EUR-ACE) e química (ECTN).

1.3. Organização do relatório

As secções deste relatório são similares ao conhecido modelo de autoavaliação utilizado no processo de acreditação da A3ES, para usar uma estrutura já conhecida, embora os campos estejam aqui mais expandidos.

O presente relatório está organizado em mais oito secções e quatro anexos.

Nas secções 2 e 3 apresentam-se, respetivamente, os objetivos de aprendizagem e os conteúdos programáticos e na secção 4 demonstra-se a coerência entre estes.

Nas secções 5 e 6 apresentam-se, respetivamente, as metodologias de ensino e as metodologias de avaliação e na secção 7 demonstra-se a coerência entre estas.

Na secção 8 descreve-se o plano de aulas detalhado, assim como a sua execução.

Por fim, apresenta-se a bibliografia recomendada aos estudantes, os trabalhos, fichas de exercícios e testes modelos fornecidos aos estudantes.

2. Objetivos de aprendizagem

Esta unidade curricular tem como objetivos o desenvolvimento de competências em dois temas latos: (1) Processamento e Engenharia, em particular o domínio da transferência de calor para design de instalações e equipamentos e em processamento térmico para garantir a segurança e qualidade dos alimentos; em (2) Capacidades Interpessoais, particularmente no desenvolvimento de capacidade de trabalho em equipa.

Abaixo são listados os objetivos específicos, em forma de resultados de aprendizagem, para cada uma das competências.

Competência 1

- o1. Define e explica, com sentido crítico, as leis fundamentais e propriedades físicas envolvidas em problemas de transferência de calor;
- o2. Identifica e comenta com pertinência situações do dia-a-dia e do ambiente profissional em que há transferência de calor, tendo em conta as limitações das leis físicas nos contextos respetivos;
- o3. Aplica as leis de transferência de calor para resolver problemas de estado estacionário e de estado transitório;
- o4. Simula situações do processamento de alimentos usando soluções tabelares na aplicação de leis de transferência de calor e obtém soluções;
- o5. Comenta, com sentido crítico, a credibilidade e utilidade dessas soluções;

Competência 2

- o6. Trabalha eficientemente numa equipa para cumprir os restantes resultados de aprendizagem, enquanto demonstra capacidade para planear, dividir tarefas e estabelecer acordos.

3. Conteúdos programáticos

1. Revisão: tipos de energia, taxa e fluxo de transferência de calor, regimes de fluxo, unidades do sistema internacional e unidades britânicas
2. Transferência de calor por condução (1ª lei de Fourier), convecção (lei de Newton), radiação (lei de Stefan-Boltzmann)
3. Propriedades físicas: calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica; métodos de determinação da condutividade térmica
4. A 1ª lei de Fourier aplicada às geometrias de placa plana, cilindro e esfera
5. Noção de resistência térmica, resistência de contacto, coeficiente global de transferência de calor e raio crítico de isolamento
6. Estimativa de coeficiente de calor em convecção forçada e convecção natural, sobre superfícies, dentro de tubo e em cavidades
7. Tipos de permutador, transferência de calor em permutadores em co-corrente e em contra-corrente e resistência de colmatação
8. Condução em estado transitório, solução tabelar da 2ª lei de Fourier das geometrias de placa plana, cilindro, esfera, solução analítica de sólido semi-infinito e aplicação a geometrias compostas
9. Método da capacitância global
10. Problemas de estado estacionário e estado transitório
11. Situações de transferência de calor em situações do dia-a-dia e ambiente profissional, relacionadas com o processamento de alimentos
12. Organização do trabalho em equipa

4. Demonstração da coerência dos conteúdos programáticos com os objetivos de aprendizagem da unidade curricular

Esta unidade curricular visa preparar os estudantes para a compreensão das leis de transferência de calor, incluindo as suas limitações, e a sua aplicação na modelagem e previsão no processamento de alimentos, para se atingir os objetivos de design de instalações e equipamentos e de garantir a segurança e qualidade dos alimentos no processamento térmico. Para tal, é necessário conhecimento das leis básicas de transferência de calor e ter capacidade de aplicar em problemas de estado estacionário e de estado transitório. Para desenvolver competências de trabalho em grupo, são lembrados os papéis numa equipa.

Os objetivos de aprendizagem e os tópicos de conteúdo da unidade curricular são coerentes entre si. Os objetivos de aprendizagem listados fornecem uma visão abrangente do que os estudantes devem ser capazes de entender e fazer depois de concluir a unidade curricular, enquanto os tópicos de conteúdo fornecem uma descrição mais detalhada do que será abordado na unidade.

O objetivo de aprendizagem 1 (“Define e explica, com sentido crítico, as leis fundamentais e propriedades físicas envolvidas em problemas de transferência de calor”) é atingido pela abordagem dos conteúdos 1 e 2 (“Transferência de calor por condução, convecção natural, convecção forçada e radiação” e “Propriedades físicas”).

O objetivo de aprendizagem 2 (“Identifica e comenta com pertinência situações do dia-a-dia e do ambiente profissional em que há transferência de calor, tendo em conta as limitações das leis físicas nos contextos respetivos”) é atingido após aplicação do conhecimento dos conteúdos anteriores ao conteúdo 11 (“Situações de transferência de calor em situações do dia-a-dia e ambiente profissional”).

O objetivo de aprendizagem 3 (“Aplica as leis de transferência de calor para resolver problemas de estado estacionário e transiente”) é atingido por aplicação dos conteúdos 1 a 9 no conteúdo 10.

Os objetivos de aprendizagem 4 (“Simula situações de processamento de alimentos usando soluções tabulares na aplicação de leis de transferência de calor e obter soluções”) e 5 (“Comenta, com sentido crítico, a credibilidade e utilidade dessas soluções”) alinham-se com os conteúdos 8 (“Solução da tabela da 2ª lei de Fourier”) e 9 (“Método da capacitância global”).

Por fim, o objetivo 6 (“Trabalha eficientemente numa equipa para cumprir os restantes resultados de aprendizagem, enquanto demonstra capacidade para planear, dividir tarefas e estabelecer acordos”), está alinhado com orientações transmitidas no conteúdo 12 (Organização do trabalho em equipa).

Em geral, os tópicos de conteúdo e os objetivos de aprendizagem estão alinhados para que os estudantes tenham uma compreensão completa da transferência de calor e suas aplicações em diferentes situações.

A lista de conteúdos é sequencial de 1 a 9, justificando-se pelo facto de a aquisição dos respetivos conhecimentos e desenvolvimento de competências dependerem de outros previamente assimilados/desenvolvidos. Os conteúdos 10 e 11 são abordados em paralelo a outros.

5. Metodologias de ensino

A educação é um processo constante de aprendizagem e a escolha de métodos de ensino adequados é fundamental para garantir a eficácia do processo de ensino-aprendizagem. Existem diferentes abordagens e estilos de ensino, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens. Os métodos mais comuns incluem o ensino expositivo, que é método clássico (desejavelmente já residual atualmente no ensino superior), e o ensino centrado no aluno, através de uma série de metodologias aplicadas mais recentemente.

O ensino expositivo é uma abordagem de ensino tradicional que se concentra na transmissão de informações aos estudantes através de aulas orais ou escritas. Este método pode ser considerado eficaz para a transmissão de informações objetivas, mas é menos eficaz para o desenvolvimento de aptidões práticas.

O ensino centrado no aluno tem o foco na personalização do processo de ensino para acomodar as necessidades individuais dos estudantes. Este ensino tem consideração as aptidões, interesses e estilos de aprendizagem de cada aluno, de forma a aumentar a sua motivação e dedicação.

O docente segue, na arquitetura da sua lecionação, o ciclo de Kolb (Figura 1), desenvolvida na disciplina de Andragogia. Esta é uma teoria, entre outras, que procura descrever a aprendizagem e que enuncia que esta segue um ciclo, por vezes com variações (Cowan, 1998¹), que tem como sequência a “conceptualização”, a “aplicação”, a “ação” e a “reflexão”, voltando-se depois a percorrer o ciclo. A fase do ciclo ideal onde se inicia a aprendizagem depende do estudante. Cada estudante tem um estilo de aprendizagem. Há também várias classificações destes estilos. A classificação que o docente segue é a de Richard Felder² que está alinhada com o ciclo de Kolb. Todos os anos, noutra unidade curricular, solicita-se aos estudantes que preencham um inquérito que identifica o estilo de aprendizagem de cada estudante. Há mais de 14 anos que são realizados estes testes e os resultados são semelhantes de ano para ano e semelhantes ao publicado por Felder em 2005³: a maior parte dos estudantes preferem “ação” (experiência sensorial) e a menor parte prefere “conceptualizar” (mais adequada para começar por apresentar a teoria). Ou seja, o ideal para começar a

¹ J. Cowan (1998) *On Becoming an Innovative University Teacher: Reflection in Action*. Society for Research into Higher education & Open University Press.

² R.M. Felder and R. Brent, *Teaching and Learning STEM: A Practical Guide*, San Francisco: Jossey-Bass (2016), pp. 107–109.

³ R. M. Felder, J. Spurlin (2005) Reliability and validity of scores from the index of learning styles. *Acad. Med.* 80. <https://doi.org/10.1097/00001888-200510001-00026>

abordar cada matéria difere de estudante para estudante, mas, para o estudante mais comum, o ideal é iniciar com uma experiência sensorial (com vídeo, imagem, relembrar a sua experiência, laboratorial, às vezes até com cálculo), para depois ajudá-lo a refletir sobre o que governa o fenómeno apresentado e só depois apresentar a lei/equação, seguida da aplicação da resolução de problemas. O mesmo ciclo de Kolb é usado para orientação na resolução de problemas (Figura 2).

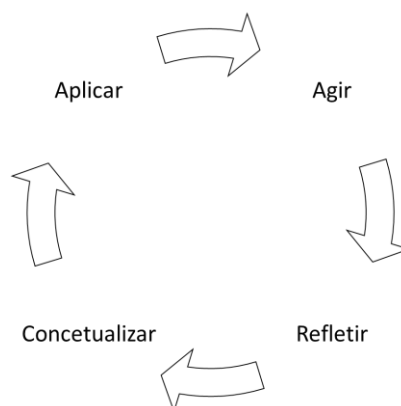


Figura 1 – Ciclo de Kolb (Cowan, 1998)

Sequência de resolução de problemas	Etapa correspondente do ciclo de Kolb
1. Identificar o problema	
2. Seleccione o problema para resolver	⇔ Ação
3. Considere diferentes soluções	⇔ Reflexão
4. Avaliar possíveis resultados	⇔ Conceptualização
5. Implementação da solução	⇔ Aplicação

Figura 2 – Aplicação do ciclo de Kolb à resolução de problemas

Esta é a abordagem seguida em cada nova matéria. Em cada tópico, é então apresentada uma experiência, depois a reflexão do que origina a lei, depois a exposição e revisão da lei, com análise crítica de hipóteses assumidas e simplificações adotadas nesta, e de situações onde a sua aplicação não é inteiramente justificada. Em todo este processo é procurada a interação com o estudante, que obviamente, é prejudicada em turmas de larga dimensão. Nesta fase são usados vídeos sempre que possível, como por exemplo, aquecimento de dois metais diferentes, aquecimento de madeira *vs* metal, aquecimento de copo de plástico com e sem água, convecção de fluido quente em fluido frio e convecção de fluido frio em fluido quente.

Após cada exposição realiza-se pelo menos um exercício para consolidar o que foi apresentado. Uma parte da exposição será usada para apresentar os problemas a resolver no trabalho de grupo e dos aspetos relacionados com o desenvolvimento do trabalho em equipa.

Durante os vários trabalhos e exercícios, insiste-se na confrontação do estudante com dimensões (comprimentos, áreas) para que este tenha uma noção do tamanho de equipamento, alimentos e instalações. O estudante é ainda frequentemente solicitado a pesquisar valores de propriedades em tabelas para se tornar independente em pesquisa dados na bibliografia.

Nos trabalhos de grupo, tipicamente compostos por quatro estudantes, os estudantes colaboram na resolução do problema acompanhados pelo docente, recorrendo a intensivamente a folha de cálculo, e no final realizam uma autoavaliação. A capacidade de trabalho em folha de cálculo é necessária para desenvolvimento genérico de competências em TIC e em específico de cálculo e organização de dados.

O docente está frequentemente disponível para esclarecer dúvidas presencialmente ou por via remota.

6. Metodologias de avaliação

A avaliação dos estudantes é uma parte fundamental do processo de ensino e aprendizagem, pois permite ao professor identificar os pontos fortes e fracos dos alunos e adaptar a sua metodologia de ensino de acordo com as necessidades individuais dos estudantes. Além disso, a avaliação também fornece aos alunos informação sobre o seu progresso e desempenho, o que pode ajudá-los a se motivar e a alcançar seus objetivos de aprendizagem.

Para uma melhor avaliação das diferentes dimensões dos resultados de aprendizagem do aluno, para manter o aluno continuamente focado e para um maior aproveitamento académico deste, a avaliação deve ser periódica e incluir diferentes elementos. Nesta unidade curricular, recorre-se à avaliação por testes escritos, trabalhos em folha de cálculo, participação em sala de aula e avaliação por pares. Cada uma destas metodologias de avaliação permite avaliar diferentes dimensões das capacidades do estudante (conhecimento teórico, aplicação, trabalho em grupo, uso de folha de cálculo).

A avaliação é dividida em dois módulos que por sua vez têm duas peças de avaliação cada: um teste escrito e um trabalho em folha de cálculo.

Módulo 1 – estado estacionário (65%)

- 1) realização de um teste escrito individual (65%; o1 e o2);
- 2) em grupo, resolução de um problema utilizando uma folha de cálculo (35%; o3 e o6).

Módulo 2 – estado transitório (35%)

- 1) realização de um teste escrito individual (65%; o3)
- 2) em grupo, resolução de um problema utilizando uma folha de cálculo ou relatórios de trabalhos laboratoriais (35%; o4, o5 e o6)

A nota mínima a cada módulo é de 7,5 valores.

Os testes são elaborados com questões de desenvolvimento e questões de cálculo, com questões de graus de dificuldade diferentes, desde a mais simples em que o aluno “regurgita” o que ouviu/leu, à mais complexa, para diferenciar adequadamente os conhecimentos dos estudantes.

O resultado do trabalho de grupo é uma folha de cálculo com execução das simulações solicitadas pelo docente e análise crítica dos resultados e dos métodos aplicados. No trabalho prático avalia-se a capacidade autónoma de resolução dos problemas, a capacidade de análise crítica dos resultados e metodologia aplicada e a capacidade de contribuir para a boa dinâmica do grupo.

A atribuição da nota do trabalho de grupo não é necessariamente igual para todos os estudantes do mesmo grupo. Dado que parte do trabalho é realizado em sala de aula, o docente tem oportunidade de conhecer a fundo as competências e a contribuição de cada

estudante no trabalho. No final do trabalho, os estudantes avaliam-se a si próprios e aos colegas do grupo com uma nota de 0 a 20, ajudando o docente a refinar a avaliação individual de cada elemento dentro do mesmo grupo.

As classificações de todas as peças de avaliação são atribuídas numa escala de 0 a 20 valores. A classificação final dos alunos deve refletir os seguintes critérios ao nível do conhecimento, trabalho desenvolvido e capacidade de trabalho em equipa:

De 0 a 25%: O estudante não demonstra compreender o conteúdo apresentado e não consegue responder às questões relacionadas ao assunto. O trabalho apresenta falhas graves e não responde ao solicitado pelo docente. O aluno demonstra pouco interesse ou aptidão para trabalhar em equipa; pode ser desorganizado, não participar ativamente nas tarefas da equipa ou ser intransigente nas suas opiniões.

De 26 a 49%: O estudante apresenta um conhecimento básico do assunto, mas ainda com lacunas e dificuldades em responder às questões mais avançadas. O trabalho apresenta falhas significativas e não responde adequadamente ao solicitado pelo docente. O aluno começa a mostrar interesse em trabalhar em equipa, mas ainda tem muito a aprender; pode ser relutante em colaborar com os outros membros da equipa ou ter dificuldade em se adaptar a diferentes personalidades e estilos de trabalho.

De 50 a 65%: O estudante apresenta um conhecimento satisfatório do assunto, respondendo corretamente às questões de nível intermédio. O trabalho responde minimamente às expectativas estabelecidas, mas apresenta deficiências significativas. O aluno tem uma capacidade razoável de trabalhar em equipa, mas ainda precisa melhorar; pode ter dificuldade em tomar decisões coletivas ou em compreender a perspetiva de outros membros.

De 66 a 85%: O estudante apresenta conhecimento aprofundado do assunto, respondendo corretamente às questões mais complexas. O trabalho responde adequadamente às expectativas estabelecidas, mas ainda pode ter pequenas deficiências. O aluno é capaz de trabalhar efetivamente em equipa com uma contribuição positiva; é flexível e compreensivo, compartilha ideias e opiniões com os outros membros da equipa e ajuda resolver conflitos.

De 86 a 100%: O estudante apresenta conhecimento excepcional do assunto, respondendo corretamente às questões mais avançadas com facilidade e compreendendo os conceitos de forma aplicada. O trabalho é entregue com excelência e responde plenamente às expectativas estabelecidas. O aluno é excepcionalmente talentoso para trabalhar em equipa, quer como líder ou como membro da equipa; é capaz de motivar e inspirar os outros membros da equipa, criando um ambiente de trabalho colaborativo e positivo.

A avaliação segue um alinhamento construtivo com objetivos de aprendizagem e as atividades de ensino-aprendizagem, conforme Biggs (2003)⁴. O alinhamento é explicado nas secções 4 e 7.

⁴ John Biggs (2003) *Teaching for Quality Learning at University* (2nd edn.). Buckingham: The Society for research into Higher Education and Open University Press.

7. Demonstração da coerência das metodologias de ensino com os objetivos de aprendizagem da unidade curricular

Os objetivos da unidade resumem-se ao domínio dos conceitos básicos de transferência de calor em alimentos e a sua aplicação em situações profissionais e do dia a dia. Para isso é necessário que após cada exposição e revisão de leis básicas se resolvam exercícios de aplicação dessas leis. Em exercícios de crescente dificuldade, pratica-se a análise crítica de hipóteses assumidas e simplificações adaptadas nestas leis, e de situações onde a sua aplicação não é inteiramente justificada.

Os trabalhos realizados em grupo são de aplicação prática de simulação ou projeto de instalações de forma a não deixar dúvidas ao estudante do tipo de aplicabilidade da matéria e também para o motivar. Estes trabalhos ao serem realizados em grupo, são apropriados ao desenvolvimento de trabalho em equipa. A composição dos grupos é definida pelo docente para que todos se habituem a trabalhar com todos os colegas, mesmo com aqueles com quem não têm mais afinidade. A autoavaliação realizada no final dos trabalhos é uma ajuda no desenvolvimento futuro do trabalho em equipa.

O objetivo de aprendizagem 1 (“Define e explica, com sentido crítico, as leis fundamentais e propriedades físicas envolvidas em problemas de transferência de calor”) e o objetivo de aprendizagem 2 (“Identifica e comenta com pertinência situações do dia-a-dia e do ambiente profissional em que há transferência de calor, tendo em conta as limitações das leis físicas nos contextos respetivos”) após exposição pelo docente e constante interação com o estudante solicitando a fundamentação da sua resposta.

O objetivo de aprendizagem 3 (“Aplica as leis de transferência de calor para resolver problemas de estado estacionário e transiente”) é atingido por resolução de exercícios e dos trabalhos de simulação.

Os objetivos de aprendizagem 4 (“Simula situações de processamento de alimentos usando soluções tabulares na aplicação de leis de transferência de calor e obter soluções”), 5 (“Comenta, com sentido crítico, a credibilidade e utilidade dessas soluções”) e 6 (“Trabalha eficientemente numa equipa para cumprir os restantes resultados de aprendizagem, enquanto demonstra capacidade para planear, dividir tarefas e estabelecer acordos”), atingem-se através da execução de trabalhos práticos.

Em geral, os objetivos de aprendizagem estão suportados por uma metodologia de ensino adequada, baseado na abordagem inicial ao estilo de aprendizagem sensorial e aquisição paulatina de conhecimentos e capacidades de cálculo e de trabalho em grupo.

8. Plano de aulas detalhado e descrição da sua execução

As aulas são lecionadas conforme a duração de 2 -a 2,5 h e devem ser ajustadas às capacidades dos estudantes. Por essa razão, de seguida descrevem-se os blocos de ensino em que cada pode corresponder a uma ou mais aulas.

Bloco	Conteúdo	Duração
1	Apresentação e introdução Objetivos e programa da unidade curricular, material de apoio, regime de faltas, metodologias de ensino e avaliação. Teste de avaliação formativa de conceitos de base necessários à iniciação do estudo de Transferência de Calor. Correção do teste.	2 h
2	Mecanismos de transferência de calor Definição de taxa e de fluxo de transferência de calor. Resolução de exercício. Definição de transferência de calor por condução em gases, líquidos e sólidos. Primeira lei de Fourier. Resolução de exercício. Métodos de determinação da condutividade térmica. Resolução de exercício. Definição de transferência de calor por convecção em gases e líquidos: Lei do arrefecimento de Newton. Resolução de exercício. Definição de transferência de calor por radiação: Lei de Stefan-Boltzmann. Resolução de exercício. Primeira lei de Fourier aplicada a cilindro e esfera: integração da 1ª lei de Fourier. Resolução de dois exercícios. Geração de calor. Identificação de mecanismos de transferência de calor em métodos de cozinhar.	Módulo 1: estado estacionário 8h
3	Conceito de resistência térmica Redes de resistência térmica em paralelo ou em série. Resistência de contacto. Resolução de exercício. Raio crítico de isolamento. Resolução de exercício.	Módulo 1: estado estacionário 4 h

Bloco	Conteúdo	Duração
4	<p>Estimativa de coeficientes de transferência de calor</p> <p>Convecção natural: previsão de coeficientes de transferência de calor sobre superfícies e em cavidades. Resolução de dois exercícios.</p> <p>Convecção forçada: previsão de coeficientes de transferência de calor sobre e dentro de tubos. Resolução de exercício.</p>	<p>Módulo 1: estado estacionário</p> <p>4 h</p>
5	<p>Permutadores de calor</p> <p>Tipos de permutador, balanços térmicos em co-corrente e contracorrente. Resolução de dois exercícios.</p>	<p>Módulo 1: estado estacionário</p> <p>6 h</p>
6	<p>Trabalho de balanços térmicos a uma sala</p> <p>Apresentação dos objetivos e orientação sobre a realização do trabalho.</p> <p>Realização do trabalho: criação de grupos de trabalho, distribuição das salas; medição de dimensões de materiais e cálculo de áreas; trabalho em folha de cálculo.</p>	<p>Módulo 1: estado estacionário</p> <p>10 h</p>
7	<p>Esclarecimento de dúvidas e Teste de avaliação do módulo 1.</p>	<p>Módulo 1: estado estacionário</p> <p>4 h</p>
8	<p>Estado transitório: dedução da equação de condução de calor numa dimensão.</p> <p>2ª lei de Fourier, números adimensionais, solução tabelar e solução gráfica. Resolução de exercício.</p> <p>Solução tabelar da 2ª lei de Fourier para sólido semi-infinito. Resolução de exercício.</p> <p>Aplicação das soluções da 2ª lei de Fourier a sistemas multidimensionais. Resolução de exercício.</p>	<p>Módulo 2: Estado transitório</p> <p>7 h</p>
9	<p>Estado transitório: método da capacitância global. Resolução de quatro exercícios.</p>	<p>Módulo 2: Estado transitório</p> <p>3 h</p>

Bloco	Conteúdo	Duração
10	Execução dos trabalhos práticos de estado transitório: A determinação de coeficientes de transferência de calor de ar e de água B determinação experimental de difusividade térmica de alimentos C simulação do aquecimento de enlatados durante a esterilização D simulação do aquecimento/arrefecimento de um produto alimentar	Módulo 2: Estado transitório 8 h
11	Esclarecimento de dúvidas Teste de avaliação do módulo 2 (estado transitório).	Módulo 2: Estado transitório 4 h

Bloco 1

A primeira aula consta da apresentação do docente, informação sobre o material de apoio, o que o estudante deve trazer em cada aula (máquina calculadora, fichas de exercícios, cópia dos diapositivos - o estudante pode usar telemóvel ou tablet para estas funções).

Depois enquadra-se a unidade curricular (UC) no curso, expondo a motivação para a esta matéria, seguida dos objetivos, métodos de ensino e de avaliação. Realça-se a necessidade do estudante associar o que se aborda na UC ao ambiente diário que o rodeia, para este não compartimentar o que se aborda na UC como algo que só vai observar em ambiente profissional quando se inerir no mercado de trabalho. A perceção dos mecanismos de transferência de calor, a noção da potência de equipamentos do dia-a-dia (ex: aquecedores, frigoríficos), assim como dimensões de equipamentos, são noções que o estudante deve adquirir para ter noção posteriormente das dimensões dos equipamentos a nível profissional. Dá-se o exemplo de *sous vide* como técnica que requer o ajuste minucioso do aquecimento.

A introdução conclui-se com um teste de avaliação formativa, que consta de questões sobre integrais, equações diferenciais, unidades e exercícios de simples raciocínio com dedução de simples equações e aplicação de interpolações. Logo de seguida é resolvido o teste para esclarecimento de dúvidas. Este exercício permite consciencializar os estudantes das suas dificuldades base para frequentar a UC e focar-se no suprimento, a curto-prazo, das suas

lacunas, separando ainda, na sua autoavaliação, o que são dificuldades de base de dificuldades de compreensão da matéria da UC.

Informa-se que a UC é dividida em duas partes - estado estacionário e estado transitório – e explica-se o que caracteriza cada um dos estados (respetivamente, temperaturas constantes ao longo do tempo, mas diferentes ao longo do espaço e temperaturas a alterar ao longo do tempo).

Alerta-se que em todos os problemas/casos de estudo, o estudante deve primeiro interpretar quanto a quatro dimensões: estado estacionário vs estado transitório, geometria (placa, cilindro, esfera, sólido semi-infinito), mecanismos de transferência de calor e conservação de energia.

Bloco 2

Os blocos 2 a 6 abordam a transferência de calor em estado estacionário, com aplicações em equipamentos. O estudante será capaz de calcular taxas de transferência de calor de modo a sugerir dimensões e potências de equipamentos e temperaturas de correntes.

Neste bloco começam-se por introduzir os parâmetros base (taxa e fluxo de calor) e os mecanismos de transferência de calor base (condução, convecção e radiação).

Apresentam-se as equações da 1ª Lei de Fourier, da lei de Newton e a de Stefan-Boltzmann. A 1ª lei de Fourier é integrada para a geometria de placa, seguida de aplicação, e só depois de apresentados os outros mecanismos se apresenta a integração para as geometrias de cilindro e esfera.

Todos os tópicos são introduzidos com uma explicação, incluindo exemplos onde se verificam no dia-a-dia e em ambientes profissionais (oralmente, recorrendo a interação com o estudante, com apoio de imagens ou vídeos), concluindo com a aplicação num exercício.

A aplicação rápida, através de um exercício permite captar a atenção de estudantes do tipo sensorial, que só quando estão a realizar exercícios se conseguem concentrar na matéria.

O bloco termina com a apresentação da geração de calor, sem aplicação de cálculo, exemplificando no armazenamento de frutas e vegetais. Ainda, revê-se os métodos de cozinhar alimentos para identificar os mecanismos de calor, mais uma vez, para o estudante avaliar numa situação do dia-a-dia. Realça-se ainda as dimensões do calor específico e da condutividade térmica de materiais em contacto com alimentos.

Bloco 3

É introduzido o conceito de resistência térmica por analogia ao conceito de resistência elétrica já conhecido dos estudantes de currículos anteriores de Física. Esta ferramenta

permite resolver problemas de diversos materiais/fluidos em equipamentos diversos, sendo o caso dos permutadores o mais simples que é abordado mais adiante. Esta ferramenta ajuda o estudante a olhar para problema a associar um mecanismo a uma fase. Algo que antes ainda não lhe é claro até aqui.

O paradoxo do raio crítico de isolamento é abordado nesta sequência, esclarecendo em que dimensões este é crítico.

Bloco 4

O estudante manuseia uma série de equações para previsão dos coeficientes de transferência de calor em convecção forçada e convecção natural, sobre superfícies, dentro de tubo e em cavidades.

Se o estudante não tem conhecimento aprofundado de mecânica de fluidos, típico de engenharias química ou mecânica, a abordagem pode ser restrita à aplicação a números adimensionais e os tipos de fluxo.

Bloco 5

Os permutadores de calor são objeto de abordagem mais profunda. Identificam-se os diversos tipos de permutadores, realçando-se a eficiência maior dos permutadores em contra-corrente. Nestes exercícios associa-se a previsão dos coeficientes de transferência de calor quer em convecção forçada quer em convecção natural. Apresenta-se o conceito de coeficiente global de transferência de calor e relaciona-se com a definição de resistência térmica global.

Bloco 6

Para desenvolver competências de trabalho em grupo, noção à escala real de comprimentos e áreas, e de utilização de folha de cálculo, os estudantes realizam um trabalho de simulação da taxa de perda/ganho de calor no inverno/verão de uma sala.

Primeiro, o docente começa por definir a composição dos grupos. Até ao início deste trabalho, o docente já teve oportunidade de identificar as competências de cada estudante nesta UC. Depois de anos de experiência a trabalhar com grupos heterogéneos (mistura de estudantes com facilidade e interesse à UC e de estudantes com dificuldade), verificou-se que os estudantes com mais necessidade de desenvolver as suas competências não o conseguiam porque não conseguiam acompanhar os colegas mais rápidos ou se aproveitavam do trabalho dos colegas e não se esforçavam por aprender. Atualmente, sempre que possível, os grupos são homogéneos quanto à capacidade de cada estudante à UC. Assim, no caso de estudantes

com mais dificuldades, há pelo menos um que vai tomar as rédeas de aplicar-se para perceber e cumprir com as tarefas.

Dado que parte do trabalho é realizado em sala de aula, o docente tem oportunidade de conhecer a fundo as competências e a contribuição de cada estudante no trabalho. Ainda, no final do trabalho, os estudantes avaliam-se a si próprios e aos colegas do grupo com uma nota de 0 a 20, ajudando o docente a refinar a avaliação individual de cada elemento dentro do mesmo grupo.

A realização do trabalho começa pela medição das dimensões de uma sala: altura e largura de paredes, janelas, vidros, portas e medição/estimativa de espessuras. Esta atividade permite que os estudantes tenham noção de comprimentos (que não só a sua altura!) e de áreas de zonas que são equiparadas a câmaras frigoríficas industriais e outras salas menores em indústrias.

De seguida introduzem todos os dados numa folha de cálculo com todas dimensões pertinentes a quatro paredes, teto e chão. Por cada parede calculam áreas em células na folha de cálculo, desenham o esquema de resistências, inserem valores das propriedades dos materiais. Assumem as temperaturas de conforto para inverno/verão como as temperaturas extremas exteriores e calculam a taxa de perda/ganho de calor na sala.

Após a simulação bem realizada para um conjunto de materiais/temperaturas, os estudantes devem fazer alterações para responder a uma série de questões:

- i. O coeficiente de transferência de calor de $2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ é um valor razoável quer para o interior quer para o exterior e quer para as superfícies horizontais e quer para as verticais?
- ii. Qual a influência de vidros duplos em vez de vidros simples.
- iii. Qual a influência do vento na transferência de calor?
- iv. Qual a influência do uso de outros materiais nas paredes?
- v. Qual a influência do uso de valores de condutividade rigorosos (comparar diferentes valores de condutividade para o material)?

O trabalho em folha de cálculo ajuda o estudante a desenvolver competências nesta ferramenta que é sempre útil em ambiente profissional.

Bloco 7

O primeiro teste escrito é sobre estado estacionário, matéria abordada nos blocos 2 a 6.

Bloco 8

Os blocos 8 a 9 abordam a transferência de calor em estado transitório, com aplicações na área alimentar.

Começa-se por abordar a 2ª lei de Fourier, deduzindo-a para a geometria de placa e fazendo a analogia para as geometrias de cilindro e de esfera. Apresentam-se as várias soluções da 2ª lei (analítica, numérica e tabelar/gráfica) e identificam-se as limitações de cada uma. Depois desenvolve-se e aplica-se a solução tabelar em exercícios, para as quatro geometrias ideais (placa infinita, cilindro infinito, esfera e sólido semi-infinito) e geometrias compostas resultantes da intersecção de geometrias ideais.

Bloco 9

O método da capacitância global é exposto e aplica-se em alguns exercícios. No final, resume-se o esquema de resolução deste tipo de exercícios:

- i. Fluido a aquecer/arrefecer fluido contido numa superfície → aplicar capacitância global
- ii. Fluido a aquecer/arrefecer sólido:
 - a. $Biot < 0,1$ → aplicar capacitância global
 - b. $Biot > 0,1$ → aplicar solução tabela da 2ª lei de Fourier para valores do n° de Fourier superiores a 0,2

Bloco 10

Em grupo, definido como no trabalho anterior, os estudantes realizam três trabalhos de entre os seguintes:

- i. Determinação experimental de coeficientes de transferência de calor de ar e de água
- ii. Determinação experimental de difusividade térmica de alimentos
- iii. Simulação do aquecimento de enlatados durante a esterilização (inclui comparação com dados experimentais)
- iv. simulação do aquecimento/arrefecimento de um produto alimentar

Bloco 11

O segundo teste escrito é sobre “estado transitório”, matéria abordada nos blocos 8 e 9.

9. Bibliografia recomendada

É recomendado o livro de Yunus Çengel, dada a qualidade das suas explicações e qualidade gráfica atrativa:

ÇENGEL, Y.A. 2002. Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd edition. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. [descarregar em ResearchGate] Capítulos: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 e 9

Para os alunos que têm dificuldade em inglês, recomenda-se a tradução brasileira de, por exemplo:

INCROPERA, F.P., De WITT, D.P. 1998. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 4ª edição, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro.

ou o livro original brasileiro:

João Carlos Martins Coelho. 2019. Energia e Fluidos – Transferência de Calor (vol. 3). Blucher, São Paulo. ISBN: 9788521218418

Anexo A – Descrição dos trabalhos práticos

Trabalho de estado estacionário: balanços térmicos a uma sala

1. Meça as dimensões de uma sala pertinentes para os balanços térmicos: altura e largura de paredes, janelas, vidros, portas e medição/estimativa de espessuras.
2. Usar folha de cálculo para calcular todas as áreas das quatro paredes, teto e chão.
3. Por cada parede, desenhe o esquema de resistências, insira os valores das propriedades dos materiais. Assuma a temperatura de conforto para inverno/verão, assim como as temperaturas da sala e assumas temperaturas extremas exteriores.
4. Calcule o calor perdido por cada parede usando a tabela modelo fornecida (ver abaixo)

	T(ext) °C	6							
	T(int) °C	22							
	T(terra) °C	13							
	Qtotal=								

Parede 1	Área (m²)	k(w/m.k)	h ou k/L (w/m².k)	Δx(m)	Resistência			Rtotal	Q (w)
						(série)	(paralelo)		
Mosaico	7.7	2.9		0.02	0.0009	0.0159	0.00749	0.06701	239
Cimento	7.7	1.4		0.09	0.0083				
Tijolo	7.7	1		0.02	0.0026				
Cimento	7.7	1.4		0.025	0.0023				
Mosaico	7.7	2.9		0.04	0.0018	0.0154			
Cimento	7.7	1.4		0.02	0.0018				
Tijolo	7.7	1		0.09	0.0117				
Cimento	7.7	1.4		0.02	0.0019				
Madeira	1.4	0.12		0.03	0.1786	0.1786			
Ar (ext)	16.8		2		0.0298				
Ar (int)	16.8		2		0.0298		0.02976		
Área Total parede	16.8								

5. Aconselhe a potência de aquecimento para o inverno e de arrefecimento para ao verão para a sala.

6. responda às seguintes questões:

- a. O coeficiente de transferência de calor de $2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ é um valor razoável quer para o interior quer para o exterior e quer para as superfícies horizontais e quer para as verticais?
- b. Qual a influência de vidros duplos em vez de vidros simples.
- c. Qual a influência do vento na transferência de calor?
- d. Qual a influência do uso de outros materiais nas paredes?
- e. Qual a influência do uso de valores de condutividade rigorosos (comparar diferentes valores de condutividade para o material)?

Trabalho de estado transitório: determinação de coeficientes de transferência de calor de ar e de água

Resultados a obter:

- calcular h da água ou do ar
- Criticar a validade dos resultados

Dados experimentais:

- Temperatura da estufa (ou banho) ao longo do tempo
- Temperatura do centro do cubo metálico ao longo do tempo (anotar T a cada minuto quando na estufa e cada 5 segundos quando no banho)

Montagem experimental:



Trabalho de estado transitório: determinação experimental de difusividade térmica de alimentos

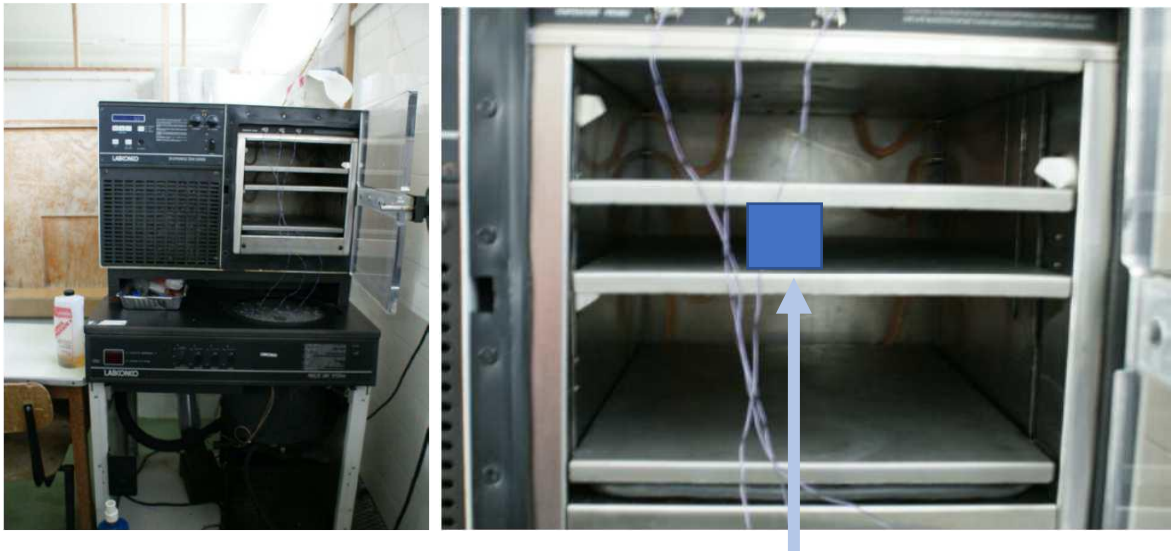
Resultados a obter:

- calcular a de um alimento
- Criticar a validade dos resultados

Dados experimentais:

- Temperatura das paredes ao longo do tempo
- Temperatura do centro do cubo metálico ao longo do tempo (anotar T a cada minuto)

Montagem experimental:



Alimento com termopar no centro

Trabalho de estado transitório: simulação do aquecimento de enlatados durante a esterilização

Resultados a obter:

- comparar as histórias de temperatura experimentais com as previstas baseadas nas soluções da 2ª lei de Fourier e capacitância global
- criticar os resultados

Dados experimentais:

- Temperatura das paredes ao longo do tempo
- Temperatura do centro do alimento ao longo do tempo

Cálculo:

- Utilizar as soluções da 2ª lei de Fourier e capacitância global em folha de cálculo

Dados:

- Lata cilíndrica em ferro e estanho (altura=109 mm; diâmetro=73 mm; espessuras do tampo=0,23 mm e corpo da lata=0,19 mm)
- Termopar a meia altura com 36,5 mm de comprimento
- Alimentos: cubos de cenoura de 1 cm de lado e feijão (2 / 0,5 cm) em salmoura com 2% (40% líquido 60% produto)
- Dados de temperatura vs tempo a fornecer pelo docente

Trabalho de estado transitório: simulação do aquecimento/arrefecimento de um produto alimentar

Resultados a obter:

- Simular o efeito da alteração de condições operacionais em tempos de processamento e perfis de temperatura
- Criticar os resultados

Escolher processo, produto e condições operacionais.

Cálculo: utilizar as soluções da 2ª lei de Fourier em folha de cálculo

Anexo B – Fichas de exercícios

Ficha de Exercícios N° 1

Transferência de Calor em Estado Estacionário: 1ª lei de Fourier (condução), lei de Newton (convecção), lei de Stefan-Boltzman (radiação), aplicação à geometria de placa, cilindro e esfera

Ficha de Exercícios N° 2

Transferência de Calor em Estado Estacionário: condução e convecção em materiais em série/paralelo

Ficha de Exercícios N° 3

Transferência de Calor em Estado Estacionário: estimativa de coeficientes de transferência de calor em convecção natural

Ficha de Exercícios N° 4

Transferência de Calor em Estado Estacionário: estimativa de coeficientes de transferência de calor em convecção forçada

Ficha de Exercícios N° 5

Transferência de Calor em Estado Estacionário: convecção forçada – permutadores de calor

Ficha de Exercícios N° 6

Transferência de Calor em Estado Transiente: condução em placas, cilindros, esferas e sistemas multidimensionais

Ficha de Exercícios N° 7

Transferência de Calor em Estado Transiente: sistemas de capacitância global

Ficha de Exercícios Nº 1

(Transferência de Calor em Estado Estacionário: 1ª lei de Fourier (condução), lei de Newton (convecção), lei de Stefan-Boltzman (radiação), aplicação à geometria de placa, cilindro e esfera)

1. Uma ervilha de 1 cm de diâmetro é aquecida em água de 20°C a 100°C. A massa específica é de 800 kg m⁻³ e a calor específico é de 3,32 kJ kg⁻¹ °C⁻¹. Assumindo que a ervilha não sofre qualquer alteração da sua composição durante o aquecimento, determine:
 - a) O calor total transferido para a ervilha.
 - b) A taxa média de transferência de calor se a ervilha atingir a temperatura final no centro ao fim de 10 minutos.
 - c) O fluxo de calor médio.
2. Água líquida inicialmente a 15°C é aquecida a 95°C numa chaleira eléctrica de 1200W. A chaleira pesa 0,5 kg e possui um calor específico de 0,7 kJ kg⁻¹ °C⁻¹. A massa de água na chaleira é de 1,2 kg e calor específico da água é de 4,18 kJ kg⁻¹ °C⁻¹. Negligenciando qualquer perda de calor da chaleira, determine quanto tempo é necessário para aquecer a água.
3. Uma parede apresenta temperaturas de 10 e 20°C nos seus extremos (L=20 cm, A= 15 m²).
 - a) Sabendo que a sua condutividade é de 0,003 W m⁻¹ K⁻¹, calcule o fluxo de calor.
 - b) Desenhe o gráfico de perfil de temperatura na parede.
 - c) Se o calor perdido estiver a ser fornecido por energia eléctrica e esta custar 0,10€/kWh, calcule o valor das perdas.
4. No início da fritura de uma rodela de batata (5 cm de diâmetro, 1,5 mm de espessura) o coeficiente de transferência de calor (h) é de 250 Wm⁻² K⁻¹. A temperatura da superfície da batata rapidamente atinge os 103°C.
 - a) Se a temperatura do óleo for de 180°C, qual o fluxo de calor recebido pela batata?
 - b) Assumindo que todo o calor transferido para a batata é usado para evaporação da água presente calcule a taxa de evaporação ($\Delta H_{\text{evap}} = 2257 \text{ J g}^{-1}$).
5. Considere uma pessoa num quarto que está a 22°C onde as paredes interiores, o piso e o teto estão a 10°C no inverno e a 25°C no verão. A emissividade de um ser humano é de 0,95.
 - a) Determine taxa de calor transferido por radiação entre a pessoa e as superfícies envolventes se a sua área exposta for de 1,4 m² e a temperatura de 30°C.
 - b) Se o coeficiente de transferência de calor do ar que envolve a pessoa for de 6 Wm⁻²°C⁻¹, calcule a taxa de transferência de calor total perdida por convecção e radiação e o coeficiente de transferência de calor combinado.

6. Uma panela de alumínio de $237 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ de condutividade térmica tem uma base plana de 20 cm de diâmetro e uma espessura de 0,4 cm. A água incluída na panela é aquecida pela base a uma taxa de 500 W. Se a temperatura interior da base da panela for de 105°C , qual temperatura exterior desta base.
7. Uma forma de medir a condutividade térmica de um material é colocar uma resistência elétrica entre duas amostras retangulares do material e isolar as paredes laterais deste. Considere amostras de 0,5 cm x 10 cm x 10 cm em que as temperaturas das superfícies em contacto com as amostras são de 82°C e as das superfícies exteriores de 74°C .
 - a) Se a energia debitada pela resistência for 35 W determine a condutividade térmica à temperatura média.
 - b) Desenhe o gráfico de perfil de temperatura no material.
8. Um medidor de fluxo calorífico colocado no interior da porta de 3 cm de espessura de um refrigerador indica um valor de 25 W m^{-2} . Se as temperaturas das superfícies interiores e exteriores forem respetivamente, 7°C e 15°C , determine a condutividade média da porta do refrigerador.
9. Para análise da transferência de calor de uma pessoa, pode-se assumir um cilindro com 30 cm de diâmetro, 1,70 m de altura, com topos isolados e uma temperatura à superfície de 34°C . Se o coeficiente de transferência de calor for de $15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, determine a taxa de perda de calor para o ambiente a 20°C .
10. Uma parede de cortiça de 10 cm de espessura tem uma das suas superfícies à temperatura de -12°C e a outra a 21°C . Considerando que a condutividade térmica média da cortiça, para esta gama de temperaturas, é de $0,042 \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$:
 - a) Determine a taxa de transferência de calor por unidade de superfície.
 - b) Qual seria o fluxo de calor no caso de duplicarmos a espessura da parede?
 - c) Determine o perfil de temperaturas ao longo da parede.
 - d) Determine as temperaturas a 3, 4, e 5 cm de distancia da superfície a 21°C .
 - e) Determine a espessura de uma parede de cortiça que permite reduzir a taxa de transferência de calor para metade do valor que calculou na alínea a).
11. Um ferro de passar-a-roupa de 1000 W é pousado na tábua exposto ao ar a 20°C . O coeficiente de transferência de calor entre a base do ferro e o ar é de $35 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Se a base possui uma emissividade de 0,6 e uma área de $0,02 \text{ m}^2$, determine a temperatura da base do ferro.
12. Um contentor esférico de ferro de 20 cm de diâmetro externo e 0,4 cm de espessura encontra-se cheio de água com gelo a 0°C . Se a temperatura à superfície for de 5°C , determine a taxa de ganho de calor e taxa de fusão do gelo ($\Delta H_{\text{fusão}} = 333,7 \text{ kJ kg}^{-1}$).
13. Um tubo de aço-inoxidável, de condutividade térmica $43 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, com 2 cm de espessura e 6 cm de diâmetro interno, é utilizado para o transporte de vapor numa dada instalação fabril. Considerando que a superfície interna do tubo está a 115°C , que a sua superfície externa está a 90°C e que o tubo tem um comprimento total de 40 m, quais serão as perdas totais de energia ao longo de 24 horas?
14. Uma vareta de aço com 1 in de diâmetro é colocada com um extremo em água em ebulição a 212°F e com um outro num banho de gelo. A vareta, com a exceção dos topos, está isolada por forma a prevenir perdas ou ganhos de calor através da superfície externa. Considerando que o comprimento da vareta é de 30 in calcule a taxa de calor que circula através da vareta desde o banho quente até ao banho frio. A condutividade térmica do aço é $30 \text{ BTU}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F})$.

15. A temperatura de ebulição de azoto à pressão atmosférica ao nível do mar (1 atm) é -196°C . O calor de vaporização é 198 kJ kg^{-1} e a densidade de 810 kg m^{-3} a 1 atm. Considere um tanque esférico inicialmente cheio com azoto líquido e exposto a uma temperatura ambiente de 20°C com um coeficiente de transferência de calor de $25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. A temperatura do contentor propriamente dito é sempre igual à do azoto. Calcule a taxa de evaporação do azoto nestas condições.

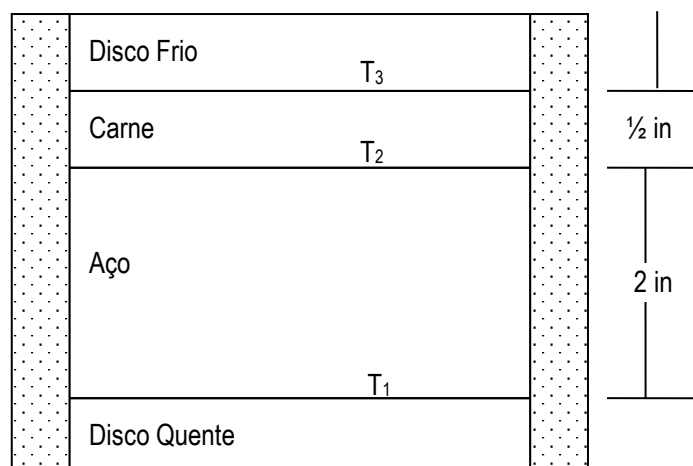
SOLUÇÕES

- | | |
|---|---|
| 1. 111 J ; $0,185 \text{ W}$; 589 W m^{-2} | 10. $13,9 \text{ W m}^{-2}$; $6,93 \text{ W m}^{-2}$; $T=331(0.1-x)-$ |
| 2. $6,0 \text{ min}$ | 12 ; $11,2^{\circ}\text{C}(3 \text{ cm})$, $7,9^{\circ}\text{C}(4 \text{ cm})$, $4,6^{\circ}\text{C}(5$ |
| 3. $0,15 \text{ W m}^{-2}$; $6,23 \times 10^{-8} \text{ € s}^{-1}$ | $\text{cm})$; 20 cm |
| 4. $19,3 \text{ kW m}^{-2}$; 35 mg s^{-1} | 11. 667°C ($T_{\text{paredes}}=20^{\circ}\text{C}$) |
| 5. $40,9 \text{ W (V)}$, 152 W (I) ; 108 W (V) , $9,6$ | 12. 12 kW ; 36 g s^{-1} |
| $\text{W m}^{-2}\text{C}^{-1}\text{(V)}$, 219 W (I) , $19,6 \text{ W m}^{-2}\text{C}^{-1}\text{(I)}$ | 13. -391 J |
| 6. $105,3^{\circ}\text{C}$ | 14. $11,8 \text{ BTU h}^{-1}$ |
| 7. $1,09 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ | 15. $27,3 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ |
| 8. $0,094 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ | |
| 9. 336 W | |

Ficha de Exercícios N° 2

(Transferência de Calor em Estado Estacionário: condução e convecção em materiais em série/paralelo)

- Uma tubagem de aço estandardizada, cujos diâmetros internos e externo são 1,049 in e 1,315 in, respetivamente, transporta vapor para aquecimento de uma autoclave vertical. A tubagem está isolada por uma camada de 2 in de espessura de cobertura de magnésia, e por fora desta camada existe uma outra de 3 in de cortiça. A temperatura interna da tubagem é de 249°C, e a temperatura exterior da camada de cortiça é de 90°C. As condutividades térmicas são, expressas em $\text{BTU}/(\text{h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F})$: 26 para o aço, 0,034 para a magnésia e 0,03 para a cortiça. Determine:
 - As perdas de calor ao longo de 10 metros de tubagem, expressas em Watt.
 - As temperaturas nas fronteiras de transição entre o aço e a magnésia, e entre a magnésia e a cortiça.
- O transporte de azoto liquefeito é feito em reservatórios esféricos bem isolados e com um pequeno orifício aberto para a atmosfera, de modo a não deixar elevar a pressão no interior do reservatório. Um desses depósitos, com o diâmetro interno de 1m em aço inoxidável ($k_{\text{aço}}=40\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$) com uma espessura de 50 mm foi recoberto com uma camada de 25mm de um material superisolante ($k=0,0002\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$). Se o azoto estiver a -320°F e tiver um calor latente de vaporização de 85,8 BTU/lb, qual a perda por evaporação se o exterior estiver a 70°F ?
- Um aparelho utilizado para determinar a condutividade térmica de alimentos sólidos está esquematizado na figura abaixo. O alimento é colocado entre duas placas de aço inoxidável. Uma (quente) aquecida por um disco e outra (fria) mantida a uma baixa temperatura. As duas placas são mantidas a temperatura constante. As paredes laterais são completamente isoladas. Após se atingir o estado estacionário são registadas as temperaturas T_1 , T_2 e T_3 . Considerando uma experiência levada a cabo com carne, foram registadas as temperaturas de 120°F , 118°F e 97°F , respetivamente para as temperaturas T_1 , T_2 e T_3 . Sabendo que o valor da condutividade térmica do aço inoxidável a esta temperatura é de $12,5\text{ BTU}/(\text{h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F})$, determine o valor da condutividade térmica da carne.



- Considere a parede desenhada abaixo:
 - Represente o circuito eléctrico equivalente.
 - Calcule o calor transferido por unidade de área. Considere fluxo de calor unidimensional.

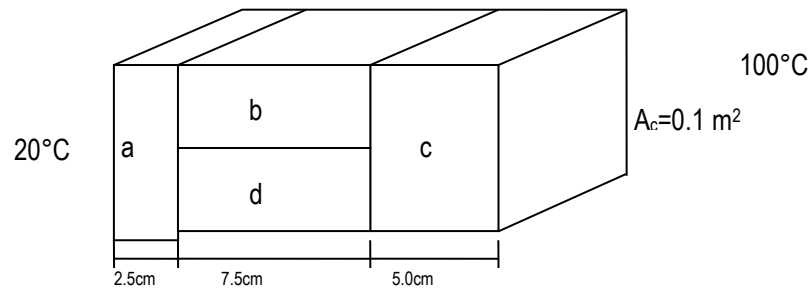
$$k_a = 175 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

$$k_b = 35$$

$$k_c = 60$$

$$k_d = 80$$

$$A_b = A_d$$



5. As paredes de um secador de legumes cilíndrico são feitas de uma camada de 0,25 in de espessura de um material de condutividade térmica de 0,43 BTU/(h*ft*°F). Quando o secador é operado, a temperatura no seu interior é de 160°F e a temperatura ambiente é de 85°F. Calcule-se que o coeficiente de transferência de calor entre o ar e a superfície interna seja de 15 BTU/(h*ft²*°F) e entre a superfície externa e o ar ambiente seja de 3 BTU/(h*ft²*°F).
- Deseja-se reduzir as perdas de calor para 25% do seu valor actual por adição de uma camada de um isolante com uma condutividade térmica igual a 0,05 BTU/(h*ft*°F) colocado à superfície. Sabendo que o raio externo do secador (sem o isolamento) é de 2 ft, calcule a espessura de isolante necessária para se obter o fim pretendido e a temperatura da superfície externa nessas condições.
 - Calcule o raio crítico da camada de isolante.

SOLUÇÕES

1. 261 W; 249°C; 150°C

2. 0,12 kg h⁻¹

3. 0,298 Btu h⁻¹ ft⁻¹ °F⁻¹

4. 3,52x10⁴ W m⁻²

5. 0,828 in, 98,5°F; 0,2 in

Ficha de Exercícios N° 3

(Transferência de Calor em Estado Estacionário: estimativa de coeficientes de transferência de calor em convecção natural)

- Um tubo de aço inox polido de 6 m de comprimento e 8 cm de diâmetro colocado na horizontal, apresenta uma temperatura na superfície exterior de 70°C. Se a temperatura no ar e paredes em redor do tubo for de 18°C calcule:
 - A taxa de calor perdido por convecção natural.
 - A taxa de calor perdido por radiação. Comente.
- Considere uma placa de 0,6 m x 0,6 m num quarto a 30°C. Um dos lados da placa é mantido a 74°C enquanto o outro está isolado. Determine a taxa de perda de calor por convecção natural se a placa está colocada nas seguintes posições:
 - Vertical.
 - Horizontal virada para cima.
 - Horizontal virada para baixo.
- Um vidro duplo de 0,8 m de altura e 2 m de largura consiste de dois vidros separados por 2 cm de ar à pressão atmosférica. Se a temperaturas interiores dos vidros forem de 12°C e 2°C, determine a taxa de transferência de calor através do vidro duplo.
- Um tubo cilíndrico ($d_{ext}=100$ mm, $d_{in}=25$ mm) é feito de metal e está colocado na horizontal no interior de um tanque com água que é mantida a 20°C. A parede interior do tubo é mantida a 600°C e a parede exterior a 60°C, $k_{metal}=65-0,05*T$ em $W m^{-1}K^{-1}$, com T em °C.
 - Qual a potência calorífica perdida por metro de comprimento do tubo?
 - Qual o coeficiente de transferência de calor entre a parede exterior e a água?
 - Por comparação deste valor com as expressões convenientes, diga se a transferência para a água é por convecção natural ou forçada.
- Uma placa plana de um material B ($k_B= 1 W m^{-1} °C^{-1}$) de 20 cm de espessura produz calor à taxa H ($W m^{-1}$). Uma das faces está revestida por um material isolante A cuja condutividade térmica varia linearmente com a temperatura. A outra face está revestida por um outro material isolante C ($k_C= 0,1 W m^{-1} °C^{-1}$). A espessura do isolante A é 2 cm e a do isolante C é de 5 cm. A temperatura ambiente é de 25°C. A temperatura da face interna do material A é de 200°C e a externa é de 40°C. A condutividade térmica deste material a estas temperaturas é de 0,06 e 0,03 $W m^{-1} °C^{-1}$, respectivamente. A altura das placas é de 0,8 m. Nestas condições e considerando o estado estacionário, calcule;
 - O fluxo calorífico no isolante A.
 - O coeficiente pelicular de transferência de calor à superfície. Usando expressões convenientes, determine se a transferência de calor para o ar se efectua por convecção natural ou forçada. Se a convecção for forçada determine a velocidade do ar.
 - A temperatura da placa C em cada uma das faces e a taxa de geração de calor H.

SOLUÇÕES

- | | |
|---------------------------|---|
| 1. 463 W; 95,8 W | 4. 119 kW/m; 9446 $W m^{-2} °C$ |
| 2. 68,1 W; 88,1 W; 44,4 W | 5. 360 $W m^{-2}$; 13,5 $m s^{-1}$; 38,7°C, 3444 $W m^{-1}$ |
| 3. 25,9 W | 1 |

Ficha de Exercícios N° 4

(Transferência de Calor em Estado Estacionário: estimativa de coeficientes de transferência de calor em convecção forçada)

1. Óleo de motor a 60°C flui sobre uma placa de 5 m de comprimento, cuja temperatura é de 20°C, a 2 m s⁻¹. Determine taxa de transferência de calor por unidade de largura da placa.
2. Um tubo de 10 cm de diâmetro em que circula vapor e cuja temperatura exterior é de 110°C atravessa uma área aberta que não está protegida contra ventos. Determine a taxa de perda de calor por metro de comprimento de tubo quando o ar está a uma pressão de 1 atm e a 4°C e o vento possui uma velocidade de 8 m s⁻¹.
3. Uma bola de aço inox de 25 cm de diâmetro ($\rho = 8055 \text{ kg m}^{-3}$, $c_p = 480 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) é removida de um forno a uma temperatura uniforme de 300°C. A bola é sujeita a fluxo de ar a 1 atm e 27°C com uma velocidade de 3 m s⁻¹. A temperatura da superfície da bola diminui para 200°C. Determine o coeficiente de transferência de calor médio e estime quanto tempo é necessário para que ocorra o referido arrefecimento.
4. Água líquida circula num tubo de 3 cm de diâmetro interno e 5 m de comprimento, é aquecida de 15°C a 65°C. O tubo está equipado com uma resistência elétrica que fornece aquecimento uniforme através de toda a superfície do tubo. A superfície exterior está bem isolada. Se o sistema fornecer água quente a um caudal de 10 L min⁻¹, determine a potência da resistência elétrica e a temperatura da superfície do tubo à saída.
5. Ar quente à pressão atmosférica e a 80°C entra numa conduta quadrada (0,2 m x 0,2 m) isolada e de 8 m de comprimento que passa no sótão de uma casa ao caudal de 0,15 m³ s⁻¹. A conduta está à temperatura uniforme de 60°C. Determine a temperatura de saída do ar e o calor perdido.
6. Considere o fluxo de óleo de motor a 20°C num tubo de 30 cm de diâmetro a uma velocidade média de 2 m s⁻¹. Este tubo atravessa um lago a 0°C numa extensão de 200 m. Desprezando a resistência térmica do tubo determine a temperatura do óleo e a taxa de perda de calor.

SOLUÇÕES

- | | |
|---|-------------------|
| 1. 11040W/m | 4. 34,6 kW; 115°C |
| 2. 1851 W/m | 5. 71,2°C; 1368 W |
| 3. 13,6 W m ⁻² °C ⁻¹ ; ~1,5 h | 6. 19,8°C; 6710 W |

Ficha de Exercícios N° 5

(Transferência de Calor em Estado Estacionário: convecção forçada – permutadores de calor)

1. Uma corrente de meio de cultivo para células, depois de esterilizada, está a ser arrefecida com água num permutador de calor em contra-corrente. Se seu caudal mássico for de 2 kg/s e se esta tiver que ser arrefecida de 50 a 10°C, qual o caudal mássico de água necessário, se esta entrar a 11°C e o aumento da sua temperatura for de 22°C.
2. No tubo exterior de um permutador de calor tubular de 5 m de comprimento condensa vapor de água à pressão de 143,27 kPa. Uma solução de antibióticos de $C_p = 3,9 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$ percorre o tubo interior com um caudal mássico de 0,5 kg/s. O tubo interior tem 5 cm de diâmetro. A temperatura de entrada da solução é 40°C e a de saída 80°C. Calcule o coeficiente global de transferência de calor do permutador.
3. Melaço diluído ($C_p = 4,0 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$) percorre o tubo interior de um permutador de calor. A sua temperatura de entrada é 20°C e a de saída 60°C; o caudal mássico é 0,50 kg/s. No tubo exterior entra água quente a 90°C que percorre o permutador em contra-corrente a um caudal de 1 kg/s. O calor específico médio da água naquela gama de temperaturas é 4,18 kJ/(kg°C).
 - a) Calcule a temperatura de saída da água. Faça o gráfico T "versus" comprimento do permutador para os dois fluidos.
 - b) Calcule a diferença logarítmica média de temperaturas.
 - c) Se $U = 2000 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C})$ e o diâmetro do tubo interior for de 5 cm, calcule o seu comprimento.
 - d) Repita os cálculos anteriores para escoamento em co-corrente.
4. Num permutador de calor tubular em co-corrente, determinado produto passa no tubo interior, sendo aquecido de 20 a 40°C. No tubo exterior, o fluido de aquecimento (água) arrefece de 90 a 50°C. O coeficiente global de transferência de calor é $2000 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C})$. O diâmetro do tubo interior é de 5 cm e o comprimento do permutador é de 10 m. $C_{p\text{água}} = 4,181 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$. Qual o caudal mássico de água necessário para o arrefecimento?
5. Um permutador de calor em contra-corrente de 10 m de comprimento está a ser usado para aquecer um caldo de fermentação de 20 a 60°C. O fluido de aquecimento é um óleo que entra no permutador a 150°C e sai a 80°C. O calor específico do caldo é $3,9 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$ e o coeficiente global de transferência de calor é $1000 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C})$. O diâmetro do tubo interior é 7 cm.
 - a) Faça uma estimativa do caudal mássico de caldo.
 - b) Determine o caudal mássico de caldo se o permutador de calor operar em co-corrente para as mesmas condições de temperaturas de entrada e saída.
6. Um caudal mássico de 9,2 kg/s de uma solução de lactose deve ser aquecida de 65°C a 84°C num permutador de calor, usando-se para o efeito 16,5 kg/s de água a 95°C. Se o coeficiente global de transferência de calor for de $1300 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C})$, calcule a área que o permutador de calor deve ter, no caso de operar em:
 - a) Co-corrente.
 - b) Contra-corrente.
 - c) Se o diâmetro do tubo interior do permutador for de 5 cm e o permutador tiver 5 m de comprimento, quantos permutadores são necessários em cada um dos casos?
7. Num permutador de calor em contra-corrente é arrefecida água. O fluido de arrefecimento é uma salmoura de cloreto de sódio. Se o caudal mássico de salmoura for de 1,8 kg/s e o da água

- for de 1,05 kg/s, faça uma estimativa da temperatura de saída da água, se a salmoura entrar a -8°C e sair a 10°C , e se a água entrar no permutador a 32°C . Se a área disponível para a transferência de calor neste permutador for 55 m^2 , qual é o coeficiente global de transferência de calor? Os calores específicos para a água e salmoura são, respetivamente, $4,18$ e $3,38\text{ kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$.
8. Se o permutador do problema anterior tiver que arrefecer mais a água (mais 3°C), de quanto deve ser aumentado o caudal mássico de salmoura?
 9. 50 kg/h de meio esterilizado são arrefecidos de 80°C a 20°C num permutador de calor em contra-corrente. O coeficiente global de transferência de calor é de $568\text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C})$. C_p meio esterilizado = $3187\text{ J}/(\text{kgK})$. O fluido de arrefecimento é água, que entra a 10°C e sai a 17°C . Calcule:
 - a) A quantidade de água necessária.
 - b) A área que o permutador de calor deve ter.
 10. Um conjunto de permutadores de calor arrefece 37000 kg por hora de uma mistura, depois de terem sido inativados os microrganismos patogénicos quando sujeitos a elevadas temperaturas, de 93°C a 32°C . Se o coeficiente global de transferência de calor for de $855\text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C})$, calcule a área de transferência de calor necessária, no caso dos permutadores funcionarem em:
 - a) Co-corrente.
 - b) Contra-corrente.
 - c) A água de arrefecimento entra a 21°C e sai a 27°C . O calor específico da mistura é de $3560\text{ J}/(\text{kgK})$. Se o diâmetro dos tubos internos dos permutadores for de $7,5\text{ cm}$ e se o seu comprimento for de 4 m , quantos permutadores são necessários?
 11. Uma solução de glucose deve ser aquecida num tanque com camisa. A parede do tanque é de aço inoxidável e tem $1,6\text{ mm}$ de espessura. A energia térmica é obtida pela condensação de vapor de água na camisa, onde a pressão manométrica é de 200 kPa . Os coeficientes de transferência de calor por convecção são: $1200\text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C})$ para o vapor e $3000\text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C})$ para o açúcar. A condutividade térmica do aço é de $21\text{ J}/(\text{ms}^{\circ}\text{C})$. Calcule a quantidade de vapor que condensa por minuto, se a área de transferência for $1,4\text{ m}^2$ e a temperatura da solução for de 83°C .
 12. Qual a quantidade de vapor necessária para aquecer 50 kg de água num tanque com camisa, a 100°C , se a temperatura inicial da água for de 18°C e for usado vapor de água a uma pressão manométrica de 100 kPa . O recipiente tem 1 m^2 de área de superfície e o coeficiente global de transferência de calor é de $300\text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C})$.

SOLUÇÕES

- | | |
|--|--|
| 1. $3,63\text{ kg/s}$ | 6. $82,2\text{ m}^2$; $38,1\text{ m}^2$; Co-corrente, 105; |
| 2. $2104\text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C})$ | Contra-corrente, 49 |
| 3. $70,9^{\circ}\text{C}$; $39,5^{\circ}\text{C}$; $6,4\text{ m}$; $70,9^{\circ}\text{C}$; $31,8^{\circ}\text{C}$;
8 m | 7. 7°C ; $109\text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{\circ}\text{C})$ |
| 4. $0,58\text{ kg/s}$ | 8. 2 kg/s |
| 5. 1 kg/s ; $0,83\text{ kg/s}$ | 9. 327 kg/h ; $0,162\text{ m}^2$ |

10.110 Contra-corrente, 85 m², 90; Co-
corrente, 104 m²

12.7,8 kg

11.1,6 kg/min

Ficha de Exercícios N° 6

(Transferência de Calor em Estado Transiente: condução em placas, cilindros, esferas e sistemas multidimensionais)

1. Uma ervilha de 1 cm de diâmetro está inicialmente a 20°C e é imersa em água a ferver a 100°C. Se o coeficiente de transferência de calor for de 1200 W m⁻² °C⁻¹, determine quanto tempo é necessário para o centro da ervilha atingir os 80°C.
2. Numa planta de processamento de carne, bifes de 2 cm de espessura ($k=0,45 \text{ Wm}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ e $\alpha=0,91 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), inicialmente a 25°C, são arrefecidos numa câmara de refrigeração a -10°C. Se o coeficiente de transferência de calor de ambos os lados do bife for de 9 W m⁻² °C⁻¹, calcule:
 - a) O tempo necessário para o centro atingir 10°C.
 - b) O tempo necessário para as duas faces atingirem a temperatura de 3°C.
 - c) O tempo necessário para as duas faces atingirem 22°C.
3. Pratos de latão de 4 cm de espessura que estão inicialmente a uma temperatura uniforme de 20°C, são aquecidos num forno a 500°C. Os pratos permanecem no forno por um período de 7 min. Se o coeficiente de transferência de calor combinado for de 120 W m⁻² °C⁻¹, determine a que temperatura está a superfície dos pratos quando estes são retirados do forno.
4. Um cabo cilíndrico de 20 cm de diâmetro, de aço inox 304, sai de um forno a uma temperatura uniforme de 600°C. De seguida é colocado numa câmara a 200°C com um coeficiente de transferência de calor de 80 W m⁻² °C⁻¹. Determine:
 - a) A temperatura do centro 45 min depois do início do processo de arrefecimento.
 - b) O calor transferido por unidade de comprimento do cabo durante este período.
5. Em áreas onde a temperatura do ar permanece abaixo de 0°C por períodos prolongados de tempo, a congelação da água em tubos subterrâneos tem de ser precavida, enterrando estes a uma profundidade suficiente onde não atinge a temperatura de 0°C. Considere um campo coberto de neve a -10°C por um período de 3 meses e propriedades do solo de $k=0,4 \text{ W m}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ e $\alpha=0,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Assumindo uma temperatura de 15°C para o solo, determine a mínima profundidade a que se deve enterrar os tubos de água.
6. Um pequeno cilindro de latão de 10 cm de diâmetro e 12 cm de altura está inicialmente a uma temperatura uniforme de 120°C. O cilindro é colocado em exposição a ar atmosférico a 25°C, com um coeficiente de transferência de calor de 60 W m⁻² °C⁻¹.
 - a) Calcule a temperatura no centro do cilindro 15 min após se iniciar o arrefecimento.
 - b) Calcule a temperatura no centro de um dos topos do cilindro 15 min após se iniciar o arrefecimento.
 - c) Determine o calor total transferido do cilindro ($\rho=8530 \text{ kg m}^{-3}$, $c_p=0,380 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$).
7. Um cilindro semi-infinito de alumínio de 20 cm de diâmetro está inicialmente a uma temperatura de 200°C. O cilindro é imerso em água a 15°C e arrefecido por convecção sob um coeficiente de transferência de calor de 120 W m⁻² °C⁻¹. Determine a temperatura do centro do cilindro a 15 cm do seu topo, 5 min depois do início arrefecimento.
8. Para grelhar hambúrgueres na chapa é necessário que a temperatura atingida no centro seja de pelo menos 70 °C. Admita que o hambúrguer que pretende grelhar tem uma espessura de 2 cm, um diâmetro de 8 cm, que a sua temperatura inicial é de 5 °C, que a condutividade térmica é de 0,4 Wm⁻¹K⁻¹ e que a difusividade térmica é de 1,3x10⁻⁷ m²s⁻¹. Se a chapa estiver a uma

temperatura constante de 240 °C à superfície, o coeficiente de transferência de calor for de $1200 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e o hambúrguer estiver exposto a iguais condições nas duas faces, determine:

- a) O tempo que é necessário para grelhar o hambúrguer.
- b) A espessura ideal do hambúrguer para que o tempo necessário para o centro atingir os 70 °C fosse o quádruplo do calculado na alínea anterior.

SOLUÇÕES

1. 25/32 s
2. 0,96 h; 1,5 h ; -
3. 282/263°C
4. 360/364°C; 29360/30120 kJ m^{-1}
5. 0,77/0,80 m
6. 63°C, 62,2°C; 171,8 kJ
7. 151°C
8. 188 s, 2,0 cm

Ficha de Exercícios N° 7

(Transferência de Calor em Estado Transiente: sistemas de capacitância global)

1. A temperatura de uma corrente de gás é medida por um termopar cuja junção pode ser aproximada a uma esfera de 1 mm de diâmetro. As propriedades da junção são $k= 35 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\rho= 8500 \text{ kg m}^{-3}$ e $c_p= 320 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. O coeficiente de transferência de calor entre a junção e o gás é de $210 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Determine quanto tempo demora o termopar a medir 99% da diferença de temperatura inicial.
2. Uma pessoa foi encontrada morta às 17 horas num quarto cuja temperatura era de 20°C . A temperatura do corpo na altura em que foi encontrado era de 25°C e o coeficiente de transferência de calor estimado de $8 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Se considerar que o corpo é um cilindro de 30 cm de diâmetro e de 1,70 m de comprimento e a temperatura do corpo humano de 37°C , determine quanto tempo antes do encontro do corpo se tinha dado a morte.
3. Para aquecer leite para um bebé, é colocado leite num frasco de vidro de pequena espessura e cujo diâmetro é de 6 cm. A altura do leite no frasco é de 7 cm. O frasco com o leite é colocado numa panela cheia de água quente a 60°C . O leite é agitado constantemente de modo que a temperatura seja uniforme. Se o coeficiente de transferência de calor na água em volta do copo é de $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, determine quanto tempo é necessário para aquecer o leite de 2°C a 38°C .
4. 250 l de leite a 4°C são aquecidos numa cuba encamisada, com uma superfície de transferência de calor de $1,5 \text{ m}^2$. Se o coeficiente global de transferência de calor for $800 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, o calor específico do leite 3900 J/kgK e a massa volúmica 1030 kg/m^3 :
 - a) Calcule o tempo que leva a aquecer o leite a 75°C , usando vapor condensante a 130°C .
 - b) Como poderá alterar as condições para reduzir o tempo de aquecimento de 25%? Calcule um novo parâmetro.

SOLUÇÕES

1. 10s
 2. 12,2 h
 3. 8,11 min
- 11,6 min; $1067 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Anexo C – Teste modelo de avaliação de estado estacionário

1. Descreva o mecanismo de transferência de calor por radiação?
2. É preciso mais energia para aquecer um quilo de água ou um quilo de ferro? Justifique.
3. Considere a máquina de venda de alimentos abaixo identificada. No design desta máquina, do ponto de vista de transferência de calor, que materiais considera que devem ser utilizados neste equipamento?



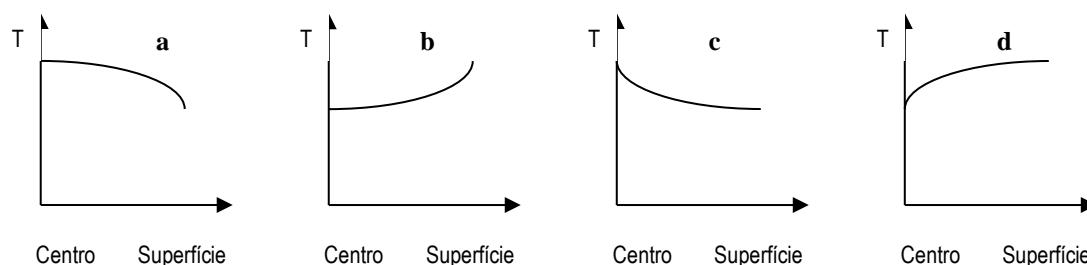
4. Quais são as unidades SI do número de Reynolds?
5. Considere a transferência de calor através de uma parede composta por duas camadas de tijolos compactos de 11 cm ($k= 1,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$), de 3 m de altura e com coeficiente de transferência de calor externo de $23 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$.
 - a. Estime o coeficiente de transferência de calor interno considerando uma temperatura do ar interno de 20 °C e a temperatura da superfície interna de 18 °C .
 - b. Calcule a taxa de perda de calor através da parede se a temperatura do ar exterior for de 0 °C .
 - c. Qual a diminuição da taxa de perda de calor se adicionalmente ao tijolo se colocar uma camada de isolante ficando a estrutura isolante-tijolo com uma condutividade de $0,80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$.

6. Um conjunto de permutadores de calor arrefece 37000 kg por hora uma solução aquosa, depois de terem sido inativados os microrganismos patogénicos quando sujeitos a elevadas temperaturas, de 93 °C a 32 °C, com calor específico da solução de 3560 J/(kg·K). A água de arrefecimento entra a 21 °C e sai a 27 °C. Se o coeficiente global de transferência de calor for de 855 J/(m²·s·°C), calcule a área de transferência de calor necessária, no caso dos permutadores funcionarem em:

- a. Co-corrente.
- b. Contra-corrente.
- c. Se o diâmetro dos tubos internos dos permutadores for de 7,5 cm e se o seu comprimento for de 4 m, quantos permutadores são necessários para os dois casos anteriores?

Anexo D – Teste modelo de avaliação de estado transitório

1. Quais as unidades da difusividade térmica?
2. Na figura seguinte identifique que perfil(s) de temperaturas representa(m) um objeto a arrefecer. Justifique.



Quais são as limitações na aplicação da solução tabelar da segunda lei de Fourier?

3. Considere um produto alimentar cilíndrico de raio r_1 que precisa de determinado tempo t_1 a ser processado em meio líquido. Se a evolução da temperatura só se dever à resistência externa (resistência por condução é desprezável), qual será o tempo (aproximado) de processamento de um produto com um raio de $1,5r_1$? Justifique.
4. Maçãs com um diâmetro de 9 cm e temperatura inicial de 20°C , são colocadas num congelador a -15°C e coeficiente de transferência de calor de $8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.
 - a. Calcule as temperaturas do centro e da superfície das maçãs ao fim de 1h.
 - b. Calcule a energia transferida ao fim de 1h.

Propriedades da maçã: $k = 0.418 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $\rho = 840 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 3.81 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, e $\alpha = 1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

5. Considere um paralelepípedo de $1,5 \text{ cm} \times 1,0 \text{ cm} \times 3,5 \text{ cm}$ de poliacetal feito de granito ($k=1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $C_P=1460 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $\rho=1340 \text{ kg m}^{-3}$), inicialmente a $100,5^\circ\text{C}$, é colocado a arrefecer num ambiente a 18°C .
 - a. A partir dos dados da temperatura do centro do objeto ao longo do tempo, expostos na tabela seguinte, estime o coeficiente de transferência de calor.
 - b. Calcule a taxa de transferência de calor ao fim de 99 segundos.