

# Troca de Calor e Massa

Franklin Romero

2023

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
1.1	O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES	2
1.2	DEFINIÇÕES	4
1.3	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	5
1.3.1	<i>Modelo de condução</i>	5
1.3.2	<i>Modelo de convecção</i>	6
1.3.3	<i>Modelo de radiação</i>	6
1.4	BALANÇO ENERGÉTICO	7



# APRESENTAÇÃO

A envolvente da edificação integra todos os elementos que separam os ambientes internos das condições climáticas externas (paredes, janelas, telhado e piso). Ela funciona como uma espécie de filtro ou barreira em que ocorrem trocas de energia térmica (calor), umidade e ar (infiltração e ventilação). O objetivo deste texto pretende descrever os mecanismos de transferência de calor através de elementos opacos na envolvente. Estes mecanismos definem o desempenho térmico da edificação e suas repercussões no consumo energético e conforto térmico. O conhecimento dos processos físicos que participam na envolvente permite avaliar a resposta da edificação frente às mudanças meteorológicas (temperatura, radiação solar, vento, etc.) na etapa de projeto e escolher as alternativas e soluções técnicas que garantam um desempenho térmico adequado à localidade em que o edifício será construído. O estudo da transferência de calor na envolvente também representa uma ferramenta importante para diagnosticar o desempenho de uma edificação existente.



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

As grandezas termo-físicas utilizadas no estudo da transferência de calor são especificadas nas unidades do Sistema Internacional (SI). Este sistema foi definido em 1960 pela 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas e recomendado como padrão mundial. A definição das grandezas a utilizar na disciplina e seus símbolos são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Grandezas do SI utilizadas no estudo de transferência de calor.**

<b>Grandeza (símbolo)</b>	<b>Unidade (símbolo)</b>	<b>Definição na base SI</b>
Comprimento (l)	Metro (m)	m
Área (A)	Metro quadrado (m <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup>
Volume (V)	Metro cúbico (m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup>
Massa (m)	Quilograma (kg)	kg
Tempo (t)	Segundo (s)	s
Temperatura (T)	Kelvin (K)	K
Energia (E)	Joule (J)	J
Potência (q)	Watt (W)	J/s
Densidade de massa (ρ)	---	kg/m <sup>3</sup>
Calor específico (c)	---	J/(kg K)
Condutividade térmica (λ)	---	W/(m K)
Resistência térmica (R)	---	W/(m <sup>2</sup> K)



Embora a unidade de temperatura no SI seja o Kelvin, o uso da escala Celsius é amplamente difundido. O símbolo de grau na designação da temperatura em Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) para evitar confundi-lo com o C utilizado como unidade de carga elétrica (Coulomb). O zero na escala Celsius ( $0^{\circ}\text{C}$ ) equivale a 273,15 K na escala Kelvin, mantendo uma relação linear de acordo com a equação 1. Contudo, a equação 1 mostra que as diferenças de temperaturas ( $\Delta T = T_f - T_i$ ) são equivalentes para as duas escalas e podem ser denotadas em  $^{\circ}\text{C}$  ou em K.

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (1)$$

Além disso, embora a unidade de tempo no SI seja o segundo, outras unidades de tempo (minuto, hora e dia) são tão comuns que podem ser utilizadas com o sistema SI. No âmbito do desempenho térmico de edificações e eficiência energética é comum encontrar a energia quantificada em Watt-hora (Wh).

Para facilitar a leitura de valores numéricos e destacar os dígitos significativos, utilizam-se os prefixos multiplicadores. Estes prefixos são símbolos que permitem expressar valores muito grandes ou muito pequenos sem ter que utilizar potências de base 10 ou muitas casas decimais (Tabela 2).



**Tabela 2 – Prefixos utilizados no Sistema Internacional (SI)**

<b>Prefixo</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor numérico</b>
Yotta	Y	$10^{24}$
Zetta	Z	$10^{21}$
Exa	E	$10^{18}$
Peta	P	$10^{15}$
Tera	T	$10^{12}$
Giga	G	$10^9$
Mega	M	$10^6$
Kilo	k	$10^3$
Hecto	h	$10^2$
Deca	da	10
Deci	d	$10^{-1}$
Centi	c	$10^{-2}$
Mili	m	$10^{-3}$
Micro	$\mu$	$10^{-6}$
Nano	n	$10^{-9}$
Pico	p	$10^{-12}$
Femto	f	$10^{-15}$
Atto	a	$10^{-18}$
Zepto	z	$10^{-21}$
Yocto	y	$10^{-24}$



# 1.2 DEFINIÇÕES

No estudo da transferência de calor na envolvente das edificações, os primeiros conceitos a definir são a temperatura e calor. Estes conceitos encontram-se estreitamente relacionados.

A temperatura está relacionada à quantidade de energia térmica ou calor num sistema. Na medida em que um sistema acumula calor, sua temperatura aumenta. Ao contrário, uma perda de calor provoca uma diminuição da temperatura do sistema. Na escala microscópica, este calor corresponde à agitação térmica de átomos e moléculas no sistema. Assim, uma elevação de temperatura corresponde a um aumento da velocidade de agitação térmica dos átomos.

A **Temperatura** é a propriedade de um material ou sistema que implica as noções comuns de "quente" ou "frio". Em geral a matéria com a temperatura maior é dita mais quente. Apesar de todo mundo ter uma compreensão básica do conceito de temperatura, sua definição precisa não é tão evidente. Ao contrário de outras grandezas, como massa e comprimento, a temperatura é definida através de um conjunto de condições teóricas (princípios da termodinâmica), que se afastam dos alcances da disciplina. Porém, é importante entender que a temperatura é uma grandeza escalar, isto significa que para sua caracterização é preciso apenas conhecer seu módulo ou quantidade.



Da mesma forma que a massa, o comprimento e o tempo, na temperatura só é necessário saber a intensidade que ela possui. Mas ao contrário da massa e o tempo, a temperatura pode adotar tanto valores positivos como negativos.

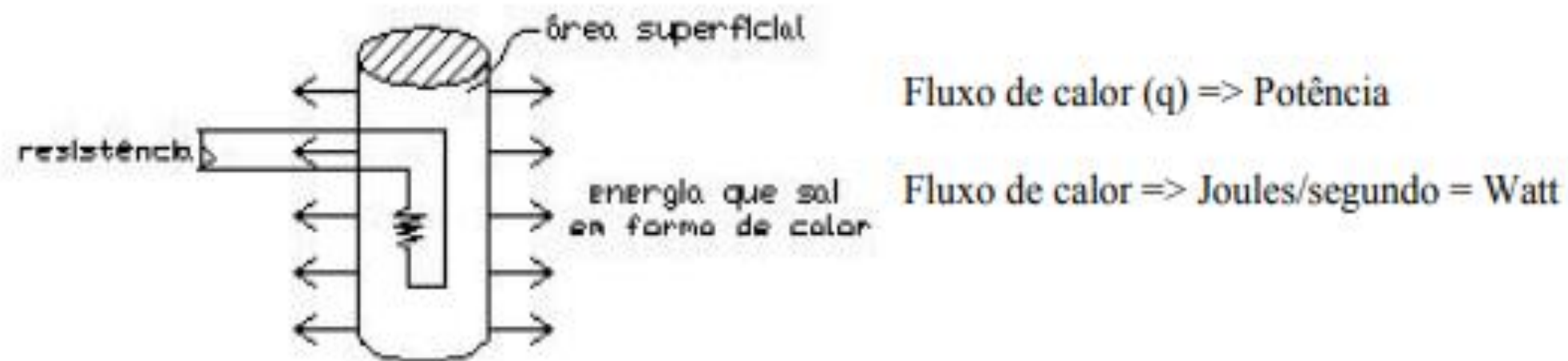
Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, ocorre, necessariamente uma transferência de energia térmica. O **Calor** (ou fluxo de calor) é definido então como a taxa de energia térmica transferida por unidade de tempo devido a uma diferença de temperatura.

O calor, por tanto, é uma grandeza física vetorial caracterizada pela intensidade e orientação espacial (direção e sentido). A transferência de calor ocorre na direção do gradiente de temperatura e no sentido decrescente da temperatura (de maior a menor temperatura).

No sistema SI existe uma unidade de energia (térmica, mecânica ou elétrica) definida como Joule. A taxa de energia (potência), é por tanto energia/tempo, em que um Joule por segundo é equivalente a um Watt (Figura 1).







**Figura 1 – Relação entre energia e fluxo de calor**

Uma notação importante a considerar quando se trabalha com fluxo de calor é a seguinte:

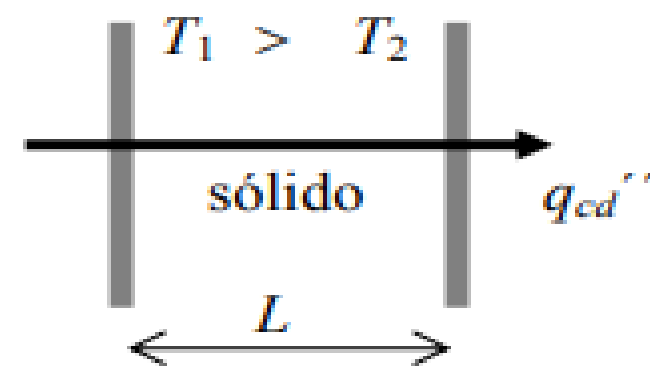
- $q$  : fluxo de energia calórica por unidade de tempo [W] ( $1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$ )
- $q'$  : fluxo de energia calórica por unidade de tempo e longitude [W/m]
- $q''$  : fluxo de energia calórica por unidade de tempo e área [W/m<sup>2</sup>]
- $q'''$  : fluxo de energia calórica por unidade de tempo e volume [W/m<sup>3</sup>]

No escopo do estudo da disciplina entende-se frequentemente por *densidade de fluxo de calor* ( $q''$ ) a taxa de transferência de calor em uma direção definida por unidade de área perpendicular à direção de transferência.

# 1.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

## 1.3.1 MODELO DE CONDUÇÃO

A condução está relacionada ao transporte de energia térmica (calor) em um meio sólido devido ao gradiente de temperatura. O estudo de transferência de calor por condução na disciplina encontra-se focado inicialmente a condições simplificadas, isto é, condução unidimensional em regime permanente em uma parede plana para a qual a distribuição de temperatura é linear. Conhecendo a distribuição de temperaturas no meio, a transferência de calor por condução ocorre de acordo com a Lei de Fourier (Figura 2).



$$q_{cd}'' = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (\text{Lei de Fourier})$$

$\lambda$ : condutividade térmica [W/m·K]

Figura 2 – Condução de calor na envolvente.

A **condutividade térmica** é alta em metais (20 – 700 W/m K) devido a que os elétrons podem se movimentar livremente. Os materiais sólidos não metálicos não

permitem o movimento de elétrons, simplesmente a vibração molecular, isto faz com que sua condutividade térmica esteja entre 0,5 e 30 W/m K. Isolantes térmicos, como o poliestireno expandido (isopor), são compostos de materiais de baixa condutividade térmica ( $\sim 0,04$  W/m K), devido à quantidade de ar incorporado na estrutura interna.

### 1.3.2 MODELO DE CONVECÇÃO

A transferência de calor por convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície quando os dois se encontram a diferentes temperaturas (Figura 3). A transferência acontece tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido. Ela pode ser natural (ou livre), mista ou forçada, dependendo das condições de escoamento do fluido.

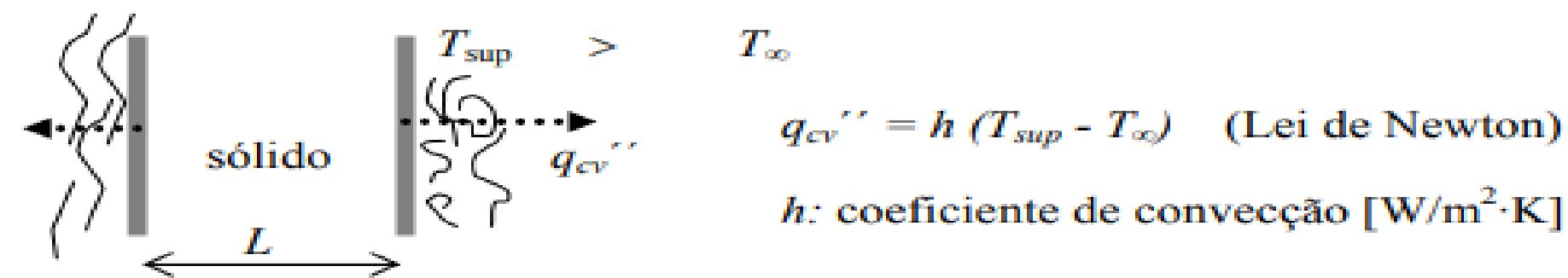


Figura 3 – Convecção de calor na envoltente

O **coeficiente de convecção** é uma constante de proporcionalidade que resume as condições nas camadas mais próximas à superfície, considerando a geometria da superfície, a natureza do escoamento (laminar ou turbulento) e propriedades do fluido (densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico).

### 1.3.3 MODELO DE RADIAÇÃO

A radiação é um fenômeno superficial em que o calor emitido de acordo com a temperatura superficial do material (Figura 4). A energia do campo de radiação é transportada por ondas longas eletromagnéticas. Enquanto a transferência de calor por condução e convecção requer a presença de um meio material (sólido ou fluido), a radiação ocorre no vácuo, sem precisar de meio.

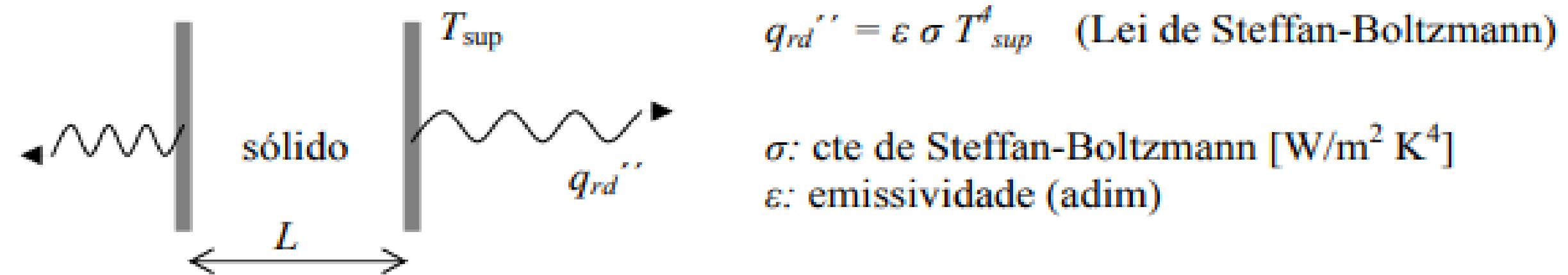


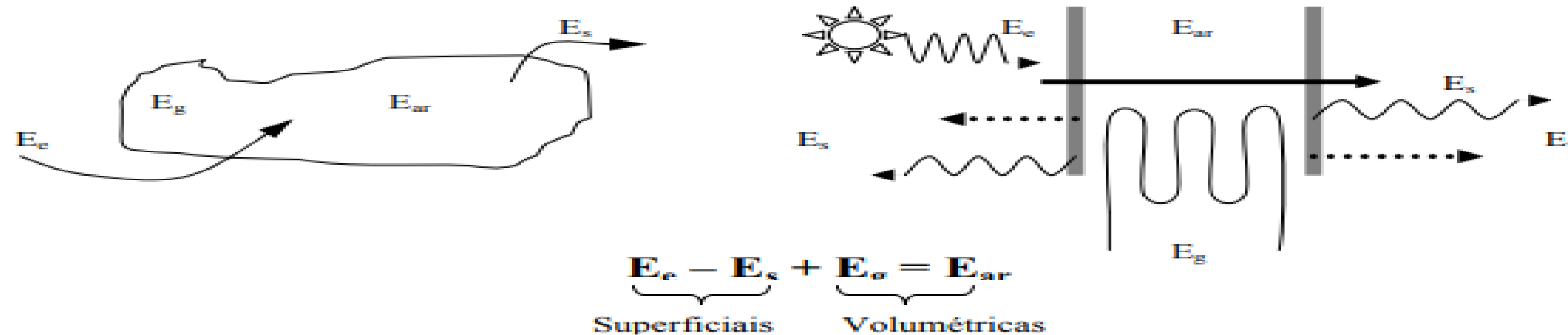
Figura 4 - Radiação de calor na envoltente

A taxa na qual a energia é liberada por unidade de área ( $W/m^2$ ) é conhecida também como poder emissivo, que é previsto pela Lei de Steffan-Boltzmann onde  $T_{sup}$  deve ser considerada em unidades absolutas (K) e  $\sigma$  é a constante de Steffan-Boltzmann

# 1.4 BALANÇO ENERGÉTICO

## 1.4 BALANÇO ENERGÉTICO

O balanço de energia na envolvente da edificação tem como base a primeira lei de termodinâmica, a lei da conservação de energia. Esta lei estabelece que a quantidade de energia térmica (calor) que entra em um volume de controle - no caso a envolvente ( $E_a$ ), mais a quantidade de calor gerada no interior do volume ( $E_g$ ), menos a quantidade de energia que deixa o volume ( $E_s$ ) deve ser igual ao aumento da quantidade de energia armazenada ( $E_{ar}$ ) no volume de controle (Figura 5).



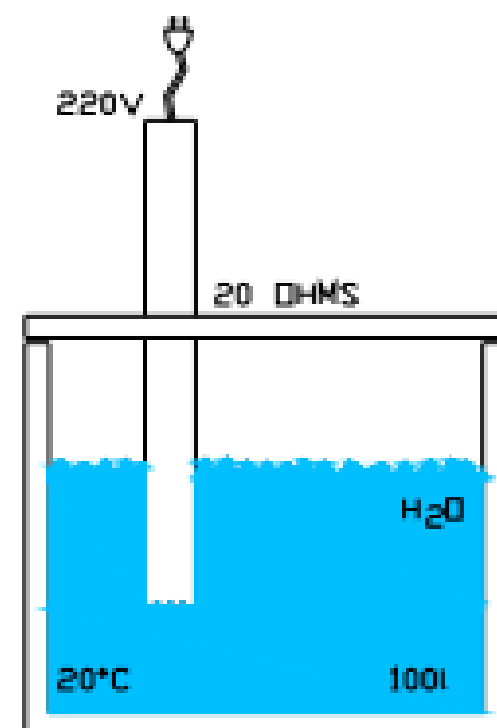
**Figura 5 – Conservação de energia (1ª Lei de termodinâmica)**

O alcance da disciplina não considera o estudo de mecanismos de geração de calor na envolvente. Esta simplificação permite estabelecer o balanço energético como a diferença entre a energia que ingressa e sai da envolvente deve ser igual à variação de energia (calor armazenado ou liberado) no interior da envolvente.

### Figura 5 – Conservação de energia (1ª Lei de termodinâmica)

O alcance da disciplina não considera o estudo de mecanismos de geração de calor na envolvente. Esta simplificação permite estabelecer o balanço energético como a diferença entre a energia que ingressa e sai da envolvente deve ser igual à variação de energia (calor armazenado ou liberado) no interior da envolvente.

#### EXEMPLO 1.1



Se ligarmos uma resistência aquecedora de 20 Ohms em 220 V por 10 min, dentro de um recipiente de 100 l com água a 20 °C. Qual a temperatura final da água?

Potência (P) fornecida pela resistência elétrica

$$P = U \cdot I \quad U = R \cdot I$$

U: Tensão elétrica, Voltagem [Volt]  
I: Corrente elétrica [Ampère]  
R: Resistência elétrica [Ohm]

$$P = U^2/R = 220^2/20 = 2.420 \text{ Watts} \approx 2.400 \text{ J/s}$$

Balço energético:

$$E_c - E_s + E_g = E_{ar} = m \cdot c \cdot \Delta T = \rho \cdot V \cdot c \cdot (T_f - T_i)$$

$$E_c = 0, E_s = 0$$

$$E_g = P \cdot t = \rho \cdot V \cdot c \cdot (T_f - T_i)$$

$$2.400 \cdot 600 = 1.000 \cdot 0,1 \cdot 1.000 \cdot (T_f - 20) \quad \Rightarrow \quad T_f = 34,4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Agora, qual a taxa de variaço da temperatura?

$$E_g = \rho \cdot V \cdot c \cdot (T_f - T_i) \quad \div t$$

$$\frac{E_g}{t} = P = m \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{t} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$2.400 = 1.000 \cdot 0,1 \cdot 1.000 \cdot (\Delta T/t) \quad \Rightarrow \quad (\Delta T/t) = 0,024 \text{ [}^\circ\text{C/s]}$$

m: massa [kg]  
 $\rho$ : densidade aparente [kg/m<sup>3</sup>]  
V: Volume [m<sup>3</sup>]  
c: calor específico [J/kg·K]  
T: Temperatura [°C]  
t: tempo [s]



## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15220-1. Desempenho Térmico de Edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT NBR 15220-2. Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Janeiro, 2003.

ABNT NBR 15220-3. Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Janeiro, 2003.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. Transferência de calor e massa. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

LAMBERTS, R; DUTRA, L; PEREIRA, F. Eficiência energética nas edificações. São Paulo: PW Editores, 1997.

LIRA, I. Transferência de calor: apontes de classe (ICM 2002). Santiago do Chile: PUC. Santiago de Chile, 2004.

HAGENTOFT, C. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur. Lund, Suécia, 2001.

