

# MODULO M1.4

$$E = mc^2$$

## Principi fondamentali sull'energia e concetti base di EINSTEIN

# Indice

**EINSTEIN**  
thermal energy  
industry audit

- 1. Inquadramento generale**
- 2. La teoria di Einstein**
  - ✓ **Flussi di energia**
  - ✓ **Livelli di temperatura**
  - ✓ **Modello del processo**
  - ✓ **Profilo di carico**



# Consumo energetico

EINSTEIN  
thermal energy  
industry audit

Il consumo energetico può essere espresso in termini di:

- 1) **Energia finale** = quantità di energia contenuta nelle diverse fonti/forme di energia in ingresso nell'impresa
  - Per convenzione in EINSTEIN il contenuto energetico dei combustibili è in termini di potere calorifico inferiore LCV
- 2) **Energia primaria** = quantità totale di energia contenuta nelle diverse fonti di energia necessaria a generare l'energia finale richiesta
  - Tenendo conto delle perdite in tutte le diverse fasi di conversione/trasformazione del combustibile

# Tipi di usi finali dell'energia

## 1) Usi finali **termici**

- ✓ Riscaldamento e raffreddamento di processo
- ✓ Riscaldamento e raffrescamento degli ambienti (capannoni industriali, uffici,...)
- ✓ Acqua calda sanitaria

## 2) Usi finali **non-termici**

- ✓ Consumo *elettrico* per l'illuminazione, le macchine e gli altri impianti elettrici
  - esclusi climatizzazione, raffreddamento e riscaldatori

## Usi finali non considerati in EINSTEIN:

- ✓ usi a fini non energetici dei combustibili
- ✓ per il trasporto
- ✓ energia accumulata nelle materie prime (potenzialmente recuperabile)

# Tipi di usi finali dell'energia

EINSTEIN  
thermal energy  
industry audit

Contributo di energia termica utilizza per la domanda totale di energia in Europa:

- ✓ Energia termica nell'industria: 28%
- ✓ Riscaldamento e raffreddamento degli edifici 27%

Consumo energetico per usi termici nell'industria in Europa:

- ✓ circa 70% del consumo totale in termini di energia finale
- ✓ oltre 50% in termini di energia primaria

# Fonti di energia rinnovabili

EINSTEIN  
thermal energy  
industry audit

Fonti di energia rinnovabili per la fornitura di calore/freddo :

- ✓ *energia solare* (inlc. cogenerazione “solare”)
- ✓ *biomassa e biogas*
- ✓ *geotermico, ...*

# Impatto ambientale

EINSTEIN  
thermal energy  
industry audit

**Indicatori principali** di valutazione dell'impatto ambientale in EINSTEIN:

- ✓ **Consumo di energia primaria**  
(= principale indicatore utilizzato)
- ✓ Emissione di **CO<sub>2</sub>**
- ✓ Generazione di **scorie nucleari altamente radioattive**  
(*High-Level Radioactive Waste*) associata al consumo di elettricità
- ✓ Consumo di **acqua**.

# Agire sulla domanda e sull'offerta

Per risparmiare energia:

- ✓ cercare prima delle possibilità di **riduzione della domanda di energia**
- ✓ solo allora, coprire la domanda **residua di calore e freddo** con sistemi di generazione ottimizzati sul piano dell'efficienza energetica e dell'impatto ambientale.

## ESEMPIO

- ✓ Processo: riscaldare acqua di lavaggio fino a 90 °C
- ✓ Processi alternativi:
  - lavare a temperatura inferiore con detergenti o in pressione
  - ridurre la frequenza del lavaggio collocando un processo che genera polveri in uno spazio separato



# Flussi di energia nell'industria

## Definizioni 1

### ✓ **Consumo totale di Energia Finale (FEC)**

Energia in ingresso nella fabbrica, ad esempio combustibili (espressi in PCI), elettricità e teleriscaldamento / raffreddamento

### ✓ **Energia Finale per usi Termici (FET)**

Energia finale consumata per usi termici (riscaldamento o raffreddamento), compresa l'elettricità per climatizzazione, raffreddamento e riscaldamento

### ✓ **Energia Finale per Altri usi (non termici) (FEO)**

Energia finale consumata per usi non termici

$$E_{FEC} = E_{FET} + E_{FEO}$$

# Flussi di energia

## Definizioni 2

### ✓ Consumo totale di Energia Finale (**FEC, FET**)

$$E_{FEC} = E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{fuels}} E_{FEC, fuel(i)} + E_{FEC, heat}$$

$$E_{FEC} = E_{FET} + E_{FEO}$$

$$E_{FET} = \sum_{j=1}^{N_{eq}} E_{FET, j}$$

Legenda:

$i = 1, \dots, N_{fuels}$

$N_{fuels}$  = numero di combustibili usati

$j = 1, \dots, N_{eq}$

$N_{eq}$  = numero di impianti termici

# Flussi di energia

## Definizioni 3

### ✓ Consumo totale di Energia Finale (*FEC, FET*)

**Consumo di energia nella COGENERAZIONE =**  
consumo di combustibile - elettricità auto-generata

$$E_{FET, j} = E_{FET, fuel(j)} - E_{FET, elgen, j}$$

# Flussi di energia

## Definizioni 4

- ✓ **Consumo di Energia Primaria (PEC)**
- ✓ **Energia Primaria per usi Termici (PET)**
- ✓ **Energia Primaria per Altri usi (non termici) (PEO)**



sono ottenuti da **FEC, FET, FEO** applicando diversi fattori di conversione

$$E_{PEC} = f_{PE,el} E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{fuels}} f_{PE,i} E_{FEC,fuel(i)} + f_{PE,heat} E_{FEC,heat}$$

### Legenda:

$i = 1, \dots, N_{fuels}$

$N_{fuels}$  = numero di combustibili usati

$f_{PE,el}$  = fattore di conversione in energia primaria per l'elettricità

$f_{PE,i}$  = fattore di conversione in energia primaria per combustibili fossili

# Flussi di energia

## Definizioni 5

EINSTEIN  
thermal energy  
industry audit

### ✓ **Calore / freddo Utile Fornito (USH/USC)**

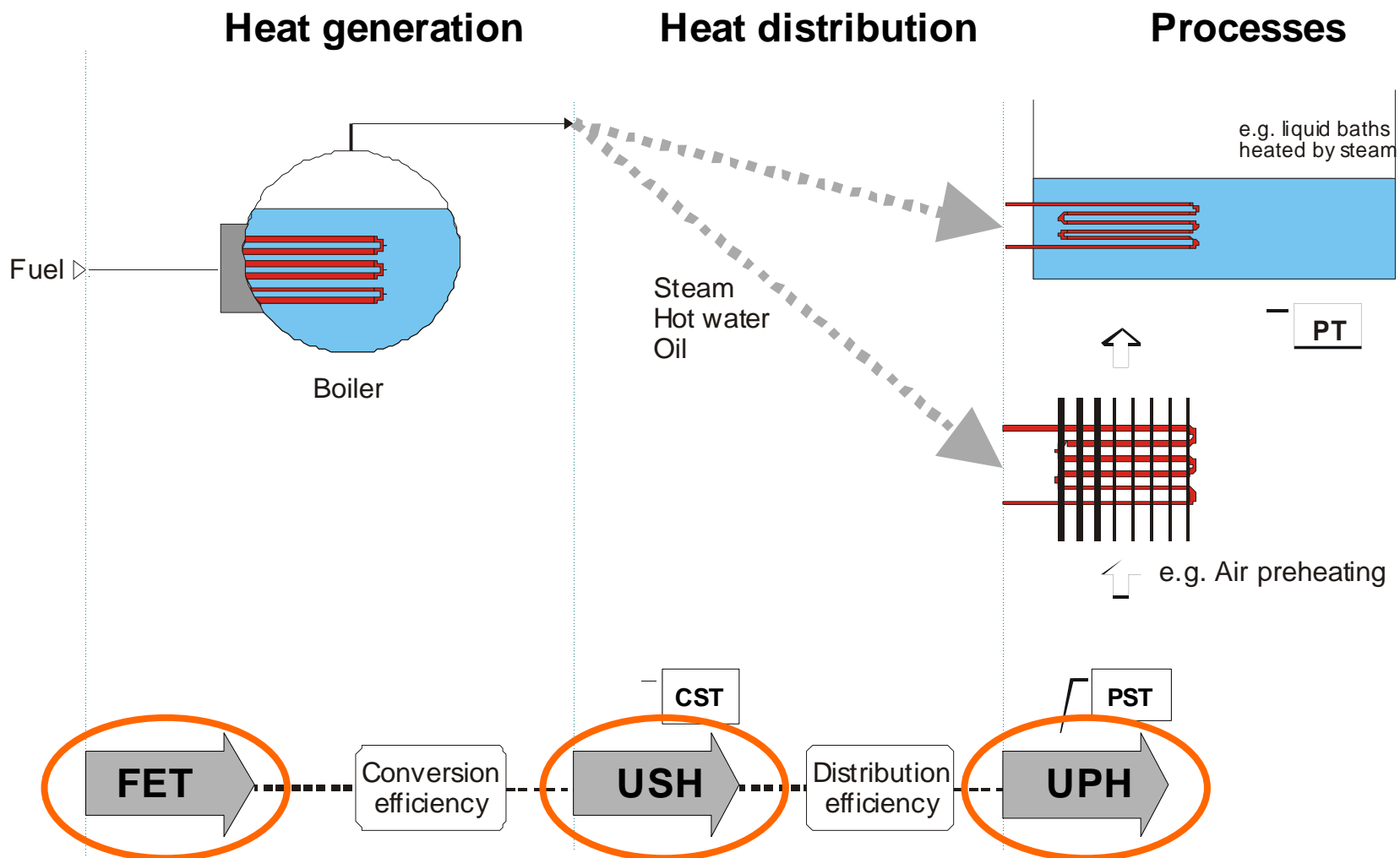
- Calore (freddo) prodotto dal sistema di generazione di calore (caldaie, bruciatori, refrigeratori) e fornito ai diversi utilizzatori (ad e. processi) in forma di vapore, aria calda, acqua calda, acqua fredda, ecc.

### ✓ **Calore / freddo Utile di Processo (UPH/UPC)**

Calore (freddo) trasferito ad un processo (misurato in ingresso allo scambiatore di calore del processo) = domanda di calore di un processo

# Flussi di energia

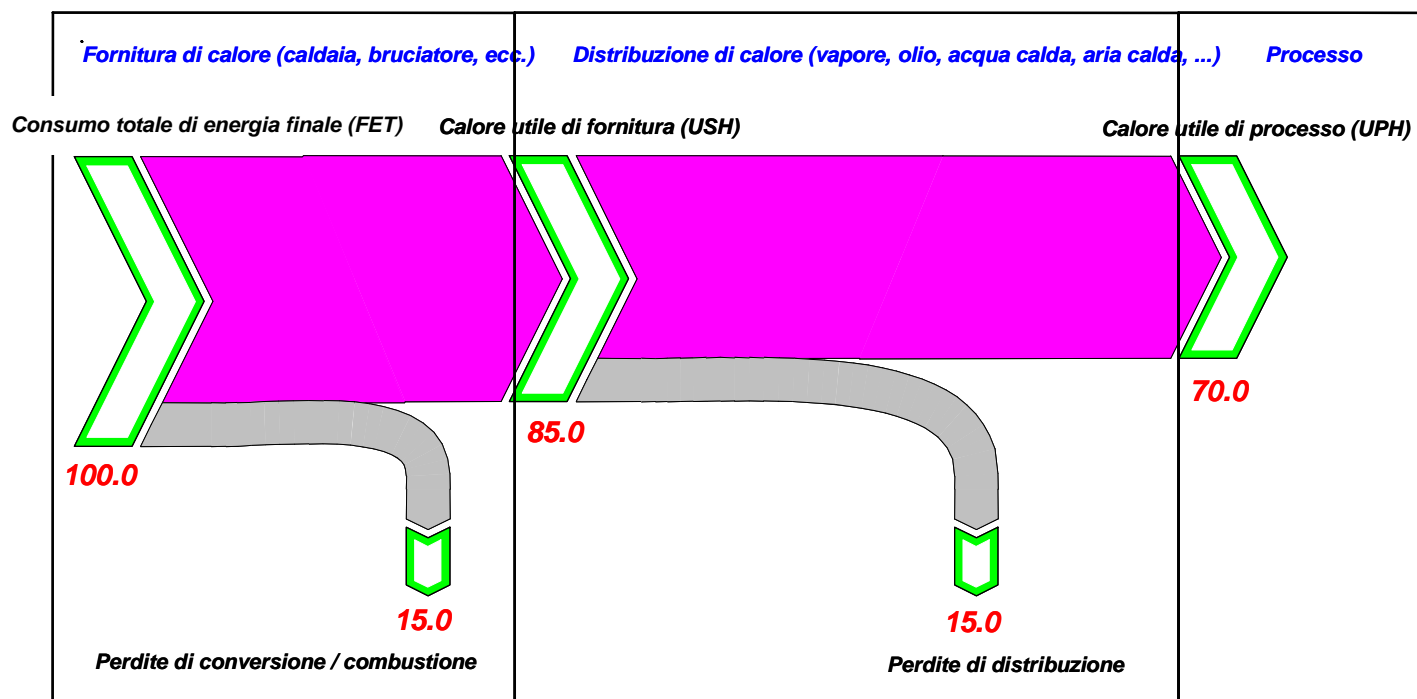
EINSTEIN thermal energy industry audit



# Flussi di energia

## Definizioni 6

- ✓  $USH_j / FET_j$  = efficienza di conversione dell'impianto "j"
- ✓  $UPH_m / USH_m$  = efficienza di distribuzione del tubo "m"



# Flussi di energia

## Definizioni 7

### ✓ **Calore/freddo di scarto disponibile ( $Q_{WH}/Q_{WC}$ )**

Un flusso di energia che non è l'output (energetico):

- gas di scarico di una caldaia
- condensa in un circuito di vapore
- acqua calda reflua (es. di un processo di lavaggio)
- aria fredda esausta in una cella di raffreddamento

**Esempio valido per il calore di scarto di un processo:**

$$Q_{QWH, Proc} = q_{m,o} (h_{po} - h_{min}) t_{op}$$

$$Q_{QWH, Proc} = m c_p (T_p - T_{min}) N_s$$

**Legenda:**

$q_m$  = portata massica

$m$  = massa nel recipiente

$N_s$  = numero di avvii

$t_{op}$  = durata del processo



# Flussi di energia

## Definizioni 8

EINSTEIN  
thermal energy  
industry audit

### ✓ **Calore/Freddo di scarto recuperato ( $Q_{HX}/Q_{CX}$ )**

Un flusso di energia immessa in un sistema di recupero del calore:

- preriscaldamento dell'aria di combustione e/o dell'acqua di alimentazione caldaia
- preriscaldamento dell'acqua in ingresso in un processo di lavaggio
- preriscaldamento del ritorno in un circuito di distribuzione dell'acqua calda

### ✓ **Scambio diretto tra domanda di caldo e freddo ( $Q_{DH}/Q_{DC}$ ) possibile**

- Domanda di freddo ad alta temperatura come fonte di recupero di calore
- Domanda di calore a bassa temperatura come fonte di recupero di freddo

**=> Risparmio doppio di apporto energetico esterno**

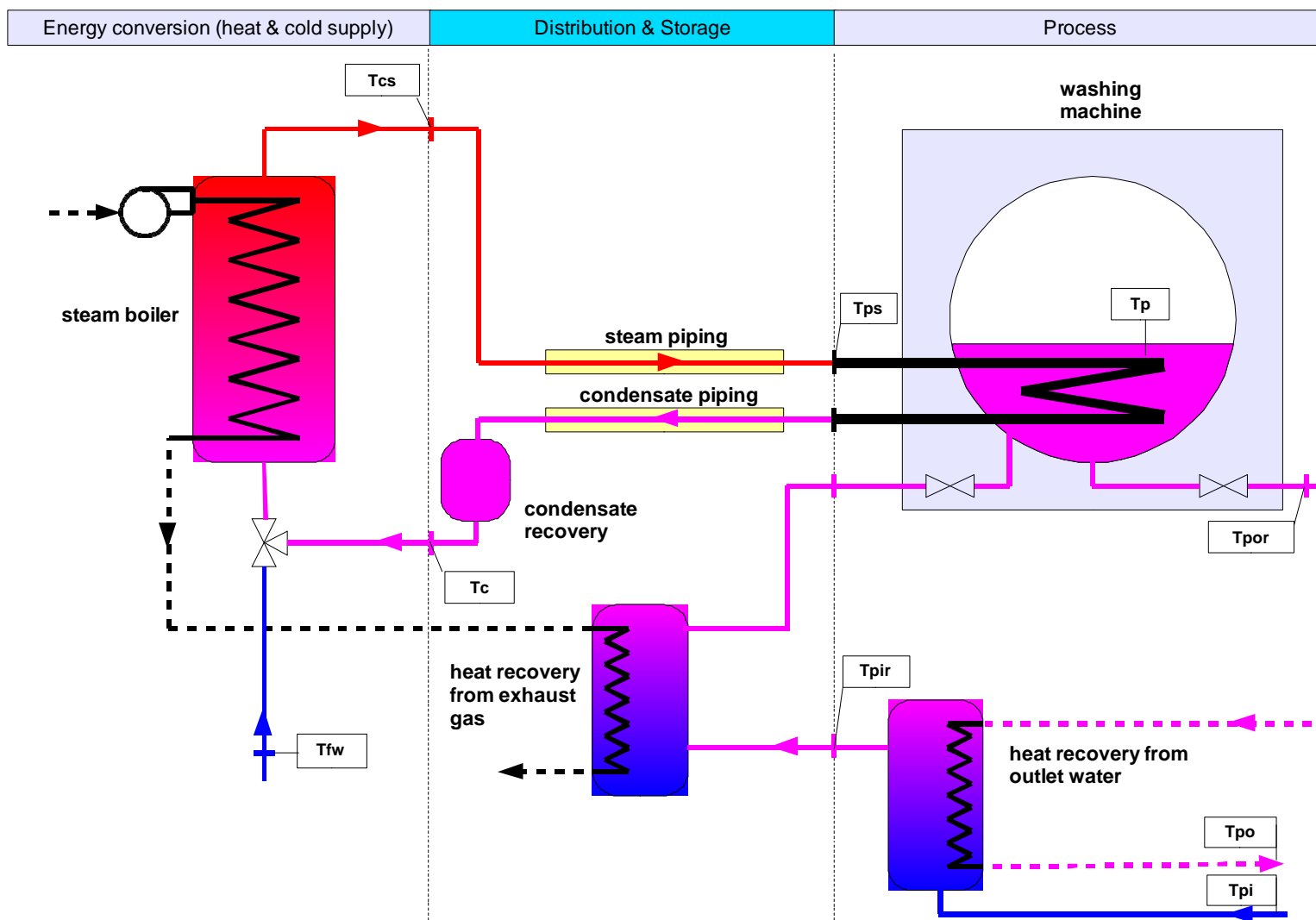
$$\sum_{h=1}^{N_{HX}} Q_{hx,h} \leq \sum_{source} Q_{QWH,source} + \sum Q_{D,cooling}$$

**Legenda:**

$N_{HX}$  = numero di scambiatori di calore

# Flussi di energia

EINSTEIN thermal energy industry audit



Modello di un processo di lavaggio industriale con recupero del calore secondo Einstein

Claudia Vannoni  
Hans Schweiger



Corso di formazione Einstein- Milano, 17-19 Maggio 2011

# Flussi di energia

## Definizioni 9

### ✓ **Calore Utile Fornito (USH)**

$$\dot{Q}_{USH, j} = \dot{Q}_{USH, Eq, j} + \dot{Q}_{QHX, j}$$

$\dot{Q}_{USH, Eq, j}$  = calore utile generato dal sistema "j"

$\dot{Q}_{QHX, j}$  = calore recuperato e utilizzato nel sistema "j"

Legenda:

$j = 1, \dots, N_{eq}$

$N_{eq}$  = numero di impianti termici

# Flussi di energia

## Definizioni 10

✓ **Calore Utile Fornito (USH) al tubo**

$$\dot{Q}_{USH, pipe, m} = \dot{Q}_{USH, m} + \dot{Q}_{QHx, m}$$

**Per circuiti aperti:**

$$\dot{Q}_{USH, pipe, m} = q_{m, o} h_o - q_{m, ret} h_{ret} - q_{m, i} h_i$$

$\dot{Q}_{USH, pipe, m}$  = calore in ingresso alle linee di distribuzione

**Legenda:**

$m = 1, \dots, N_{pipe}$

$N_{pipe}$  = numero di linee distribuzione

$q_m$  = portata massica

uscita (o), ritorno (ret) e ingresso (i)

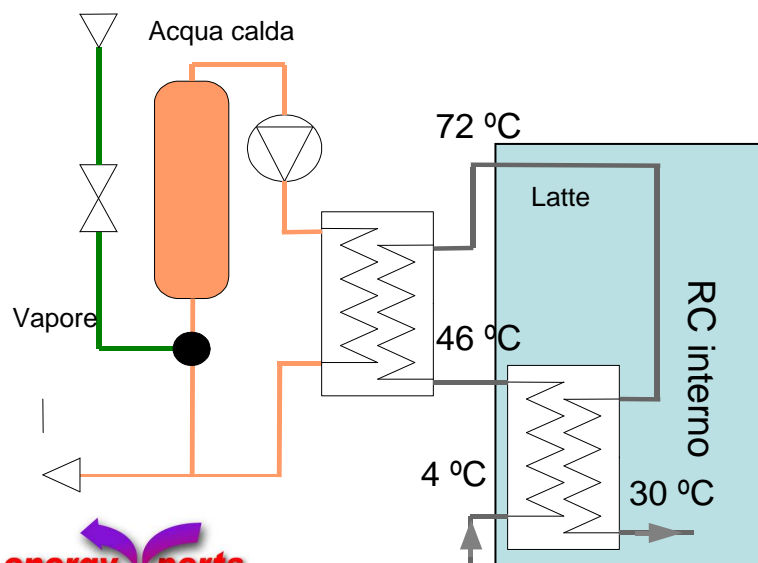
# Flussi di energia

## Definizioni 11

**Calore Utile di Processo (UPH): NETTO e LORDO**

$$Q_{UPH, gross} = Q_{UPH} + Q_{HX, internal, Proc}$$

$Q_{HX, internal, Proc}$  = recupero di calore interno



Esempio:

Processo di  
pastorizzazione con  
recupero di calore interno

# Flussi di energia

## Definizioni 12

### ✓ Calore Utile (netto) di Processo (UPH)

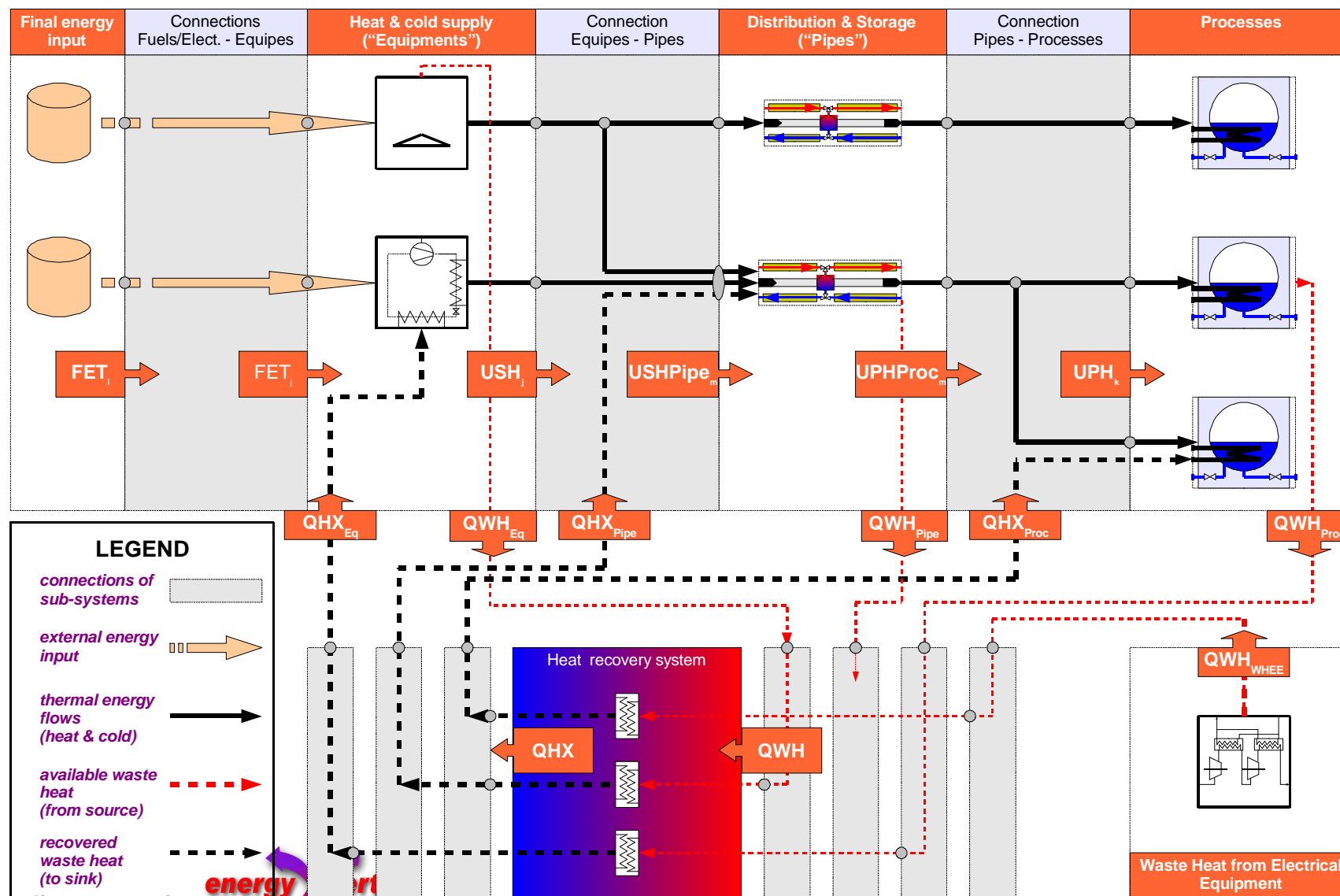
$$Q_{UPH} = Q_{UPH, Proc} + Q_{HX, Proc}$$

$Q_{UPH, Proc}$  = calore di processo fornito al processo dall'esterno e prodotto da un sistema di generazione

$Q_{HX, Proc}$  = calore di processo fornito al processo dall'esterno attraverso un sistema di recupero del calore

# Flussi di energia

EINSTEIN thermal energy industry audit



# Livelli di temperatura

EINSTEIN  
thermal energy  
industry audit

- Recupero del calore e integrazione del calore
- Applicazione di tecnologie più efficienti a temperatura inferiore
- Maggiore efficienza di conversione e minori perdite di calore

dipendono da ...

✓ **QUALITÀ** dell'energia

➔ **TEMPERATURA** dell'energia richiesta



# Livelli di temperatura

## *Classificazione delle tecnologie per livello di temperatura*

Intervallo di temperatura (° C)	Livello di temperatura del calore o del freddo	Tecnologia appropriata di generazione del calore o del freddo
< 60	Basso	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Pompe di calore</li> <li>•Solare termico a bassa temperatura</li> </ul>
< 90	Medio-basso	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Calore residuale da cogenerazione (acqua di raffreddamento)</li> <li>•Limite di applicazione collettori solari termici piani</li> </ul>
< 150	Medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Vapore a bassa pressione</li> </ul>
< 250	Medio-alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Limite di applicazione collettori solari a media temperatura</li> </ul>
< 400	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Limite per recupero di calore da turbine a gas, biomassa, ecc.</li> </ul>

# Livelli di temperatura

## Definizioni 13

✓ **Temperatura di processo (PT)**

Temperatura del fluido di processo

✓ **Temperatura di somministrazione al processo (PST)**

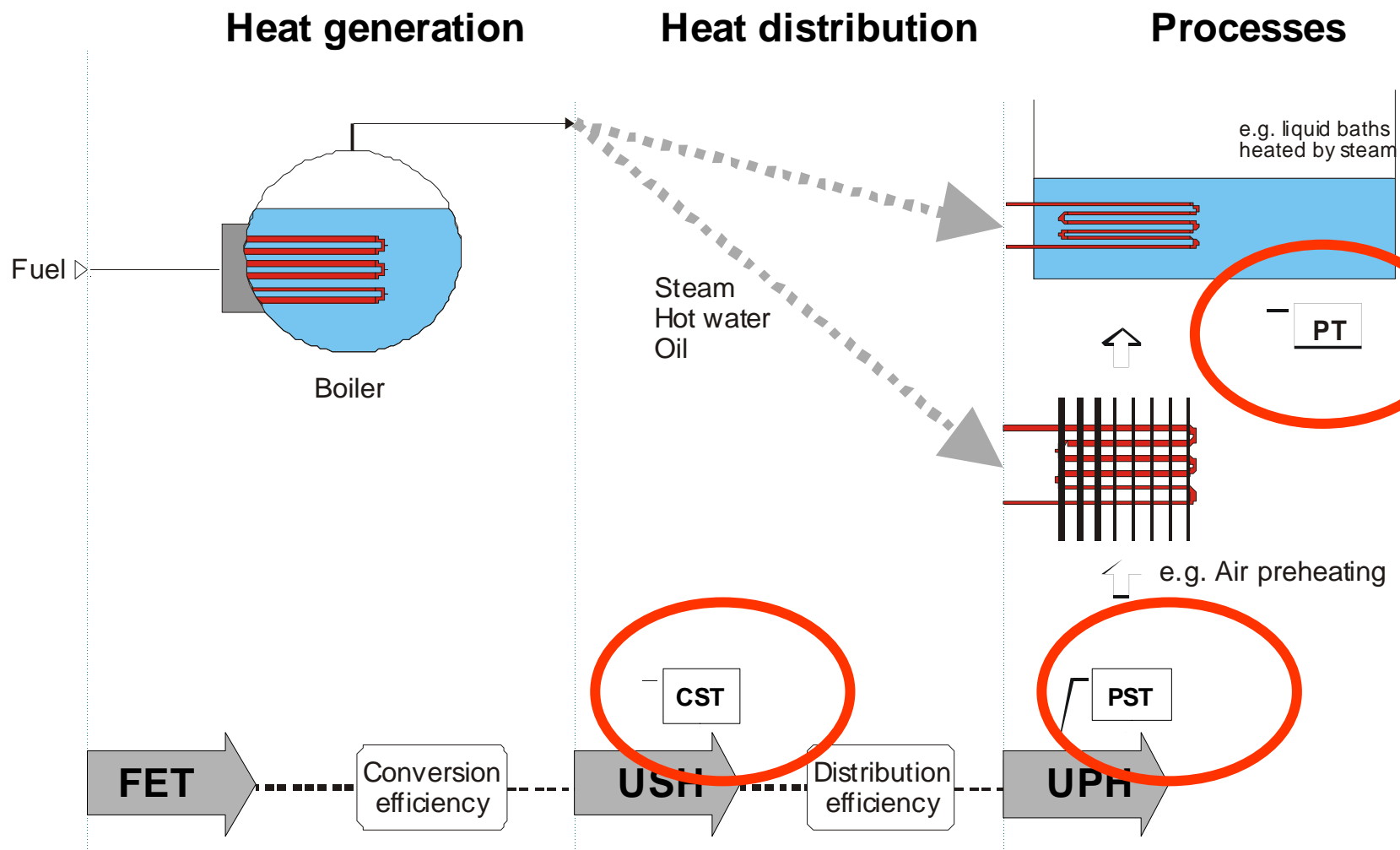
Temperatura del fluido termovettore usato per il riscaldamento del processo

✓ **Temperatura di generazione (CST)** *(in uscita del sistema di generazione centrale)*

Temperatura del fluido termovettore all'uscita del sistema di generazione centrale (ad es. In uscita dalla caldaia)

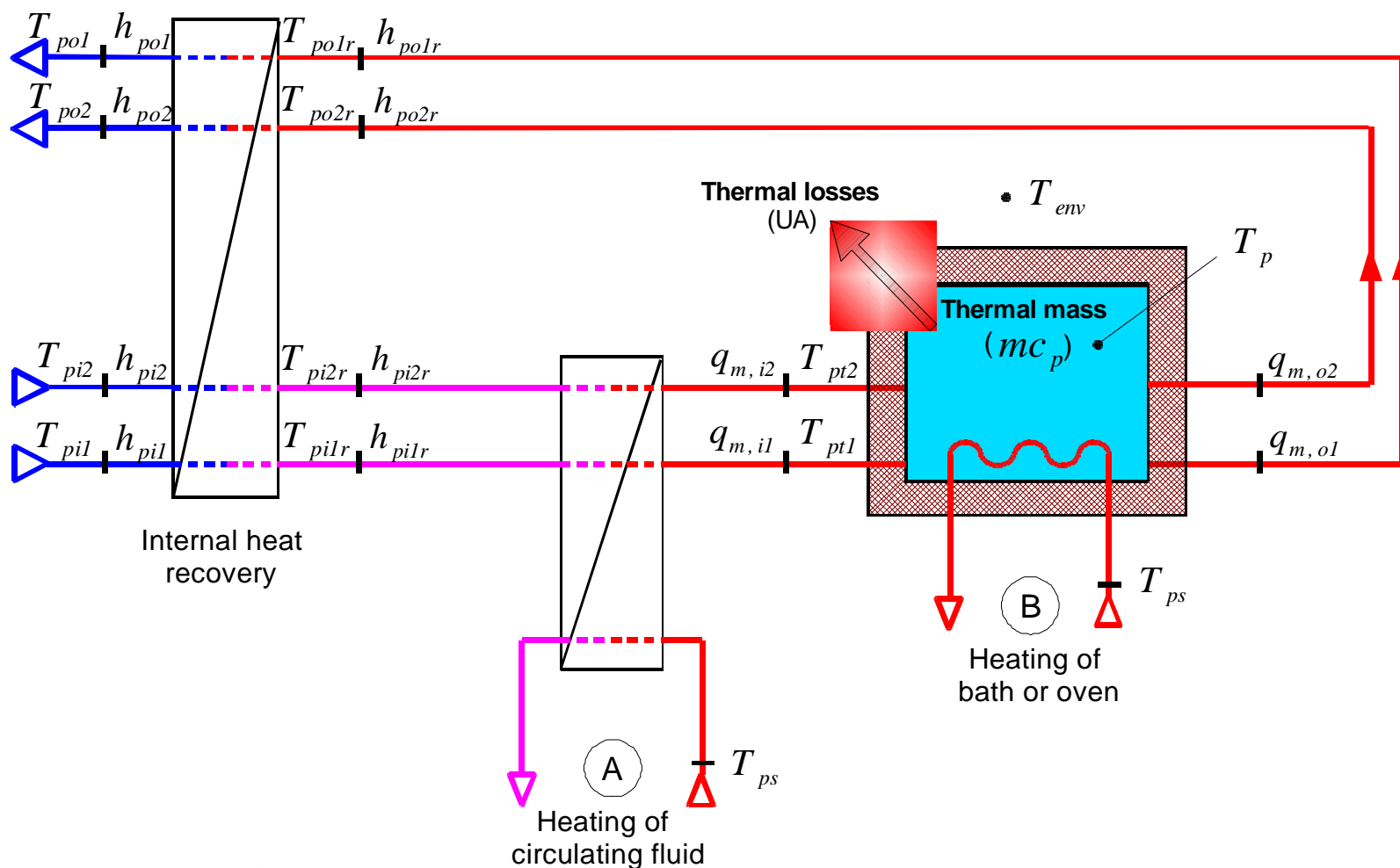
# Livelli di temperatura

EINSTEIN thermal energy industry audit



# Modello di processo

EINSTEIN  
thermal energy  
industry audit



# Modello del processo

## Componenti della domanda totale di calore di processo.

1. Circolazione di fluido in temperatura ( $Q_{UPHc}$ )
2. Raggiungimento della temperatura di processo all'avvio ( $Q_{UPHs}$ )
3. Mantenimento in temperatura ( $Q_{UPHm}$ )

$$Q_{UPH} = Q_{UPHc} + Q_{UPHs} + Q_{UPHm}$$

# Modello del processo

## Definizioni 14

### 1. Circolazione di fluido in temperatura ( $Q_{UPHc}$ )

$$Q_{UPH,c}^{gross} = Q_{UPH,c} + Q_{HX,internal} = m_c c_p (T_p - T_{pi})$$

$$Q_{UPH,c} = m_c c_p (T_p - T_{pir})$$

# Modello del processo

## Definizioni 15

### 2. Riscaldamento all'avvio ( $Q_{UPHs}$ )

$$Q_{UPH,s} = N_s (m c_p)_e (T_p - T_s)$$

$(mc_p)_e$  = massa termica equivalente  
(inerzia termica del fluido + impianto)

### 3. Mantenimento in temperatura ( $Q_{UPHm}$ )

$$Q_{UPH,m} = [(UA)(T_p - T_{env}) + \dot{Q}_L] t_{op}$$

$UA$  = coefficiente di dispersione termica

$\dot{Q}_L$  = potenza assorbita per cambio fase  
(calore latente) o per reazioni chimiche

# Modello del processo

## Esempio 1: coagulazione del latte

### Descrizione del processo

- ✓ Il latte viene prelevato dalla lavorazione precedente a 32 °C e deve essere riscaldato alla temperatura di processo di 40 °C.
- ✓ Per 4 ore il latte viene mantenuto a 40 °C
- ✓ Al termine del processo, i prodotti vengono estratti dal recipiente a circa 40 °C

### Rappresentazione del modello di processo secondo **EINSTEIN**

- ✓ Circolazione -> preriscaldamento del latte in entrata da 32 a 40 °C
- ✓ Avvio: nessun riscaldamento iniziale, poiché all'inizio di ogni lotto il recipiente è vuoto
- ✓ Mantenimento -> calore richiesto per mantenere il contenuto a 40 °C
- ✓ Calore di scarto -> calore contenuto nei prodotti (intermedi)



# Modello del processo

## Esempio 1: coagulazione

Processes description			
Process short name	Milk coagulation		
Description			
Process type	batch		
Unit operation type	Cooking and boiling		
Product or process medium	Milk		
Typical (final) temperature of the process medium during operation	40.0	°C	
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)	32.0	°C	
Start-up temperature of process medium (after breaks)		°C	
Daily inflow of process medium	100.0	m3	
Volume of the process medium within the equipment or storage	0.0	m3	
Power requirement of the process in operation	5.0	kW	

Schedule			
Hours of process operation per day	12.0	h	
Number of batches per day	3.0		
Duration of 1 batch	4.0	h	
Days of process operation per year	260.0		

# Modello del processo

## Esempio 2: lavaggio bottiglie

### Descrizione del processo

- ✓ Macchinari lavabottiglie: circuito chiuso + bagno di lavaggio in acqua calda a circa 75 – 85 °C

### Rappresentazione del modello di processo:

- ✓ Circolazione -> riscaldamento delle bottiglie in entrata alla temperatura del bagno; riscaldamento dell'acqua di integrazione (=> prima stima veloce: ambedue ignorati ...)
- ✓ Avvio: riscaldamento del bagno dopo la pausa notturna o dopole pause del week-end
- ✓ Mantenimento -> domanda di calore richiesto per mantenere il bagno alla temperatura di processo (circa 80 °C)
- ✓ Calore di scarto -> calore accumulato nelle bottiglie pulite

# Modello del processo

## Esempio 2: lavabottiglie

Processes description		
Process short name	Bottle washer	
Description		
Process type	continuous	
Unit operation type	Cleaning of bottles and cases	
Product or process medium	Water	
Typical (final) temperature of the process medium during operation	85.0	°C
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)		°C
Start-up temperature of process medium (after breaks)	55.0	°C
Daily inflow of process medium	0.0	m3
Volume of the process medium within the equipment or storage	20.0	m3
Power requirement of the process in operation	10.0	kW

Schedule		
Hours of process operation per day	14.0	h
Number of batches per day	1.0	
Duration of 1 batch	14.0	h
Days of process operation per year	260.0	

# Modello del processo

## Esempio 3: essiccamento del malto

### Descrizione del processo

- ✓ Il malto viene essiccato in una corrente d'aria calda a circa 60 °C

### Rappresentazione del modello di processo:

- ✓ Circolazione calore: preriscaldamento di un flusso di aria esterna a 60° C
- ✓ Avvio calore: nessun apporto di calore esterno
- ✓ Mantenimento calore: nessun apporto di calore esterno, la temperatura è mantenuta dal flusso di aria calda in entrata
- ✓ Calore di scarto: calore contenuto nell'aria umida

# Modello del processo

## Esempio 3: essiccamento del malto

Processes description			
Process short name	Malt drying		
Description			
Process type	continuous		
Unit operation type	Drying		
Product or process medium	Air		
Typical (final) temperature of the process medium during operation	60.0	°C	
Inlet temperature of the process medium (before heat recovery)	15.0	°C	
Start-up temperature of process medium (after breaks)		°C	
Daily inflow of process medium	10 000.0	m <sup>3</sup>	
Volume of the process medium within the equipment or storage	0.0	m <sup>3</sup>	
Power requirement of the process in operation	0.0	kW	

Schedule			
Hours of process operation per day	24.0	h	
Number of batches per day	1.0		
Duration of 1 batch	24.0	h	
Days of process operation per year	350.0		

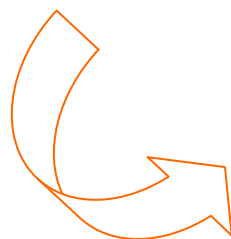
# Assunzioni del modello

- ✓ Livelli di temperatura costanti
  - ✓ Temperatura iniziale, di processo e di deflusso costanti
- ✓ Dipendenza temporale:
  - Stessa tempistica per tutti i flussi in entrata
  - stessa tempistica per tutti i flussi in uscita (flussi reflui)
  - tutti i componenti del processo variano proporzionalmente

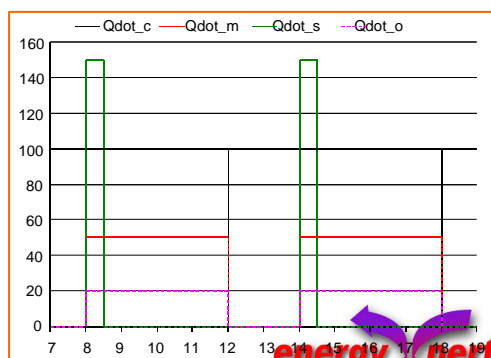
# Profilo della domanda

I processi possono essere:

- ✓ **continui**
- ✓ **“batch” (discontinui)**



Dipendenza temporale della domanda di calore e della disponibilità del calore residuale:

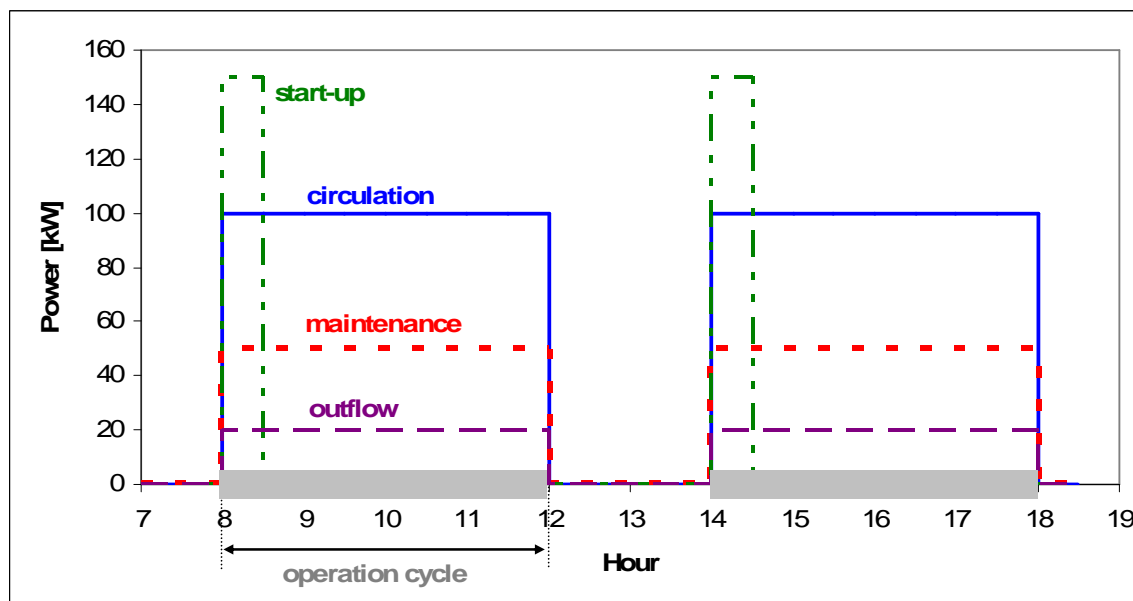


- ✓ Periodi dei flussi in entrata
- ✓ Periodo del riscaldamento all'avvio
- ✓ Periodi di funzionamento del processo
- ✓ Periodi dei flussi in uscita

# Profilo della domanda

## Profilo temporale di processo **predefinito**: processo **continuo**

	Processo continuo
<b>Circolazione</b>	Continua durante $t_{op}$
<b>Avvio</b>	Il primo 20% della durata totale <u>entro</u> $t_{op}$
<b>Mantenimento</b>	Continuo durante $t_{op}$
<b>Flusso residuale</b>	Continua durante $t_{op}$

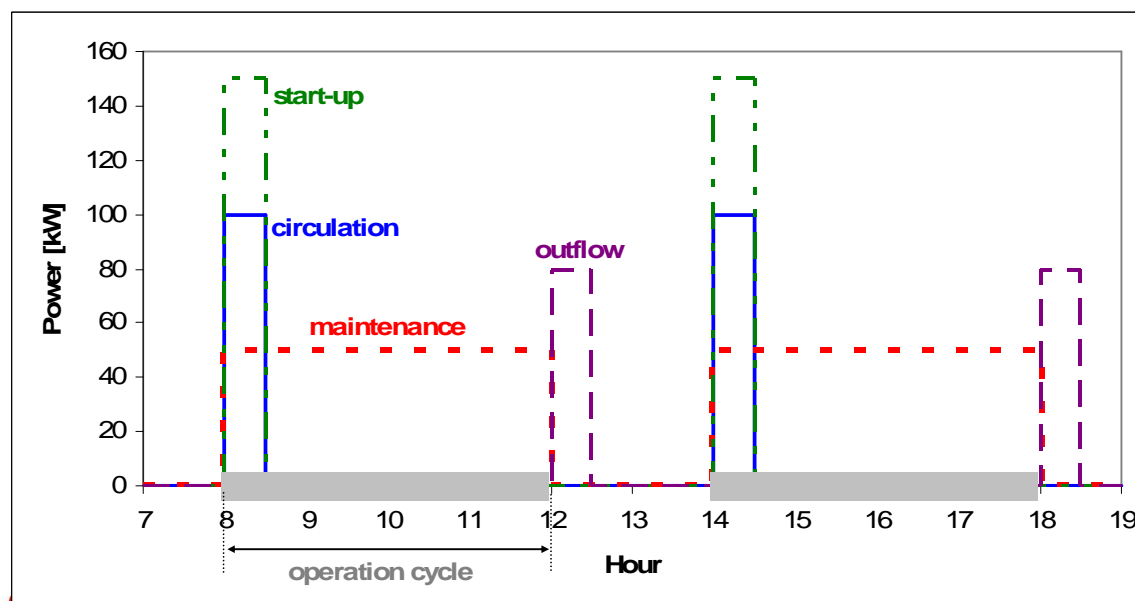




# Profilo della domanda

Profilo temporale di processo **predefinito**: processo “**batch**”

	Processo „batch“
<b>Circolazione</b>	Il primo 20% della durata totale <u>entro</u> $t_{op}$
<b>Avvio</b>	Il primo 20% della durata totale <u>entro</u> $t_{op}$
<b>Mantenimento</b>	Continua durante $t_{op}$
<b>Flusso residuale</b>	Il primo 20% della durata totale <u>dopo</u> $t_{op}$



# Edifici in EINSTEIN

**La domanda di energia di un edificio in EINSTEIN è modellata come quella di un processo**

**EINSTEIN** thermal energy industry audit

Componenti domanda	Riscaldamento ambienti	Raffrescamento ambienti	Acqua calda sanitaria
Circolazione (Inflow)	Riscaldamento aria fresca	Raffreddamento aria fresca Deumidificazione aria fresca	Riscaldamento acqua fredda
Avvio (start-up)	Riscaldamento iniziale / raffreddamento prima dei periodi di occupazione -		-
Mantenimento	Domanda energetica per riscaldamento / raffreddamento eccetto aria rinnovata		-
Outflow	Aria esausta (utile per il recupero in ventilazione controllata)		Acqua di scarto
Temperatura Processo	Temperatura interna desiderata		Temperatura acqua calda (punti di consumo)
Temperatura somministro	Temperatura del fluido termovettore in entrata agli impianti di riscaldamento / di raffreddamento (es. acqua calda/ aria fredda)		Temperatura acqua calda (distribuzione)