

Marco Berti

# BREVIARIO DI ENERGETICA EDILE

**CALORE, VAPORE E RUMORE ATTRAVERSO L'INVOLUCRO EDILIZIO:  
MODELLI DI ANALISI, DIAGNOSI, PROGETTO E CONTROLLO**



**GRAFILL**

Marco Berti

**BREVIARIO DI ENERGETICA EDILE**

ISBN 13 978-88-8207-496-8

EAN 9 788882 074968

EBook, 36

Prima edizione, luglio 2013

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

*A Valeria e alla sua novella,  
ripetuta e dispersa nel vento – nel tempo –  
e nello spazio infinito dell'anima.*

*m. b.*

## **Ringraziamenti**

Alla fine di questo percorso ringrazio tutti coloro che, in vario modo, mi hanno dato il senso e la speranza della conoscenza – e mi hanno sostenuto in un cammino non facile.

In particolare ringrazio l'Editore – nella persona dell'Architetto Paola Oreto.

---

## SOMMARIO

<b>INTRODUZIONE</b> .....	p.	1
<b>1. CENNI (INCOMPLETI) SUL CONCETTO DI SISTEMA</b> .....	"	5
1.1. Introduzione.....	"	5
1.2. Il sistema generale .....	"	6
1.3. Entropia, disordine e disorganizzazione .....	"	14
1.4. Sistemi, catastrofi e strutture dissipative.....	"	16
1.5. Il sistema edilizio (o sistema aperto edilizio) .....	"	17
1.6. Il sistema ambientale (o sistema aperto ambientale) .....	"	19
1.7. Il sistema tecnologico (o sistema aperto tecnologico).....	"	20
1.8. La "costruzione" integrata del sistema edilizio .....	"	20
1.9. Classificazione del sistema tecnologico.....	"	21
<b>2. LA TERMOREGOLAZIONE</b> .....	"	27
2.1. Premessa .....	"	27
2.2. Il benessere ambientale.....	"	27
2.3. Definizioni .....	"	28
2.4. Cenni sulle unità di calore e temperatura.....	"	30
2.4.1. <i>Considerazioni aggiuntive</i> <i>sulle unità di misura energetiche</i> .....	"	31
2.5. L'uomo unitario (o di riferimento).....	"	33
2.6. Produzione, emissione e controllo termico nel corpo umano.....	"	34
2.6.1. <i>La produzione del calore</i> .....	"	34
2.6.2. <i>L'emissione del calore</i> .....	"	36
2.6.3. <i>Il controllo della temperatura</i> .....	"	37
2.7. Il bilancio termico del corpo umano .....	"	38
2.7.1. <i>Equazione di Fanger</i> .....	"	41
<b>3. I PROCESSI DELL'ARIA UMIDA</b> .....	"	45
3.1. Introduzione .....	"	45
3.2. Unità di misura della pressione.....	"	47
3.2.1. <i>Le unità di pressione per l'edilizia</i> .....	"	49
3.2.2. <i>Avvertenza sulle unità di pressione</i> <i>e le unità di misura in genere</i> .....	"	49

3.3.	Le pressioni nell'aria umida .....	p.	49
3.3.1.	<i>Pressione totale e pressione parziale</i> .....	"	50
3.3.2.	<i>Pressione del vapore saturo</i> .....	"	50
3.3.3.	<i>Aspetti e curiosità sul vapore</i> .....	"	53
3.4.	Le curva delle pressioni .....	"	55
3.5.	Il comportamento dell'aria umida.....	"	57
3.5.1.	<i>Le variabili di stato</i> .....	"	57
3.5.2.	<i>Il diagramma psicrometrico</i> .....	"	61
3.6.	Aspetti quantitativi e integrazioni.....	"	70
<b>4.</b>	<b>LA TRASMISSIONE DEL CALORE</b> .....	"	75
4.1.	Introduzione .....	"	75
4.2.	Conduzione, convezione e irraggiamento.....	"	81
4.3.	Conduzione termica .....	"	82
4.4.	Irraggiamento termico.....	"	86
4.5.	Convezione termica .....	"	95
4.6.	Il coefficiente globale di scambio termico.....	"	102
4.7.	Scambio termico per evaporazione e condensazione .....	"	105
4.8.	Comportamento stazionario e comportamento periodico.....	"	107
<b>5.</b>	<b>LA DIFFUSIONE DEL VAPORE</b> .....	"	129
5.1.	Introduzione .....	"	129
5.2.	La concentrazione e la pressione parziale del vapore.....	"	129
5.3.	Correlazione tra trasmissione del calore e diffusione del vapore .....	"	130
5.4.	La produzione del vapore d'acqua.....	"	131
5.5.	Diffusione del vapore nelle pareti edilizie .....	"	132
5.6.	Il diagramma di Glaser .....	"	143
5.7.	Concavità e convessità in un diagramma di Glaser .....	"	150
5.8.	Guaine di controllo della diffusione del vapore.....	"	152
5.9.	Traspirazione (e diffusione) nella riqualificazione termica di un involucro .....	"	152
5.10.	Barriere e freni vapore .....	"	154
5.11.	Parametri di controllo delle barriere e freni vapore.....	"	155
5.12.	La condensazione superficiale .....	"	163
5.13.	Ricambio d'aria o ventilazione.....	"	165
5.14.	Il bilancio igrometrico .....	"	167
5.15.	Dati termoigrometrici dell'aria umida esterna.....	"	169
5.16.	Lo stress igrometrico .....	"	172
5.17.	Sintesi dei provvedimenti contro l'umidità di superficie e nella massa (o interstiziale).....	"	177
5.18.	Reversibilità e irreversibilità del processo di condensazione interstiziale .....	"	177

5.19.	Il funzionamento della barriera di vapore.....	p.	186
5.20.	Strutture orizzontali/oblique di copertura e barriere di vapore.....	"	188
<b>6.</b>	<b>CHIUSURE E PARTIZIONI OPACHE</b> .....	"	191
6.1.	Introduzione.....	"	191
6.1.1.	<i>Classificazione involucro</i> .....	"	191
6.1.2.	<i>Le unità tecnologiche del sistema involucro</i> .....	"	192
6.2.	I ponti termici.....	"	192
6.2.1.	<i>Introduzione</i> .....	"	192
6.2.2.	<i>Le perdite di calore</i> .....	"	192
6.2.3.	<i>Il punto di vista descrittivo</i> .....	"	192
6.2.4.	<i>Il punto di vista prestazionale</i> .....	"	193
6.2.5.	<i>Le patologie prestazionali</i> .....	"	193
6.2.6.	<i>Classificazione</i> .....	"	193
6.2.7.	<i>Le isoterme e il flusso di calore</i> .....	"	193
6.2.8.	<i>Termografia e diagnosi della "patologia" ponte termico</i> .....	"	195
6.2.9.	<i>La trasmittanza nei ponti termici</i> .....	"	196
6.3.	Correggere i ponti termici.....	"	201
6.3.1.	<i>Definizione</i> .....	"	201
6.3.2.	<i>Correzione ed edilizia sostenibile</i> .....	"	201
6.3.3.	<i>Correzione e normativa</i> .....	"	202
6.3.4.	<i>Cenni sul modello di controllo normativo</i> .....	"	202
6.3.5.	<i>Comportamenti pragmatici per la correzione dei ponti termici</i> .....	"	206
6.3.6.	<i>Classificazione, valutazione e correzione dei ponti termici</i> .....	"	209
6.3.7.	<i>Dimensionamento della correzione di un ponte termico</i> .....	"	216
6.4.	Isolare il sistema involucro .....	"	218
6.4.1.	<i>Isolamento delle chiusure verticali opache</i> .....	"	218
6.4.2.	<i>Isolamento delle chiusure orizzontali superiori</i> .....	"	233
6.4.3.	<i>Isolamento delle chiusure orizzontali inferiori</i> .....	"	242
<b>7.</b>	<b>CHIUSURE TRASPARENTI</b> .....	"	247
7.1.	Introduzione.....	"	247
7.2.	Vetro e radiazione solare.....	"	248
7.3.	Requisiti e prestazioni.....	"	249
7.4.	Nomenclatura minima del sistema infisso-serramento .....	"	250
7.5.	La trasmittanza termica e la norma.....	"	251
7.6.	Cenni sul problema acustico .....	"	253
7.7.	La prestazione termica .....	"	263
7.7.1.	<i>Il contributo del vetro</i> .....	"	265
7.7.2.	<i>Il contributo del profilo (o telaio)</i> .....	"	270

7.7.3.	<i>Il contributo del distanziatore</i> .....	p.	271
7.7.4.	<i>Il sistema infisso-serramento</i> .....	"	272
7.8.	La prestazione acustica .....	"	273
<b>8. BILANCIO, RENDIMENTI</b>			
<b>E CLASSIFICAZIONE ENERGETICA</b> .....			
8.1.	Introduzione .....	"	277
8.2.	Il bilancio e gli indici di prestazione energetica .....	"	278
8.2.1.	<i>Il riscaldamento invernale: energia utile</i> .....	"	278
8.2.2.	<i>Il riscaldamento invernale: energia primaria</i> .....	"	304
8.2.3.	<i>Il consumo di acqua calda sanitaria (ACS): energia utile</i> .....	"	309
8.2.4.	<i>Il consumo di acqua calda sanitaria (ACS): energia primaria</i> .....	"	310
8.2.5.	<i>Contributo delle fonti energetiche rinnovabili</i> .....	"	312
8.2.6.	<i>Illuminazione e raffrescamento estivo</i> .....	"	313
8.2.7.	<i>Gli indicatori della prestazione energetica</i> .....	"	314
8.2.8.	<i>Il corpo legislativo/normativo</i> .....	"	316
8.2.9.	<i>Classificazione energetica di un sistema edilizio</i> .....	"	317
<b>9. PRESTAZIONI, MATERIALI E MISURE</b> .....			
9.1.	Introduzione .....	"	329
9.2.	Il modello normativo/prestazionale .....	"	331
9.2.1.	<i>Le prestazioni termo-isolanti</i> .....	"	331
9.2.2.	<i>Le prestazioni fono-isolanti</i> .....	"	334
9.3.	L'isolamento integrato .....	"	338
9.3.1.	<i>Il carattere dei materiali isolanti</i> .....	"	338
9.3.2.	<i>Il controllo normativo</i> .....	"	341
9.3.3.	<i>Il ponte acustico</i> .....	"	345
9.4.	I materiali isolanti .....	"	345
9.4.1.	<i>Introduzione</i> .....	"	345
9.4.2.	<i>Classificazione dei materiali isolanti</i> .....	"	346
9.4.3.	<i>Il bilancio ecologico/energetico</i> .....	"	347
9.4.4.	<i>Materiali isolanti sintetici di origine minerale</i> .....	"	348
9.4.5.	<i>Materiali isolanti naturali di origine minerale</i> .....	"	352
9.4.6.	<i>Materiali isolanti sintetici organici</i> .....	"	355
9.4.7.	<i>Materiali isolanti naturali di origine vegetale</i> .....	"	358
9.4.8.	<i>Materiali isolanti naturali di origine animale</i> .....	"	365
9.4.9.	<i>Isolamento sottovuoto</i> .....	"	366
9.5.	Misura e conoscenza sperimentale .....	"	367
9.5.1.	<i>Il termoflussimetro</i> .....	"	367
9.5.2.	<i>Il Blower Door Test</i> .....	"	371

---

9.5.3. <i>La termografia a raggi infrarossi</i> .....	p.	376
9.5.4. <i>Blower Door Test e Termocamera a raggi infrarossi</i> .....	"	379
<b>10. UNA CASA (QUASI) PASSIVA</b> .....	"	381
10.1. Classificazione (incompleta) dei sistemi passivi .....	"	381
10.2. Il modello prestazionale del sistema (o standard) Passivhaus .....	"	382
10.3. Modelli descrittivi di una casa passiva (o Passivhaus).....	"	385
10.4. Un caso concreto: una casa quasi passiva.....	"	396
10.4.1. <i>Materiali a cambiamento di fase (PCMs)</i> .....	"	403
10.4.2. <i>Raffreddare con il sole: il Solar Cooling</i> .....	"	407
10.4.3. <i>L'involucro trasparente</i> .....	"	412
10.4.4. <i>Le perdite d'involucro: la trasmissione del calore</i> .....	"	413
10.4.5. <i>La misura delle perdite per ventilazione</i> .....	"	416
10.4.6. <i>Ricerca e correzione delle perdite per infiltrazione</i> .....	"	419
10.4.7. <i>Passivo o quasi passivo</i> .....	"	422
<b>CONCLUSIONI</b> .....	"	425
<b>BIBLIOGRAFIA E RISORSE INTERNET</b> .....	"	427



---

## INTRODUZIONE

1.

Questo volume, che si presenta come raccolta di informazioni relative all'energetica edilizia, è di fatto un Compendio, o Breviario: è un vademecum, un piccolo trattato (incompleto) di una cosa piuttosto complessa: l'aria interna e le sue relazioni con le attività umane e con le strutture edilizie che gli danno forma. Del resto, si potrebbe osservare che anche Zevi – l'architetto Bruno Zevi, l'autore del celeberrimo libro "Saper vedere l'architettura" – affermò che il senso dell'architettura stessa è tutto contenuto nello spazio interno: quel "vuoto" non costruito, ma modellato dall'involucro, che contiene l'aria. E si potrebbe andare oltre – in qualche testo di fluidodinamica – dove, capita sovente sentir dire, che il materiale fondamentale dell'ingegnere è proprio l'aria, quel fluido che avvolge tutte le cose. Non vorrei insistere, e non vorrei neanche trarre dai libri citazioni più o meno dotte, invero, vorrei solo rifarmi alla vita di ogni giorno, dove, spesso, per qualche grammo di vapore acqueo in più, nell'aria che ci circonda, si ha una sensazione di afa, ci sentiamo sudaticci, in uno stato di discomfort.

La qualità dell'aria è pertanto fondamentale in tutte le attività umane, e diventa – negli ambienti confinati – la qualità dell'intero involucro, o qualità dell'architettura.

In questo testo si analizzerà nei dettagli il "funzionamento" dell'aria ambiente, – quella interna, quella responsabile del comfort e dello stato di "salute" dell'involucro edilizio, – e se ne indicheranno le modalità di controllo e progetto.

L'aria interna – per questo piccolo Breviario di energetica – è un materiale da "configurare", un raccogliitore di energia, di calore sensibile, latente e via di seguito. È soprattutto – mi si consenta il paragone con un mondo oramai inconsueto – un pezzo fondamentale di un "meccano" della costruzione edilizia.

2.

Parlando dell'aria interna non si può non parlare del vapore. È una "parte" fondamentale dell'aria stessa – poco stabile dal punto di vista dello stato di aggregazione – che condensa, evapora e via di seguito, secondo un modello ricorsivo. Il vapore nell'aria è un paradosso. Basta pensare che le quantità del medesimo – per metro cubo d'aria – sono limitate a qualche grammo. Ma, nonostante questa osservazione, tutto cambia in funzione della sua presenza, e di qualche grammo in più o in meno. Infatti, se l'aria "secca" (a 20 °C) contiene circa 5 grammi di vapore al metro cubo, l'aria "umida" – quella molto afosa – ne contiene appena 10. In altre parole, con soli 5 grammi in più – si passa da una condizione di comfort ad una condizione di forte discomfort.

Nel testo si parlerà molto di vapore, della sua diffusione attraverso le pareti perimetrali ecc.. Parleremo di controllo della presenza del vapore, con lo scopo dichiarato di impedirne il cambiamento di stato – la condensazione – nei punti "invisibili" delle strutture, onde evitare quelle patologie ambientali che interessano le persone, le cose e la muratura. In questo piccolo Breviario del sapere energetico in campo edilizio, sarà dato un posto di riguardo allo studio delle barriere e dei freni vapore, ovvero – all'analisi di quei materiali a permeabilità ridotta finalizzati al controllo della pressione parziale.

3.

Il Breviario – o compendio di energetica – si pone, peraltro, i seguenti obiettivi:

- lo studio della termoregolazione del corpo umano, inteso come produttore di calore e come superficie di scambio dell'energia con l'ambiente;
- l'analisi delle modalità di trasporto del calore, del vapore e del rumore;
- la presentazione dei principali materiali per l'isolamento termico e per l'isolamento acustico;
- lo studio delle patologie a carico delle pareti perimetrali e dei metodi di controllo e correzione;
- gli strumenti di misura da “campo” o da “cantiere”: il termoflussimetro per la determinazione della trasmittanza; la termocamera per “visualizzare” le patologie interne alle murature; il *Blower Door Test* per la valutazione della permeabilità all'aria delle chiusure d'involucro;
- l'analisi della struttura e del funzionamento di una casa-obiettivo: un edificio passivo, o quasi passivo. Comunque un caso concreto di studio della fase di collaudo.

Di fatto, oltre alla prospettiva dei precedenti punti, si potrebbe andare in ulteriori dettagli, costruendo scorci più precisi e indicando argomenti più innovativi:

- l'uso estensivo dei diagrammi psicrometrici, per la valutazione del comportamento e dello stato dell'aria interna agli ambienti confinati;
- la presentazione di una nuova classe di prodotti, i PCM (*Phase Changing Material*): i materiali a cambiamento di fase, in grado di accumulare (e restituire) grandi quantità di energia sotto forma di calore latente;
- il freddo ricavato dal calore dei pannelli solari termici: gli impianti denominati *Solar Cooling*.

#### 4.

Mi si consenta questa paragone: il vademecum (o Breviario) è stato concepito per “Curati” di campagna, scevro da nozionismi di ogni sorta, che si potrebbero attorcigliare su se stessi, senza scopo e senza produzione di fatti, che – per la nostra funzione – sono fondamentali. In altre parole, pur nella completezza delle trattazioni – oppure, pur nella loro incompletezza, – ho cercato di presentare tutti gli argomenti secondo la logica del “rigore relativo”, la quale tiene conto dello scopo, ed evita le equazioni differenziali a coloro che – in cantiere – debbono scegliere in tutta fretta lo spessore dell'isolante. Insomma, ritengo che il Breviario debba essere letto – e portato ovunque – da quel “Curato” di campagna che, fuor di metafora, si chiama ingegnere di “cantiere”, o architetto o perito o geometra e via discorrendo, e non solo, forse potrebbe trovare anche un posto – non di secondo piano – nella “bottega” di un tecnico progettista, che tra un modello e l'altro, abbisogna di avere un'idea, un dato, una tabella, uno schema seppur approssimato e via di seguito.

Quello che intendo dire è che, per ogni passaggio o formula, – o meglio nel 99% dei casi – pur avendo fatto una trattazione rigorosa, sono rimasto coerente al probabile obiettivo d'impiego del testo, ed ho per questo evitato l'uso di modelli matematici complessi, cercando invece di presentar le cose con il rigore e la semplicità delle quattro operazioni fondamentali, che – come diceva un mio vecchio professore, l'ingegner Luigi Ponzio, progettista di trattrici agricole – sono bastanti ad ogni uso e impresa, e persino esaustive nei progetti più ardui.

#### 5.

Il testo è ricco di esempi numerici. L'esempio è usato per comprendere il concetto, e accompagna il taglio teorico. Non solo, particolare cura è stata posta nella presentazione delle unità di misura, che – consuete in questo contesto – sono talvolta inconsuete altrove, in quanto non appartengono al Sistema Internazionale delle unità. Ad esempio, per l'energia, mentre il Sistema Internazionale propone il joule, nell'ambito dell'energetica edilizia (diagnosi, certificazione, progetto ecc.) si usa quasi sempre il chilowattora – o il megajoule – che sono unità più pratiche e più grandi del joule medesimo, e rendono “maneggevoli” i valori numerici in uso in questo campo.

Inoltre, ad ogni grandezza ho fatto corrispondere, nei limiti del possibile, la “sensazione” della medesima, tramite la correlazione con un gesto quotidiano; infatti, mentre tutti noi abbiamo il concreto significato del concetto di litro, chilo ecc., è di solito “ignoto” quello di joule, che rimane una grandezza “astratta”. Per cui – con una certa approssimazione – per avere la sua “visibili-

tà”, si potrebbe paragonare la quantità di un joule alla sensazione dello “sforzo”, o di lavoro che si compie, allorché si raccoglie una mela e la si pone nuovamente sul tavolo.

6.

Il testo, infine, si propone con un approccio sperimentale all’energetica edilizia. Ed è un Compendio da guardare in modo critico. Dove tutte le operazioni si dovranno intendere come pezzi di laboratorio, oppure di cantiere, comunque sperimentali, e saranno certamente da “ribaltare”, rivedere, correggere ecc.. Con lo scopo finale di migliorare la nostra conoscenza, e, non ultimo, il cammino di questo piccolo Breviario sull’energetica. Pertanto lo Scrivente si mette a completa disposizione di ognuno di Voi, di ogni Lettore, per commenti, consigli, suggerimenti e critiche, che diano luogo ad una costruzione più stabile.



---

## 1. Cenni (incompleti) sul concetto di sistema

### 1.1. *Introduzione*

Iniziare con il concetto di sistema, o di complessità (o di olistico), può apparire incongruente in un testo come questo, dove l'obiettivo principale è un'esposizione snella di argomenti che, in qualche misura, sono piuttosto difficoltosi. In sintesi, lo scopo è fare un racconto tecnologico da "cantiere". Dove, con quest'ultimo termine – il "cantiere" appunto – intendiamo nel senso più lato, sia il luogo fisico di costruzione di un qualche "pezzo" di edificio, che il luogo mentale di produzione delle idee, anch'esse snelle, essenziali e soprattutto utili, nel senso microeconomico del termine, ossia risolutive dei bisogni sociali (e individuali).

A questo punto è opportuno fare le seguenti considerazioni consequenziali: 1) il nostro obiettivo di tecnici è, soprattutto, il governo della complessità e della diversità: elementi di diritto, di economia e di tecnica (leggi, decreti, valutazione dei costi, stime, analisi della trasmissione del calore, correzione di un ponte termico ecc.); 2) la teoria dei sistemi, meglio denominata teoria del sistema generale, è l'unico strumento – offerto nel "mercato" della conoscenza – che si propone il controllo (o quantomeno promette il governo) di questa complessità.

Pertanto, il motivo fondamentale di uno sguardo, seppur fugace e incompleto, alla teoria dei sistemi, è il seguente:

– la speranza di comprendere, e unificare in un pensiero integrato, le apparenti diversità tecnologiche (e delle discipline contigue) che ci circondano, e su cui dobbiamo continuamente operare e decidere.

Certamente, una volta nota questa teoria – seppur olistica – non saremo ancora pronti a riparar lavatrici, bagni e cose del genere, per cui, all'occorrenza, sarà cosa piuttosto "furba" chiamare ancora l'idraulico di fiducia, ma – al contempo – dinanzi ai crocicchi culturali del mestiere di ingegnere (o di architetto o di tecnico ecc.), saremo in grado, con meno insicurezza, di prender decisioni basate sulla conoscenza. Infatti, per la teoria, gli oggetti complessi – o sistemi – siano essi materiali o immateriali, hanno sempre un funzionamento pieno di analogie, e quindi possono essere compresi attraverso una chiave unitaria di lettura.

Ma questo non basta, o meglio, non rende pienamente merito alla teoria, la quale, non solo è un potente strumento di unificazione, ma mette in guardia dagli interventi troppo settoriali, i quali, talvolta, risolvono un problema e ne provocano un altro. Un esempio per tutti: l'incremento dell'isolamento mediante una nuova finestra performante, in un vecchio edificio, produce – assai spesso – la condensa di superficie nel paramento interno contiguo al nuovo serramento.

Tutto questo per ricordare un principio fondamentale della teoria dei sistemi:

– un fenomeno complesso non è la semplice "somma" dei fenomeni componenti, ma è di fatto, una cosa (o composizione) del tutto diversa.

Infatti, se si trattasse di una semplice "somma", basterebbe ottimizzare il funzionamento dei singoli elementi (gli "addendi") per avere un risultato migliore, vale a dire, basterebbe cambiare i serramenti per avere una maggiore qualità abitativa, ma non è così, talvolta si peggiora la condizione igienica dell'intero locale. In altre parole – in senso generale – il controllo e il miglioramento di una singola variabile può portare alla perdita del controllo dell'intero sistema, e al peggioramento del suo funzionamento.

Tutto questo per dire che, nell'analisi dei fenomeni in generale, e di quelli tecnici in particolare, bisogna sempre tener conto di una visione il più possibile complessiva dell'intero organi-

smo, e di tutte le variabili che lo definiscono. In parole diverse, è opportuno avere una visione unitaria (o integrata).

Certamente non saranno questi cenni (peraltro incompleti) a cambiare la visione culturale del lettore – ci vuole ben altro esercizio – ma, questo tassello, può indicare una strada, può essere, mi si consenta il traslato, simile ad una risicata tabella di allenamento per un maratoneta, la quale, se rimane lettera morta, non produce il corridore, ma, se diventa motivo di un pensiero (o allenamento) quotidiano, determina, quantomeno, un individuo che giunge – seppur camminando – al traguardo. Un altro motivo per l'introduzione del concetto di sistema, – non secondario, ma di portata certamente più limitata, – è l'uso che se ne fa in ambito normativo, infatti, la UNI 8290 e la UNI 7867 definiscono l'edificio come un sistema aperto costituito da un insieme di unità ambientali, unità tecnologiche, elementi spaziali, elementi tecnici ecc..

## 1.2. *Il sistema generale*

### *Il dedalo della tecnologia*

Una metafora del nostro tempo è il labirinto tecnologico. Una costruzione decisamente intrigata. Una struttura complessa, se, come risulta ai più, molti vi si perdono – e proseguono in un andirivieni indefinito, senza limiti, ricorsivo.

“Camminando” in questo labirinto, ci ritroviamo immersi in un rigurgito di strade, percorsi, punti di sosta; dove, nella speranza di alcuni e il disincanto di molti, si potrebbe forse far mente locale e riprendere – con accortezza – un percorso quasi razionale, una via verso una probabile uscita o uno sbocco fino ad una conclusione. Ma sovente l'andirivieni prosegue, senza soluzione di continuità.

In questo labirinto troviamo ogni cosa: leggi, norme, materiali tradizionali, modelli innovativi, impianti, radiazioni solari, chiusure trasparenti, rumori, vapore, serre, biomassa e via discorrendo. Oggetti materiali e immateriali, tutti collegati e interconnessi al nostro divenire (tecnico) quotidiano. Abbiamo in concreto un insieme di elementi e di relazioni, e questo, vista la complessità e le mutue interazioni – i collegamenti – costituisce un esempio di sistema.

Volendo – con un coltello metaforico – si potrebbe anche tagliare questo dedalo di strade, – sezionare, interrompere, creare dei contorni, – fare insomma delle grandi o piccole fette (alla bisogna) di questa “torta” decisamente variegata. In questo modo, in concreto, avremmo tanti altri “piccoli” sistemi, oppure, semplicemente, tanti sottosistemi. I quali – sotto una lente concettuale – apparirebbero evidenti e definiti una volta tracciati i loro confini, una volta annotata – per tutti gli oggetti del “mondo” – la loro appartenenza: interni o esterni ai sistemi medesimi. E forse – in sostanza – è tutto qui. Ma, andando oltre, si potrebbe anche scoprire il comportamento di un sistema, che – in un contesto di relazione – assume sempre una configurazione unitaria, in “un sol pezzo”. Del resto, anche la vecchia casa, – con i serramenti nuovi di fabbrica, a triplo vetro, fonoisolanti, termoisolanti, a doppia guarnizione ecc. – risponde come un tutt'uno, e peggiora il proprio funzionamento accumulando la muffa in prossimità dei nuovi infissi. Anche in questo caso è un problema di unità e di confine, la “torta” non si può tagliare all'infinito, le fette diventerebbero delle briciole, che, a ben guardare, sono una cosa diversa: senza guarnitura, umide o bruciacchiate ecc.. E questo accade anche nella vecchia casa con i nuovi serramenti performanti, i quali – dal punto di vista del comfort ambientale – non possono essere disgiunti dagli altri componenti che contribuiscono al benessere stesso dell'intero locale. Pertanto, se analizzando i componenti da soli, uno ad uno (i nuovi serramenti, i vecchi muri di confine ecc.), non si può che concludere che tutto funzionerà per il meglio, diversamente, facendo un tutt'uno (o sistema), non si può non notare la forte discontinuità prestazionale tra il vecchio muro ed il nuovo infisso, ossia non si può non mettere in conto un probabile punto critico: la formazione della condensa e, in seguito, della muffa.

Per fare dei semplici esempi – di tipo tecnico e socio-tecnico – nella seguente Tab. 1.1 riportiamo alcuni insiemi che hanno un funzionamento di tipo sistemico.

**Tabella 1.1: Aggregati complessi della realtà quotidiana**

***Aggregati complessi (o sistemi della realtà):***

- i gruppi sociali (società di persone, organizzazioni operaie, squadra di ciclismo in un grande giro ecc.);
- le organizzazioni socio-tecniche (aziende, enti pubblici, ospedali ecc.);
- i processi tecnologici (produzione della lana di roccia, del polistirene ecc.);
- i processi di manutenzione e trasformazione degli impianti tecnologici;
- le banche di dati;
- le reti di comunicazione, le reti di trasporto, ecc..

*Concetto o definizione di sistema*

Iniziamo con alcune definizioni, del tutto equivalenti, che pongono l'accento su aspetti distinti, ossia che rappresentano il concetto da più punti di vista.

Prima definizione:

A) Un sistema è un insieme di entità in **mutua interazione**.

Oppure:

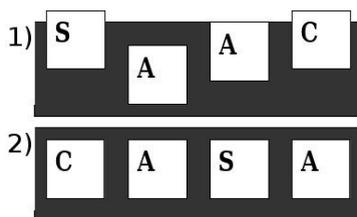
B) Un sistema è un insieme **strutturato** di entità.

Sicuramente, in ambedue le definizioni, si mette in evidenza che un sistema è un insieme di entità, ovvero una collezione di elementi o componenti. Nella definizione A, si pone l'accento sul fatto che i medesimi hanno delle interazioni mutue, diversamente – nella B, – si pone l'attenzione sulla struttura degli insiemi che danno luogo ai sistemi.

Si potrebbe procedere con un esempio linguistico. Un insieme è una collezione di entità, ad esempio un gruppo di lettere dell'alfabeto, le quali – disposte casualmente – non hanno nessun valore semantico, o significato. Diversamente, le lettere interconnesse, ossia in mutua relazione – ordinate – acquisiscono un senso o significato linguistico, diventano una parola della comunicazione, rappresentano un oggetto, un'idea ecc..

Tutto questo è descritto nella seguente figura 1.1.

**Figura 1.1: Differenza tra insieme (1) e sistema (2).**



Dove in 1) abbiamo rappresentato un **insieme** di lettere, le quali – disposte in modo casuale – non assumono uno specifico significato. Al contrario, in 2), le lettere disposte in modo organizzato, diventano un **sistema**, ed assumono il consueto significato dell'oggetto denominato casa. Per comprendere a fondo le definizioni date bisogna oltremodo analizzare il concetto di insieme strutturato, che per molti versi è analogo o equivalente al concetto di mutua interazione.

Un insieme è strutturato quando è organizzato, ordinato, articolato ecc.. Ossia quando gli elementi dell'insieme hanno un definito rapporto di tipo funzionale. Ossia, quando gli elementi dell'insieme hanno una definita e reciproca relazione (interazione mutua).

Un'altra definizione può essere la seguente: un sistema è un aggregato di elementi – materiali e immateriali – che hanno le seguenti proprietà: 1) gli elementi (o componenti) sono in relazione reciproca (la mutua interazione); 2) l'aggregato, nel suo complesso, ha un comportamento finalizzato, ha un obiettivo o scopo (è teleologico).

Come si può notare, questa definizione, aggiunge al concetto di sistema un'altra caratteristica precipua: il volgere dell'intero aggregato al perseguimento di uno scopo.

Pertanto, le caratteristiche fondamentali di una collezione di entità, che costituisce un sistema, sono:

- la mutua interazione tra gli elementi della collezione;
- la finalizzazione verso un obiettivo integrato, connesso all'intera collezione, verso uno scopo di sistema (che, in altre parole, è denominato comportamento teleologico).

Una conclusione importante: un sistema è teleologico, ossia tende sempre ad un definito obiettivo. Questo tendere al comportamento integrato, fa sì che, le proprietà (o i comportamenti) dell'intero sistema, non siano la somma delle proprietà (o dei comportamenti) dei singoli componenti. Con parole diverse, un sistema si comporta come un oggetto integrato, unitario ecc., dove ogni elemento componente mette a comune le sole proprietà olistiche. Pertanto, analizzando il comportamento – evoluzione temporale – di un sistema, si dovrà prescindere dall'atteggiamento del tipo causa-effetto, componente per componente, ma si dovrà quantomeno tentare una lettura integrata (olistica).

### **Tabella 1.2: Il concetto di sistema**

---

***Sistema:***

- aggregato di n parti in mutua relazione (interazione).

***Struttura di un sistema:***

- organizzazione su più livelli: sovra-sistema, sotto-sistemi, componenti, ecc..

***Proprietà fondamentali:***

- la complessità e ridondanza, il perseguimento di un obiettivo, il comportamento integrato, ecc..
- 

### *Il confine o involucro di un sistema*

Una volta definito un sistema, ossia quando sono stati elencati, o in altro modo individuati, gli elementi che lo compongono, e quindi una volta definito il suo confine, diventa importante stabilirne le proprietà. Il confine di un sistema – rispetto al trasporto o trasmissione di massa, energia e informazione – può essere permeabile, oppure impermeabile.

Quando il confine (o involucro) di un sistema è impermeabile il sistema è chiuso. Diversamente, quando il confine è permeabile il sistema è aperto.

Questo concetto di sistema chiuso o aperto è di tipo fondamentale, in quanto collegato allo sviluppo o avvenire del sistema medesimo. Infatti, i sistemi chiusi sono destinati in ogni caso – in tempi più o meno lunghi – a involvere, a ridursi in un progressivo stato di disordine, disorganizzazione. Viceversa, i sistemi aperti – che hanno un'interazione dinamica con il mondo esterno – sono destinati a crescere, oppure a rimanere tal quali, od anche a morire: tutto ciò in funzione della tipologia delle relazioni con il mondo esterno.

Per questo tipo di comportamento – la certezza di un destino negativo nei sistemi chiusi, e la probabilità di un destino in crescita nei sistemi aperti – la quasi totalità dei sistemi, che costituiscono l'ambiente quotidiano, hanno un confine aperto: sono permeabili a tutti gli scambi con il mondo esterno.

**Una digressione.** Taluni autori, riguardo al confine, danno una classificazione diversa, ossia parlano di sistemi isolati, sistemi chiusi e sistemi aperti:

- 1) un sistema **isolato** non interagisce con l'esterno: non scambia né energia né materia;
- 2) un sistema **chiuso** interagisce solo parzialmente: scambia energia;
- 3) un sistema **aperto** interagisce totalmente: scambia energia e materia.

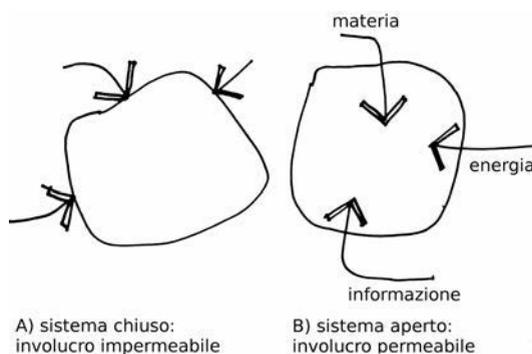
In questo testo si adotta la classificazione più sintetica: sistemi chiusi o sistemi aperti. E viene introdotto anche lo scambio d'informazione. In sintesi, i sistemi aperti – come modello di lettura della realtà – sono complessi, mutevoli nel tempo e in grado di assorbire gli arricchimenti provenienti dal mondo esterno.

### *Involucro chiuso o involucro aperto*

Immaginiamo un locale di abitazione con un involucro teorico: un confine chiuso che scambia il “nulla” con il mondo esterno. In questo caso, anche se da un punto di vista energetico – almeno per qualche giorno – la cosa potrebbe essere positiva, certamente, con il passare del tempo, per il locale e i suoi improbabili abitanti, il percorso sarebbe verso la fine di ogni forma di ordine e di vita. Pertanto, ogni involucro reale è un involucro aperto. Anche le abitazioni passive, quelle che in teoria non abbisognano di impianti termo-meccanici, e che controllano in modo puntuale lo scambio energetico interno-esterno con l'obiettivo di rendere minima (o quasi nulla) la perdita di calore, sono sistemi aperti, nel senso che tendono a massimizzare lo scambio di informazioni con l'esterno, il guadagno solare e la traspirazione.

Per quanto detto si potrebbe concludere che in termini di confine – o di involucro o di chiusura – le proprietà fondamentali sono: a) la permeabilità; b) la selettività, che è una forma a permeabilità orientata, dove una grandezza passa in un senso (ad esempio dall'interno all'esterno) e non nel senso opposto.

**Figura 1.2: Involucro o confine di un sistema**



### *Il comportamento dinamico*

Per **comportamento dinamico** di un qualunque sistema si intende il suo funzionamento nel tempo in condizioni di regime variabile, ovvero si prescinde dall'analisi della condizione permanente (che è l'obiettivo del sistema), e si concentra lo sguardo sulle modalità transitorie, quelle che vengono realizzate per giungere allo stato permanente stesso. In parole diverse, mentre il **comportamento permanente** (o stazionario) rappresenta il sistema che ha raggiunto il suo obiettivo di funzionamento (e vi rimane, teoricamente, in un tempo indefinito), quello dinamico rappresenta il sistema in divenire, che si sposta da uno stato di funzionamento all'altro.

In modo diverso, mentre l'analisi dinamica di un sistema lo rappresenta per un intervallo di tempo limitato, diversamente, l'analisi permanente lo rappresenta (oltre il comportamento dinamico) per il resto del suo ciclo di vita.

Tuttavia esiste questo paradosso sistemico: il comportamento transitorio (o dinamico) è in concreto lo stato di funzionamento più ricorrente, ed è la risposta alle continue sollecitazioni del mondo esterno, che fanno passare un sistema, senza soluzione di continuità, da un transitorio all'altro.

Per quanto detto, dal punto di vista del comportamento dinamico (o transitorio), esistono le seguenti differenze:

– nel sistema **chiuso**, non esistendo la possibilità di assorbire le risorse dall'esterno, il funzionamento dinamico, una volta consumati i materiali e le risorse interne, conduce con certezza al progressivo disordine e degrado;

– in un sistema **aperto**, esistendo il continuo prelievo delle risorse ambientali, l'evoluzione dinamica determina (con elevata probabilità) la conservazione o il miglioramento dello stato organizzativo del sistema stesso.

In conclusione, all'interno di una teoria generale dei sistemi, il modello di riferimento è quello del sistema aperto in competizione con l'ambiente, dove quest'ultimo assume il ruolo di contenitore delle risorse e di deposito dei rifiuti derivanti dai processi di scambio.

### *Comportamento teleologico (ed equifinalità)*

Dal punto di vista linguistico, l'aggettivo *Teleologico*, ed in particolare il sostantivo *Teleologia*, hanno concretamente il seguente significato: la tendenza ad un divenire finalizzato, ad un comportamento dinamico con uno scopo, un fine, un obiettivo.

Per quanto riguarda un sistema, possiamo affermare che ha sempre un comportamento **teleologico**, ossia ha sempre uno scopo o obiettivo da perseguire.

Un obiettivo generale di un sistema aperto è il raggiungimento dello stato di quasi-stazionarietà – o stato di equilibrio – ovvero di quelle condizioni di funzionamento dove, pur permanendo lo scambio con l'esterno, lo stato sistemico rimane invariante.

Lo stato-obiettivo di quasi-stazionarietà si può raggiungere con trasformazioni diverse, ossia partendo da stati iniziali differenti. Questa proprietà dei sistemi aperti, che consiste nel giungere allo stesso stato finale partendo da condizioni iniziali diverse, si chiama **equifinalità**.

In conclusione, un sistema aperto ha un comportamento teleologico (tendente ad uno scopo) ed equifinalizzato, che gli consente di raggiungere un obiettivo percorrendo delle traiettorie di trasformazione completamente diverse.

Nel caso di un sistema aperto – ovvero di un aggregato che scambia continuamente materia, energia e informazione con il mondo esterno – il comportamento teleologico (finalizzato), ossia l'esistenza di un obiettivo, è più forte e vitale che in un sistema chiuso (o tendenzialmente chiuso), in quanto il sistema aperto può continuamente attingere dalle risorse praticamente illimitate dell'ambiente esterno.

In generale possiamo definire il seguente schema concettuale: ad ogni sistema corrisponde un obiettivo, tanto più per i sistemi aperti, che si alimentano dall'esterno. Non solo, ogni sistema è decomponibile in diversi sotto-sistemi, i quali hanno distinti e diversi obiettivi da perseguire: i sotto-obiettivi.

In conclusione:

- 1) il sistema generale (l'unità sotto analisi) è decomponibile in n sotto-sistemi;
- 2) al sistema generale e agli n sotto-sistemi corrispondono rispettivamente un obiettivo generale ed n sotto-obiettivi.

Per quanto detto, analizzando il sistema generale, e scomponendolo, ci ritroviamo davanti ad una collezione integrata di obiettivi e sotto-obiettivi, i quali sono organizzati e ordinati in modo gerarchico – per livelli – e tendono, con un comportamento unitario, al perseguimento dell'obiettivo generale.