



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

**Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed
Energetica
DOTTORATO IN FISICA TECNICA
XXV CICLO**

Tesi di Dottorato

Riqualificazione Energetica dell' Edificio sede
della Direzione Generale della Amministrazione
Autonoma dei Monopoli di Stato (A.A.M.S.)

Dottorando:
Marco Romagna

Tutor:
Prof. Ing. Stefano Grignaffini

Anno Accademico 2011/2012

A Mamma e Papà.

ABSTRACT

Il problema energetico continua a crescere di intensità ed è ormai campo di confronto per molti settori anche non prettamente tecnico- scientifici. Lo studio e la ricerca sono sempre più multidisciplinari e le iniziative e le creazioni con finalità ecologico-ambientali sono sempre più frequenti e ben viste dalla collettività. L'edilizia non è estranea al vivo interesse verso questa problematica, anzi alla luce dei forti consumi che genera, è tra i settori più attivi in merito. L'efficienza energetica è al pari di altri aspetti costruttivi una dotazione indispensabile di ogni edificio che sia da realizzarsi o preesistente. Il progetto di una nuova struttura pone delle problematiche non semplici ma in generale meno complesse di quelle che si affrontano durante una riqualificazione energetica, ancor più di edifici con valore storico. Il seguente lavoro vuole studiare come sia possibile oggi sfruttare metodologie di calcolo più complesse di quelle imposte da normative e comune pratica professionale, per analizzare in modo più realistico e preciso il comportamento energetico di edifici per sottoporli a interventi di riqualificazione energetica per il miglioramento dell'efficienza globale e specifica di impianti e strutture. Si ripropone l'intero iter progettuale dalla diagnosi energetica all'analisi economica passando per il calcolo termodinamico in regime transitorio. Quest'ultimo sarà implementato con modellizzazione assistita dal software TRNsys, leader in ambito accademico e non solo. Viene inoltre, per dare più efficacia e concretezza allo studio svolto un test progettuale a 360° su un edificio reale di dimensioni notevoli come la sede centrale dell'AAMS in Piazza Mastai Roma.

In quest'ottica si presenterà anche la soluzione della tecnologia LED come nuova ed efficace sostituta delle lampade tradizionali per l'illuminazione degli ambienti .

Nello specifico, si è proposto la sostituzione di un impianto tradizionale d'illuminazione con uno con lampade a LED. Si è quindi studiata l'attuale configurazione degli ambienti e delle lampade e la nuova configurazione che si avrebbe con i nuovi apparecchi luminosi, effettuando sia un confronto illuminotecnico che energetico.

La complessità, i vincoli architettonici e storici e le scadenti prestazioni energetiche attuali dell'edificio hanno portato ad uno studio ampio e complesso che ha evidenziato risultati interessanti e degni di ulteriori approfondimenti.

Roma, Dicembre 2012

Marco Romagna

PRECEDENTI PUBBLICAZIONI E ATTIVITÀ UNIVERSITARIA

Questo lavoro si inserisce sulla scia di lavori effettuati negli ultimi anni in ambito universitario che trattano problematiche affini inerenti problemi energetici attinenti al più ampio ambito della fisica tecnica ambientale. Di seguito si riportano i testi con riferimenti per quanti siano interessati a ricercare maggiori informazioni sugli argomenti trattati:

- S. Biasiotti, S. Grignaffini, M. Romagna: “Impianto Fotovoltaico di grande potenza integrato con serre per coltivazioni agricole” - 65° Congresso ATI 65° Congresso Nazionale ATI – Domus de Maria (CA), 13-17 Settembre 2010
- Grignaffini, M. Romagna, D. Principia: “Improving Building Energy Efficiency” - Energy and Sustainability 2011, 11 - 13 April 2011, Alicante, Spain
- S. Grignaffini, M. Romagna “Lighting study for Air Traffic Control Towers” - Light 2011, 17 - 19 May 2011, Poznan, Poland
- S. Grignaffini, M. Romagna, A. Cefalo: " Solar Cooling: A Case Study " - Roomvent 2011, 19-22 June 2011, Trondheim, Norway
- S. Grignaffini, M. Romagna “Solar Cooling Design: A Case Study” – Eco Architecture 2012, 5-7 September 2012, Kos, Greece

Il Candidato è attualmente collaboratore del Prof. Stefano Grignaffini nell'organizzazione didattica del Corso di Progettazione Bioclimatica del Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e del Corso di Impianti Termotecnici del Corso di Laurea in Ingegneria Edile - Architettura presso la Facoltà di Ingegneria della Sapienza Università di Roma.

SOMMARIO

1.	INTRODUZIONE	1
2.	PROBLEMA ENERGETICO E SVILUPPO TECNICO	2
2.1	DOMANDA ENERGETICA E SUOI SVILUPPI	3
2.1.1	I PREZZI DELLE FONTI ENERGETICHE.....	7
2.2	LA SITUAZIONE EUROPEA	7
2.3	LA SITUAZIONE ITALIANA.....	8
2.3.1	MACRO INTERVENTI AUSPICABILI	12
2.4	IL TREND CLIMATICO.....	13
3.	IMPIANTI AD ENERGIE RINNOVABILI	14
3.1	TECNOLOGIE ENERGETICHE	14
3.1.1	ENERGIA EOLICA.....	15
3.1.2	ENERGIA DA BIOCOMBUSTIBILI.....	15
3.1.3	ENERGIA SOLARE.....	16
3.2	ANALISI DEL MERCATO.....	19
3.2.1	SVILUPPO DEL SOLARE TERMICO	19
3.2.2	SVILUPPO DEL FOTOVOLTAICO.....	21
3.2.3	.. SVILUPPO DEL SOLAR-COOLING	22
3.2.4	GRANDI POTENZIALITÀ DEL SOLARE IN ITALIA	23
3.3	LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DI EDIFICI PUBBLICI	24
4.	ENERGIA SOLARE	26
4.1	LA RADIAZIONE SOLARE	27
4.1.1	LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN.....	28
4.1.2	LEGGE DI WIEN	29
4.1.3	LA RADIAZIONE AL SUOLO	29
4.2	CALCOLO DELLA RADIAZIONE AL SUOLO	30
4.2.1	ESEMPI SVILUPPATI CON TRNSYS.....	31
5.	SOLARE ATTIVO.....	37
5.1	I COLLETTORI SOLARI	40
5.1.1	COLLETTORI A BASSE TEMPERATURE	40
5.1.2	COLLETTORI AD ALTE TEMPERATURE.....	45
5.1.3	PARAMETRI CARATTERISTICI DEI COLLETTORI	48
5.1.4	CALCOLO DELL'EFFICIENZA DEI COLLETTORI.....	50
5.1.5	ESEMPI SVILUPPATI IN TRNSYS.....	56
5.2	I PANNELLI FOTOVOLTAICI.....	58
5.2.1	DEFINIZIONE DELL'EFFETTO FOTOVOLTAICO.....	58
5.2.2	STRUTTURE E TIPOLOGIE DI PANNELLI FOTOVOLTAICI.....	59
5.2.3	DALLA CELLA AL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	60
5.2.4	INTEGRAZIONE DEI SISTEMI FOTOVOLTAICI IN ARCHITETTURA.....	61
5.2.5	MODELLAZIONE MATEMATICA DI UN PANNELLO FOTOVOLTAICO.....	62
5.2.6	ESEMPI SVILUPPATI CON IL TRNSYS.....	65
5.3	IL SOLAR COOLING	67
5.3.1	MACCHINE FRIGORIFERE AD AS/ADSORBIMENTO	68
5.3.2	MODELLAZIONE MATEMATICA: MACCHINA FRIGORIFERA AD ASSORBIMENTO.....	70
6.	RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA: PROGETTO IN TRANSITORIO.....	73
6.1	ITER DI PROGETTAZIONE EFFICACE	73
6.2	ANALISI PROGETTUALE	74
6.2.1	LA RACCOLTA DEI DATI.....	76
6.2.2	ESITI E INTERVENTI PROGETTUALI.....	77
6.3	ANALISI ENERGETICA.....	77
6.3.1	BILANCIO ENERGETICO.....	79
6.3.2	VALORI DI RIFERIMENTO	80
6.4	ANALISI ECONOMICA.....	81
6.4.1	INDICI DI ANALISI FINANZIARIA	82

7.	ANALISI DELL'EDIFICIO SEDE DELLA DIREZIONE GENERALE	
A.A.M.S.		84
7.1	EDIFICIO DI INTERVENTO	84
7.2	ANALISI PROGETTUALE	86
7.2.1	IMPIANTI TERMICI	86
7.2.2	INVOLUCRO EDILIZIO	89
7.2.3	DIAGNOSI DEI CONSUMI ENERGETICI	90
7.2.4	RIEPILOGO E CONCLUSIONI	95
7.3	ANALISI ENERGETICA	96
7.3.1	TARATURA DEL MODELLO	97
7.3.2	OUTPUT MODELLO NUMERICO TRNSYS	102
8.	RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELL'EDIFICIO SEDE	
DELLA DIREZIONE GENERALE A.A.M.S.		110
8.1	ANALISI DEI SINGOLI INTERVENTI	110
8.1.1	EDIFICIO STORICO	110
8.1.2	EDIFICIO NUOVO	113
8.2	INTERAZIONE DEGLI INTERVENTI	114
8.2.1	VENTILAZIONE FORZATA NOTTURNA	117
8.3	INTEGRAZIONE CON SISTEMI A FONTI RINNOVABILI	119
8.3.1	IMPIANTO A COLLETTORI SOLARI	121
8.3.2	DATI ENERGETICI COPERTURA IMPIANTO	126
8.3.3	SVILUPPI CON SOLARE A CONCENTRAZIONE	127
9.	RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA: ANALISI DEI FABBISOGNI	
PER L'ILLUMINAZIONE DELL'EDIFICIO		128
9.1	STUDIO ILLUMINOTECNICO DEGLI AMBIENTI CONFINATI	
NELLA DIREZIONE GENERALE DELL'AAMS.		135
9.1.1	CONSUMI ELETTRICI PER ILLUMINAZIONE DELL'EDIFICIO A.A.M.S.	135
9.1.2	STUDIO ILLUMINOTECNICO DELL'AMBIENTE UFFICIO: STATO DI FATTO	136
9.1.3	STUDIO ILLUMINOTECNICO DELL'AMBIENTE UFFICIO: STATO DI PROGETTO.	144
9.1.4	VALUTAZIONE ENERGETICA	147
9.1.5	VALUTAZIONE ECONOMICA	148
10.	APPENDICE: TAVOLE GRAFICHE	152
10.1	RIFERIMENTI STORICI DELL'EDIFICIO	152
10.2	PLANIMETRIE E DETTAGLI COSTRUTTIVI	153
10.3	DETTAGLIO DELLE VETRATE	154
11.	BIBLIOGRAFIA	155

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Distribuzione geografica della domanda energetica procapite nel 2030.....	3
Figura 2 - Andamento produzione energetica mondiale per fonti.....	4
Figura 3 - Incrementi delle emissioni di CO ₂ nel periodo 2006-2030 per stato e per regione.....	5
Figura 4 - Andamento prezzi principali fonti fossili nel decennio 2000-2010 in rapporto alle quotazioni del 2005.....	6
Figura 5 - Andamento consumi energetici europei per fonte.....	8
Figura 6 - Andamento produzione energetica europea percentuale per fonte.....	9
Figura 7 - Andamento consumo energetico europeo per settore.....	9
Figura 8 - Media consumo energetico italiano percentuale per settore negli anni 1990-2007.....	10
Figura 9 - Andamento consumo energetico italiano residenziale e terziario percentuale per fonte.....	11
Figura 10 - Consumo energetico percentuale italiano per il settore residenziale e terziario nel 2007.....	12
Figura 11 - Esempio di sistema fotovoltaico a concentrazione.....	16
Figura 12- Evoluzione delle superfici installate annualmente nell'Unione Europea dal 1994 in m ²	19
Figura 13 - Forte sviluppo del fotovoltaico in MWp.....	20
Figura 14 - 14: Ente Gestore dei Servizi Energetici in Italia.....	24
Figura 15 – Spettro elettromagnetico.....	28
Figura 16 - Modello realizzato con TRNsys per l'analisi della radiazione solare.....	32
Figura 17 - Andamento radiazione extraterrestre(a) a confronto con l'angolo zenitale(b).....	33
Figura 18 - Assi di rotazione per modello ad inseguimento solare.....	33
Figura 19 - : Andamento radiazione totale incidente con angolo di tilt di 0°(a), 90°(b), 33° (c).....	35
Figura 20 - Angolo di tilt e inseguimento solare: efficienza di captazione... 36	36
Figura 21 - Rappresentazione logica energie nei sistemi ad energia solare. 38	38
Figura 22 – collettore solare a piastra piana.....	41
Figura 23 – collettore solare a tubi sottovuoto.....	43
Figura 24 – Schemi di collettori a concentrazione solare: parabolici lineari (a), a torre con ricevitore centrale (b), a disco (c).....	45
Figura 25 - Rappresentazione CAD 3D di un MicroCPS Sopogy SopoNova™.....	46
Figura 26 - Schema di funzionamento collettore solare piano.....	50
Figura 27 - Efficienza del collettore solare al variare dell'irraggiamento.....	53
Figura 28 - Efficienza del collettore con irraggiamento di 1000 W/m ² per diversi collettori.....	54
Figura 29 - Rappresentazione IAM trasversale per diverse tipologie di collettore.....	55
Figura 30 - Modello realizzato con TRNsys per l'analisi di un collettore solare.....	56
Figura 31 - Simulazione d'esempio con singolo collettore solare piano: (a) solstizio d'estate, (b) solstizio d'inverno.....	57

Figura 32 - Modello realizzato con TRNsys per l'analisi di un impianto termico a collettori solari	58
Figura 33 - Pannelli fotovoltaici	59
Figura 34 - Schematizzazione circuito elettrico a 4 parametri per modulo fotovoltaico	62
Figura 35 - Esempio Curva caratteristica I-V e relativa curva di Potenza. ...	63
Figura 36 - Correlazione IAM pannello fotovoltaico	65
Figura 37 - Modello realizzato con TRNsys per l'analisi di un impianto fotovoltaico	66
Figura 38 - Output giornaliero TRNsys funzionamento pannello fotovoltaico.	66
Figura 39 - Esempio di macchina ad assorbimento.	69
Figura 40 - Schema funzionamento macchina ad assorbimento	70
Figura 41 - Schema logico per gli interventi di riqualificazione energetica. 75	
Figura 42 - Rappresentazione schematica del bilancio termico	79
Figura 43 - Localizzazione Edificio A.A.M.S.	85
Figura 44 - Scala di efficienza energetica a Roma per il EP ₁	86
Figura 45 - Gruppo frigorifero Carrier 30XA 602	87
Figura 46 - Immagine della campagna termografica su edificio	88
Figura 47 - Consumo elettrico mensile edificio A.A.M.S. 2009-2010 con andamento temperature medie	93
Figura 48 - Dati calcolati per il raffrescamento dell'edificio A.A.M.S.	94
Figura 49 - Modello dell'edificio A.A.M.S. in TRNsys	96
Figura 50 - Esempio di schermata di input di TRNbuild	97
Figura 51 - Radiazione totale incidente senza tettoia (a) e con tettoia (b)....	99
Figura 52 - Studio delle ombre e loro localizzazione	100
Figura 53 - Andamento temperature Piano terra-Piano interrato per l'edificio nuovo nell'arco di un anno	104
Figura 54 - Andamento temperature e richiesta energetica in settimane: a) invernale, b) primaverile, c) estiva.	106
Figura 55 - Andamento richiesta di potenza termica nell'arco di un anno..	107
Figura 56 - Grafico delle potenze in ordine decrescente.	108
Figura 57 - Riduzione fabbisogno energetico per interventi di isolamento edificio storico	112
Figura 58 - Riduzione fabbisogno energetico per sostituzione vetri - edificio storico	112
Figura 59 - Riduzione fabbisogno energetico per isolamento - edificio nuovo	113
Figura 60 - Riduzione fabbisogno energetico per sostituzione vetri - edificio nuovo	114
Figura 61 - Temperature e potenze edificio nuovo con interventi sulle strutture	116
Figura 62 - Temperature con ventilazione notturna.	117
Figura 63 - Grafico delle potenze in ordine decrescente.	119
Figura 64 - Modello realizzabile in TRNsys per l'analisi dell'edificio e dell'impianto rinnovabile	120
Figura 65 - Curva di efficienza dei collettori solari di calcolo	122
Figura 66 - Output di calcolo TRNsys del calcolo di integrazione dinamica con solar cooling per edificio AAMS	123

Figura 67 - Fabbisogno termico e disponibilità da solare per integrazione al riscaldamento invernale	124
Figura 68 - Fabbisogno termico e disponibilità da macchina ad assorbimento per il raffrescamento estivo.....	125
Figura 69 - Estratto tecnico catalogo SANYO macchine ad assorbimento in corrente di acqua calda	126
Figura 70 - Consumi elettrici relativi al biennio 2009-10	136
Figura 71 - Caratteristiche del Locale Ufficio	137
Figura 72 - Rendering 3D del Locale Ufficio.....	137
Figura 73 - Definizione del Fattore di luce diurna, D.....	138
Figura 74 - Simulazione in DIALux della scena di luce naturale: Rendering.	139
Figura 75 - Simulazione in DIALux della scena di luce naturale: Rendering colori sfalsati.....	140
Figura 76 - Simulazione in DIALux della scena di luce naturale: grafica dei valori D.	140
Figura 77 - Disposizione corpi illuminati allo stato di fatto.	141
Figura 78 - Simulazione in DIALux della scena di luce artificiale allo stato di fatto: risultati illuminotecnici.....	142
Figura 79 - Simulazione in DIALux della scena di luce artificiale allo stato di fatto: Rendering colori sfalsati.....	143
Figura 80 - Disposizione corpi illuminati allo stato di progetto.	144
Figura 81 - Simulazione in DIALux della scena di luce artificiale allo stato di progetto: risultati illuminotecnici.....	145
Figura 82 - Simulazione in DIALux della scena di luce artificiale allo stato di progetto: Rendering colori sfalsati.....	146
Figura 83 - Valutazione energetica: lampade a fluorescenza.	148
Figura 84 - Valutazione energetica: lampade LED.	148
Figura 85 - Servizi di vendita energia elettrica (fonte GSE).	149
Figura 86 - Flusso di cassa - Caso di totale sostituzione corpi illuminanti	150
Figura 87 - Flusso di cassa - Caso di sostituzione	151

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Dipendenza energetica italiana in percentuale per fonti.	10
Tabella 2 – Distribuzione percentuale di radiazione solare.....	27
Tabella 3 - Angolo di tilt e inseguimento solare: efficienza di captazione....	34
Tabella 4 - Valori limite dell' EPI_L al 1 gennaio 2010	80
Tabella 5 - Scala di classificazione della prestazione energetica di EP_i e per di EP_{acs}	81
Tabella 6 - Caratteristiche termiche delle superfici opache edificio A.A.M.S.	89
Tabella 7 - Tipologia e dimensioni dei serramenti esterni edificio A.A.M.S.	90
Tabella 8 - Dati forniti consumo di gas edificio A.A.M.S. ed energia prodotta.	91
Tabella 9 - Dati forniti consumo di elettricità edificio A.A.M.S.....	92
Tabella 10 - Dati calcolati per il raffrescamento dell'edificio A.A.M.S.	94
Tabella 11 - Analisi fattibilità solar-cooling con TRNsys.....	95
Tabella 12 - Fabbisogno calcolato con modello TRNsys edificio A.A.M.S.	108
Tabella 13 - Effetti interventi di riqualificazione - edificio storico.....	111
Tabella 14 - Effetti interventi di riqualificazione - edificio nuovo.....	114
Tabella 15 - Fabbisogno ricalcolato con modello TRNsys edificio A.A.M.S. postinterventi alle strutture	115
Tabella 16 - Fabbisogno ricalcolato con modello TRNsys edificio A.A.M.S. postinterventi alle strutture e con integrazione da solare termico.....	125
Tabella 17 - Elenco sintetico delle principali norme tecniche inerenti le prestazioni energetiche degli edifici	128
Tabella 18 - Significato dei parametri introdotti nelle relazioni (9.2) e (9.3)	130
Tabella 19 - Esempi di valori standard dei tempi t_o , t_D e t_N riferiti ad un periodo annuale.....	130
Tabella 20 - Esempi di valori standard dei coefficienti F_O ed F_D	131
Tabella 21 - Relazioni per il calcolo del coefficiente F_O	131
Tabella 22 - Valori indicativi dell'indice LENI con il metodo rapido per alcune destinazioni d'uso	133
Tabella 23 - Valori minimi di illuminamento medio mantenuto (E_m) relativi ad alcuni tipi di ambienti di lavoro, raccomandati nella UNI EN 12464-1. Per completezza sono riportati: i valori minimi dell'uniformità di illuminamento (U_0), i valori massimi dell'indice di abbagliamento (UGRL), i valori massimi dell'indice di resa cromatica (R_a) delle lampade.	134
Tabella 24 - Classe di qualità del progetto illuminotecnico. Il quadrato nero è riferito al soddisfacimento dei requisiti indicati in Tabella 23, il cerchio bianco è riferito agli altri requisiti indicati nei paragrafi della UNI EN 12464-1	135
Tabella 25 - Incidenza consumi illuminazione sul consumo totale d'elettricità	136
Tabella 26 – Dati geometrici e coefficienti di riflessione delle pareti.....	136

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il corpus normativo inerente la progettazione e la verifica degli edifici in ambito energetico ha avuto una crescita interessante, confermando un'attenzione sempre più diffusa nei confronti della problematica energetica e ambientale. Si è cercato di incrementare progressivamente il livello prestazionale richiesto agli edifici di nuova costruzione imponendo valori minimi da rispettare. I risultati attesi dall'applicazione delle norme sono comunque ancora limitati dalle attuale richiesta di calcolo. Le verifiche in regime stazionario, infatti, anche se caratterizzate da una maggiore semplicità di impiego non permettono la realizzazione di un modello affidabile per tutti i fenomeni fisici coinvolti nel comportamento termico energetico di un edificio. La complessità dei fenomeni di trasmissione del calore e la veloce variabilità dei parametri di calcolo non diventano trascurabili in situazione in cui gli apporti solari e l'inerzia termica giocano un ruolo determinante come nel periodo estivo. L'attuale normativa, consapevole di ciò, si limita a richiedere la verifica tecnica del raggiungimento di adeguati livelli prestazionali nel periodo invernale ove un calcolo non dinamico si ritiene ancora capace di risultati accettabili.

Oggi i moderni sistemi di calcolo nelle comuni disponibilità dei professionisti permetterebbero di ottenere analisi più approssimate e soprattutto complete. La pratica invece si ostina ad impiegare sistemi non adeguati e con lacune ormai evidenziate da lavori di ricerca da anni. In altri campi dell'ingegneria civile, come l'ingegneria antisismica, si sono già imposti metodi di calcolo dinamico delle strutture e si stanno adesso aprendo strada metodi analitici dinamico non lineari. Sono ancora relegati all'ambito accademico, invece, i software di calcolo termico dinamico. Efficienti e affidabili soffrono solo di essere naturalmente più complessi per la stessa maggiore complessità dei problemi analizzati e non già per una loro maggiore complessità intrinseca.

In questo lavoro si troveranno indicazioni ed esempi su come poter sfruttare il software TRNsys (tra i più affermati e diffusi nel campo) per affrontare con successo alcuni problemi attualmente di grande interesse in campo impiantistico e più in generale della fisica tecnica ambientale. In questo lavoro si riporta la formulazione matematica in transitorio dei più comuni componenti di impianti da fonti rinnovabili e viene proposto un metodo di approccio progettuale incentrato sulla verifica termico dinamico delle strutture in caso di complesse riqualificazione energetiche. Il tutto troverà concretizzazione offrendo un valido contributo ad un lavoro di ricerca avviato dall'Università Sapienza per un edificio di notevole dimensioni e valore storico come l'edificio della direzione centrale dell'AAMS situato in Piazza Mastai a Roma.

Si procederà infine, ad un'analisi dei consumi energetici per l'illuminazione degli ambienti dell'Edificio in esame che contribuiscono in maniera significativa alle prestazioni energetiche globali dello stesso.

2. PROBLEMA ENERGETICO E SVILUPPO TECNICO

INDICE CAPITOLO

2.1	DOMANDA ENERGETICA E SUOI SVILUPPI.....	3
2.1.1	I PREZZI DELLE FONTI ENERGETICHE.....	7
2.2	LA SITUAZIONE EUROPEA.....	7
2.3	LA SITUAZIONE ITALIANA.....	8
2.3.1	MACRO INTERVENTI AUSPICABILI.....	12
2.4	IL TREND CLIMATICO.....	13

Da alcuni anni a questa parte si sente sempre più parlare in ambito politico-economico della necessità di intraprendere adeguate e organiche politiche energetiche. Già apprezzabile, il problema energetico sarà in futuro sempre più evidente sotto forma di inquinamento e di sostenibilità globale. Il mondo scientifico è chiamato a dare valide risposte per poter raggiungere gli obiettivi fissati dalla classe dirigente dei paesi maggiormente coinvolti. E' proprio la percezione del problema energetico la molla di tutti gli sforzi che negli ultimi anni stanno vedendo una trasformazioni del panorama economico-scientifico globale verso la ricerca di nuove fonti energetiche, poco inquinanti e auspicabilmente rinnovabili. Si susseguono sempre più numerosi gli studi in ambito energetico per inquadrare il problema in maniera organica affrontandolo da diversi punti di vista senza rinunciare però, alla ricerca di soluzioni tecnico-pratiche applicabili su diversa scala. Risparmio energetico, efficienza energetica e sostenibilità ambientale sono diventate problematiche comuni a molti ambiti: punti di partenza teorici per affrontare in modo coscienzioso lo sviluppo socio-economico del nuovo millennio.

La ricerca, come è giusto che sia, parte dall'osservazione statistica della situazione attuale per delineare un possibile scenario energetico globale. Gli studi in tal senso si susseguono con regolarità rendendo disponibili dati certi e affidabili. Tra i più autorevoli nell'inquadrare la situazione internazionale si è scelto di riferirsi al World Energy Outlook redatto dalla Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) [6]. Questo testo è una voluminosa raccolta di dati, grafici e tabelle con cadenza annuale, frutto degli studi di quasi 100 esperti. Le analisi riportate a corredo dei dati si avvalgono di una profonda conoscenza del mondo energetico e degli innumerevoli fattori politici, economici e fisici che ne condizionano l'evoluzione. Vengono proposte due proiezioni future del comparto:

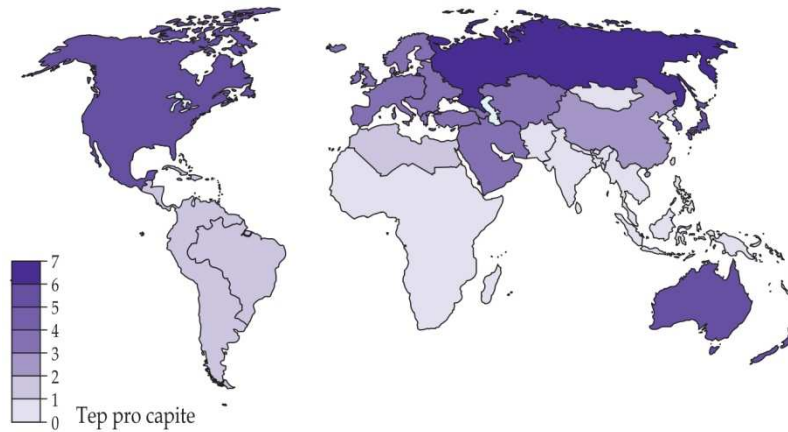


Figura 1 - Distribuzione geografica della domanda energetica procapite nel 2030.

una ragionevolmente prevedibile e una auspicabilmente prevedibili con indicate le adeguate scelte in base di portare a questa virtuosa evoluzione.

Per meglio dettagliare la situazione italiana, si è fatto riferimento ai lavori pubblicati dall'ENEA¹ e in modo specifico per le fonti rinnovabili ai dati del GSE (Gestore dei servizi energetici)².

2.1 DOMANDA ENERGETICA E SUOI SVILUPPI.

La crisi economica, iniziata nella seconda metà del 2008, sta determinando un forte rallentamento dell'economia mondiale e una difficile fase per le economie occidentali. Si prevede che questa situazione si prolunghi almeno per parte del 2011 con esiti finali tuttora incerti. Ciò è avvenuto nonostante gli interventi isolati o coordinati di molti paesi finalizzati a sostenere la domanda e la stabilità finanziaria.

I dati e le previsioni del Fondo Monetario Internazionale evidenziano tuttavia la diversa dinamica che potrebbe interessare le principali aree geopolitiche. Infatti, nonostante la crisi, i paesi emergenti e quelli in via di sviluppo mostrano tassi di crescita ancora sostenuti rispetto alla diffusa recessione dei paesi più avanzati, testimoniando come anche l'andamento della domanda di energia si lega a molti fattori tra cui la maturità economica di un paese.

¹ <http://www.enea.it> (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile), autorità nel settore della ricerca energetica, che ormai da anni pubblica studi e dati affidabili per accedere a studi e dati aggiornati.

² <http://www.gse.it> - La società costituita nel 1999 a seguito del decreto che determina la liberalizzazione del settore dell'energia elettrica in Italia oggi si concentra sulla promozione ed incentivazione della produzione di elettricità da fonti rinnovabili.

I paesi in via di sviluppo sono inclini a vedere, anche se con un inevitabile rallentamento economico, una continua crescita della domanda di energia come ormai da anni (+3,7% all'anno nel periodo 1995-2008) si registra per India e Cina (circa 5% e 6,5% all'anno nel periodo 1995-2008). Per i paesi OCSE, economicamente più maturi e con una crescita della domanda di energia storicamente più contenuta (1% in media annua tra il 1995 e il 2008), la crisi prefigura invece una flessione netta della domanda. Questo andamento porterà per il 2030 in base alle previsioni una distribuzione geografica della domanda energetica pro-capite sostanzialmente diversa da quella attuale, con una crescita globale un aumento degli stati consumatori come si legge dalla figura 1.

L'analisi delle fonti prodotte è invece riportata in Figura 2 ove si nota che nonostante la fase di forte rallentamento generale, tra le fonti energetiche tradizionali il carbone conferma una maggiore crescita percentuale, trainata in particolare da Cina e India dove viene largamente impiegato nella generazione elettrica a scapito di un maggiore inquinamento prodotto.

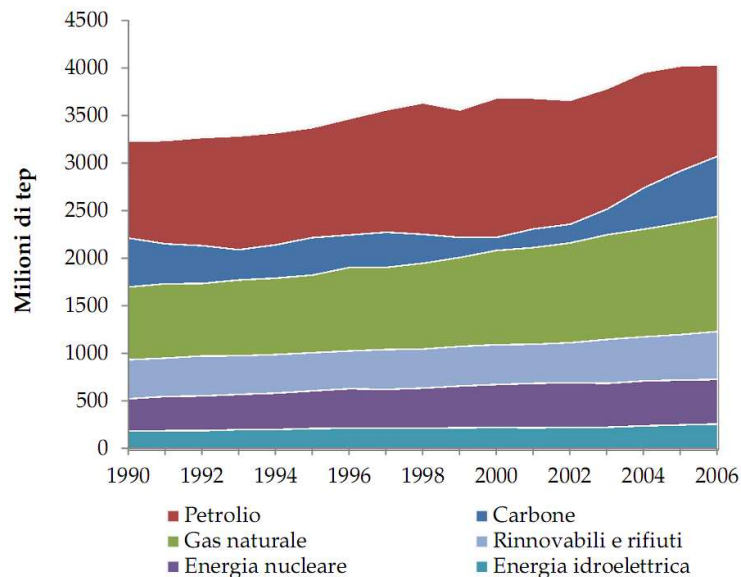


Figura 2 - Andamento produzione energetica mondiale per fonti

L'incremento della domanda di carbone in Cina rappresenta circa l'80% della crescita nel periodo 1995-2008 e quasi il 40% dell'incremento della domanda mondiale di energia nello stesso periodo.

Nei paesi OCSE si conferma, invece, al primo posto come fonte energetica il petrolio, ormai destinato per la quasi totalità ai trasporti, mentre la fonte in maggior crescita nel periodo 1995-2008 risulta essere il gas naturale sempre più utilizzato per produrre energia elettrica. Naturalmente, il tasso di crescita delle fonti energetiche tradizionali, che soddisfano ancora buona parte della domanda mondiale di energia, appare comunque modesto se confrontato con i tassi di crescita a due cifre registrati nell'ultimo decennio in molti paesi OCSE per

alcune fonti rinnovabili, quali l'energia eolica e l'energia solare fotovoltaica. Tuttavia nonostante la crescita queste fonti soddisfano una parte ancora molto ridotta del fabbisogno.

A ciò si aggiunge che tutti i paesi grandi consumatori di energia (comprese Cina e India) continuano ad aumentare le loro importazioni di combustibili da un sempre più ristretto gruppo di paesi produttori, alcuni dei quali politicamente instabili. Conseguentemente è probabile che i mercati del petrolio diventino sempre meno flessibili, con prezzi più instabili. Inoltre, il settore energetico continua a presentare una crescita di emissioni di CO₂ (Figura 3), con possibili influenze sul clima globale.

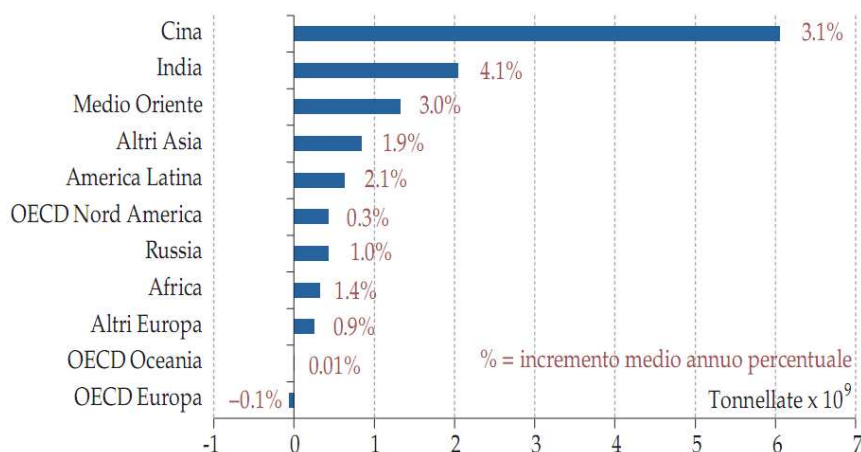


Figura 3 - Incrementi delle emissioni di CO₂ nel periodo 2006-2030 per stato e per regione.

SCENARIO PREVISTO. Le ipotesi di base ricavate dalle analisi svolte prevedono una crescita economica globale del 3,2 % per anno, cioè leggermente inferiore a quella dei tre precedenti decenni. La popolazione mondiale è prevista crescere dai 6,2 miliardi del 2002 ad oltre 8 nel 2030, con un dato medio di crescita dell'1% per anno e in diminuzione verso la fine del periodo, soprattutto per il calo di fertilità nei paesi in via di sviluppo che ospiteranno, al 2030, l'80% della popolazione mondiale (oggi è il 76 %). Il prezzo del petrolio è previsto ricadere dalle vette attuali a 22 \$ nel 2006, rimanere costante fino al 2010 e quindi ricominciare a salire fino a 29 \$ nel 2030. La domanda mondiale di energia primaria nello scenario di riferimento cresce di quasi il 60 %. L'intensità energetica primaria è prevista diminuire mentre l'aumento previsto delle forniture energetiche (2003-2030) richiederà investimenti per circa 16.000 miliardi di dollari vale a dire 568 miliardi all'anno, per la maggior parte nel settore elettrico (62% del totale). Più della metà di quest'ultimo investimento andrà nelle reti di trasmissione e distribuzione. Nello scenario di riferimento, le emissioni di CO₂ legate agli impieghi energetici cresceranno in media dell'1,7 % all'anno, raggiungendo i 38 miliardi di tonnellate nel 2030, con un aumento di

15 miliardi (62 %) rispetto al 2002. Più di 2/3 di questo aumento viene da paesi in via di sviluppo. Nel 2010 queste emissioni supereranno del 39 % quelle del 1990.

SCENARIO ALTERNATIVO PREVISTO. Scenario diverso si avrebbe se si seguissero a livello globale le indicazioni fornite dall'IEA nel suo scenario alternativo tra cui le principali: l'innalzamento dell'efficienza nelle conversioni energetiche e negli usi finali, e il ricorso alle energie rinnovabili. Un aumentato ricorso al nucleare è limitato alle centrali di cui è già stata decisa la costruzione, mentre non è stata considerata la possibilità dell'impiego di nuove centrali nucleari con tecnologie avanzate ed anche la cattura e l'immagazzinamento della CO₂ prodotta. Lo scenario alternativo così ottenuto mostra, rispetto allo scenario di riferimento, una riduzione della domanda globale di energia primaria al 2030 del 10%. A quella data, la domanda di petrolio si contrae per 12,8 mb/d . Contribuiscono a questa riduzione misure di contenimento nei paesi OECD e una più rapida adozione di veicoli più efficienti nei paesi non OECD. Come risultato, diminuisce la dipendenza da importazioni di petrolio nei paesi OECD e in Cina. Ancora più forte è la diminuzione della domanda di carbone, che nel 2030 cala di un quarto. Il gas naturale cala del 10%. Le emissioni di anidride carbonica sarebbero ridotte di 6 x 10⁹ tonnellate, vale a dire del 16%. Quasi il 60% della riduzione cumulativa delle emissioni avrebbe luogo in paesi non OECD. Il 60% di questi risparmi sarebbero dovuti ad una maggiore efficienza energetica in una vasta gamma di applicazioni che comprende i veicoli, gli elettrodomestici, l'illuminazione e gli impieghi industriali . Rinnovabili e nucleare ricoprono quasi tutto il resto. I prezzi dell'elettricità salirebbero (nell'Unione Europea di un 12%). Più incerta è la capacità di investimento nei paesi in via di sviluppo soprattutto da parte degli utenti finali che dovrebbero investire di più rispetto ai locali fornitori di energia.

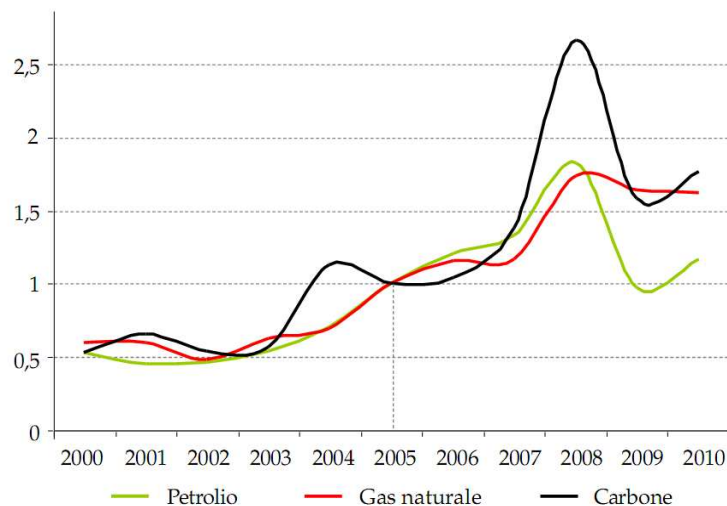


Figura 4 - Andamento prezzi principali fonti fossili nel decennio 2000-2010 in rapporto alle quotazioni del 2005

2.1.1 I PREZZI DELLE FONTI ENERGETICHE.

Il prezzo del petrolio nel luglio 2008 ha raggiunto il valore di 147\$ per barile, superando il picco raggiunto nell'aprile 1980 (pari a circa 102\$ per barile in valuta attuale). Il prezzo è successivamente calato sotto i 40 \$ /barile nel dicembre 2008 a causa della crisi finanziaria, per poi ricominciare a salire. Le cause principali del rialzo dei prezzi petroliferi sono sistemiche e, a parte i momentanei effetti della crisi economica mondiale che ha ridotto la domanda, sono identificabili nei seguenti fattori:

- forte crescita della domanda con aspettative di ulteriore crescita di beni di consumo energivori specialmente da parte delle economie emergenti dell'Asia e negli stessi paesi produttori di petrolio;
- riduzione capacità produttiva nei paesi OPEC;
- crescente potere di mercato dei paesi OPEC presso cui si concentra l'offerta;
- mancato adeguamento della capacità di raffinazione nei paesi OCSE e in Asia.

La forte domanda appare tuttavia il fattore più influente, come evidenziato dal brusco ripiego dei prezzi in corrispondenza delle aspettative di recessione legate alla crisi economica in atto. Uno dei problemi principali è l'accessibilità alle riserve a basso costo di estrazione, ormai in larga parte nazionalizzate e concentrate nei paesi OPEC. Il basso corso dei prezzi potrebbe indurre strategie di attesa nell'adeguamento della capacità produttiva sia da parte degli operatori occidentali che in quelli dei paesi OPEC.

I prezzi delle altre fonti fossili hanno seguito quelli del petrolio essendo ad esempio il gas naturale indicizzato a quello del petrolio in molti contratti. Anche il prezzo del carbone ha seguito in generale quello del petrolio, con rialzi in termini relativi anche più pronunciati, pur partendo da valori assoluti inferiori, e con un certo ritardo nella fase di discesa. In particolare in Europa, i prezzi del carbone risentono anche in qualche misura delle vicende del mercato delle emissioni e del prossimo esaurirsi delle scorte interne. In [Figura 4](#) è diagrammato l'andamento dei prezzi delle principali fonti fossili nel decennio 2000-2010 in rapporto alle quotazioni del 2005. Evidente è l'instabilità del mercato e la continua crescita dei prezzi che da dati non ancora ufficiali negli ultimissimi periodi (dicembre 2010) hanno fatto segnare nuovi record storici.

2.2 LA SITUAZIONE EUROPEA

La situazione europea è abbastanza differente da quella mondiale e presenta delle sue peculiarità caratteristiche come la scarsa autosufficienza energetica e la più sviluppata sensibilità ambientale. Queste due peculiarità hanno portato ad un anticipato intervento degli stati europei con adeguate politiche energetiche che, specialmente in questi anni hanno visto un forte crescita percentuale delle

rinnovabili e un sempre maggiore progetto di diversificazione nell'approvvigionamento dalle varie fonti energetiche. Partendo dall'analisi dei dati si fa riferimento alla **Figura 5** ove vengono riportati l'andamento dei consumi energetici europei per fonte. Come si nota oltre ad una costante crescita della domanda energetica si è registrato un netto calo dell'energia prodotta da carbone e un progressivo incremento dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.

In **Figura 6** si nota invece come ancora più del 60% dell'energia sia prodotta da petrolio e gas naturale con il carbone in forte calo con circa un dimezzamento in 15 anni e una discreta quota da nucleare (circa 10%).

Valutazioni ulteriori di dettaglio si hanno dalla **Figura 7** dove viene diviso percentualmente il consumo energetico europeo per settore. L'agricoltura ha consumi marginali, il grosso è assorbito da industria, residenziale e trasporti.

2.3 LA SITUAZIONE ITALIANA.

La situazione italiana presenta, in modo molto più accentuato, tutte le problematiche che abbiamo preso in considerazione nell'esaminare lo scenario energetico mondiale ed europeo: siamo tra gli ultimi posti nella scala dell'autosufficienza energetica tra gli stati membri che hanno una popolazione superiore ai 15 milioni di abitanti e all'ultimo posto nella scala di dipendenza dagli idrocarburi. L'Italia importa l'85 % del suo fabbisogno energetico contro il 50 % circa della media dell'Unione. Il confronto non può essere nemmeno fatto con il Regno Unito che addirittura è esportatore netto di energia e ha un buon mix energetico, ma nemmeno con quella della Germania che ha ancora una buona produzione di carbone e di energia elettrica con il nucleare, ne con la Francia che ha realizzato completamente il suo piano nucleare che le consente, con riferimento all'energia elettrica, anche una capacità di esportazione verso gli Stati confinanti tra cui l'Italia stessa.

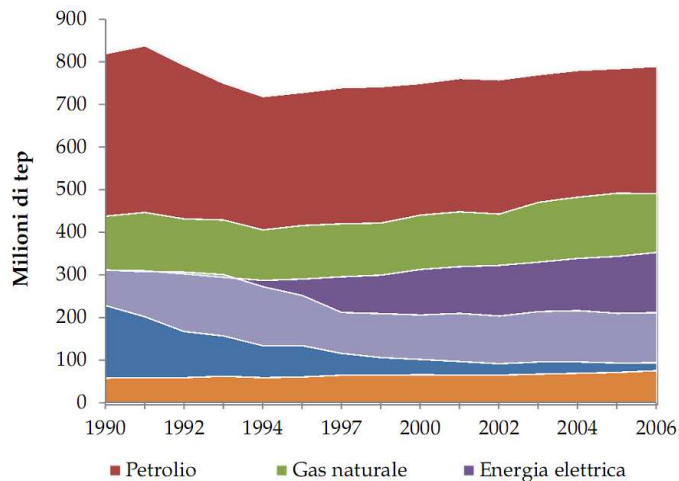


Figura 5 - Andamento consumi energetici europei per fonte.

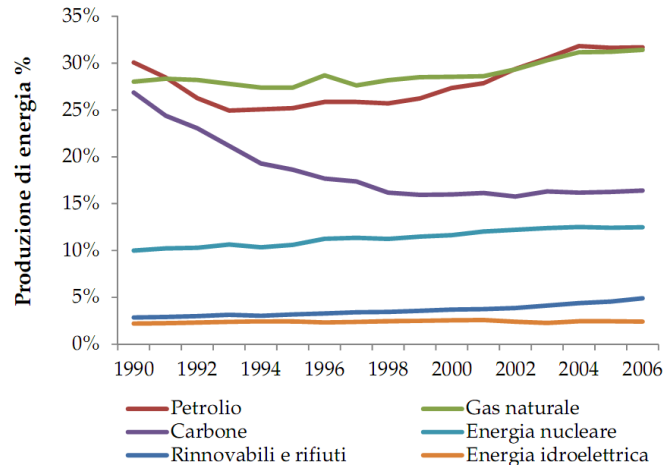


Figura 6 - Andamento produzione energetica europea percentuale per fonte

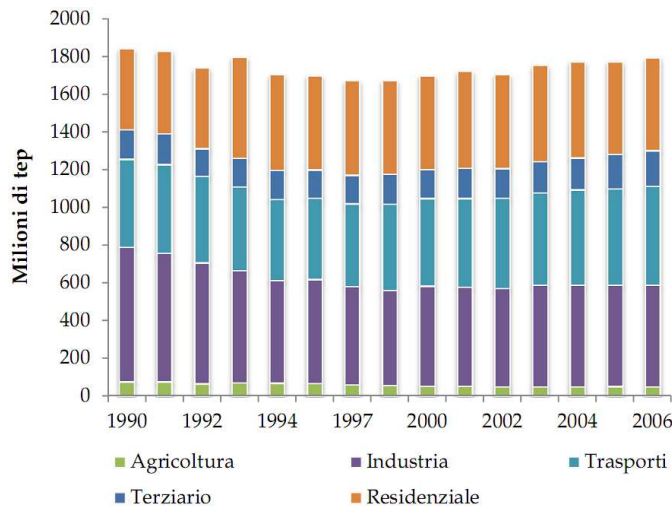


Figura 7 - Andamento consumo energetico europeo per settore.

Quanto alla dipendenza energetica dalle importazioni la nostra situazione si avvicina a quella della Spagna, che però è decisamente migliore quanto a mix energetico, perché produce 14 milioni di Tep con l'elettronucleare; la Polonia gode di una situazione migliore della nostra grazie a una produzione rilevante di carbone, per non parlare del divario esistente tra la nostra situazione e quella dei Paesi Bassi che sono esportatori di gas naturale e hanno anche una presenza nel nucleare. La dipendenza può essere quantizzata tramite determinati indici riportati in [Tabella 1](#)³.

³ La dipendenza energetica è espressa in percentuale dal rapporto Importazioni nette/Disponibilità al netto delle scorte e per l'energia elettrica primaria Importazioni nette/(Disponibilità + Trasformazioni in energia elettrica).Fonte dati: Ministero Attività Produttive

	1990	1995	2000	2003	2005	2007
Combustibili solidi	91,6	90,7	88,1	82,2	82,1	78,5
Gas	64,4	63,4	77,5	81,8	85,8	88,4
Petrolio	95,1	94,5	95,1	93,9	92,9	92,9
Energia elett. primaria	14,1	13,9	14,8	16,5	16,1	15,2
Totale	82,8	80,9	83,7	84,5	85,1	85,5

Tabella 1 - Dipendenza energetica italiana in percentuale per fonti.

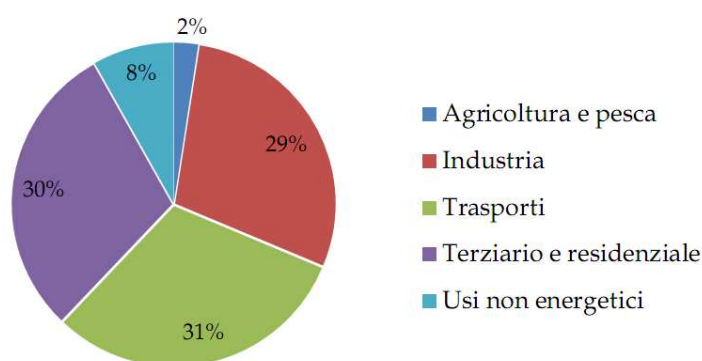


Figura 8 - Media consumo energetico italiano percentuale per settore negli anni 1990-2007

Una caratteristica negativa della situazione energetica italiana è il fortemente squilibrato nel mix energetico, poiché sin dagli anni '70 ha scelto di privilegiare l'utilizzo degli idrocarburi che già nel 2004 rappresentavano circa il 78% dell'intero consumo energetico nazionale. La prima negativa conseguenza di ciò si fa sentire quando si è in presenza di una crescita eclatante delle quotazioni internazionali del petrolio che si ripercuote con impatto pesante sulla nostra bolletta energetica. Gli effetti negativi potrebbero essere devastanti per l'Italia se si dovesse fronteggiare una situazione anche momentanea di crisi energetica con taglio o sospensione di alcune forniture di petrolio o di gas naturale come successo poco fa con le forniture di gas dalla Russia.

Di fronte a questo scenario - essendoci privati dell'elettronucleare e non volendo ricorrere al "carbone pulito" per produrre energia elettrica e migliorare il mix energetico è difficile trarre una valutazione rassicurante. Per fronteggiare questa situazione i rimedi cui dovrebbe far ricorso la politica energetica italiana sono quelli indicati dall'Unione Europea⁴ con l'avvertenza che questi rimedi dovrebbero essere messi in atto dall'Italia completamente e rapidamente come stabilito nei patti intercorsi a livello continentale.

⁴ A tal proposito si fa riferimento ai seguenti documenti redatti in ambito europeo: Libro Verde - *Verso una strategia europea di sicurezza dell'approvvigionamento energetico* e dell'ulteriore Libro Verde - *Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura*.

In primis, andrebbero seguite tutte le misure indicate dall'Unione Europea in termini di efficienza e di risparmio, puntando con determinazione sul risparmio energetico negli edifici e nel settore trasporti che come si nota dal diagramma di [Figura 8](#) incidono sui consumi medi dal 1990 al 2007 circa per il 30% (settore residenziale e terziario) e il 31% (settore dei trasporti). In particolare il primo, di massimo interesse per i tecnici operanti in edilizia ha grande margini di miglioramento dal punto di vista energetico. Il grafico di [Figura 9](#) dimostra come stia evolvendo la dotazione impiantistica degli edifici e cosa si possa ancora fare sul piano politico per promuovere un miglioramento della situazione attuale. Negli ultimi 15 anni, infatti, si registra uno spostamento dell'impiantistica verso sistemi a minor impatto ambientale con una progressiva riduzione dell'energia prodotta da gasolio verso un sempre maggiore utilizzo di gas ed energia elettrica con un interessante crescita del rinnovabile. La [Figura 10](#), scende ulteriormente nel dettaglio, evidenziando le maggiori differenze presenti tra il settore residenziale e quello terziario. Quest'ultimo con una minore diversificazione sfrutta per circa il 95% gas ed elettricità con una ormai relegazione a quota assolutamente minoritaria del gasolio (localmente molto più inquinante). Il residenziale ha un sistema più diversificato anche se anch'esso ormai orientato all'utilizzo del gas naturale per ben il 57%.

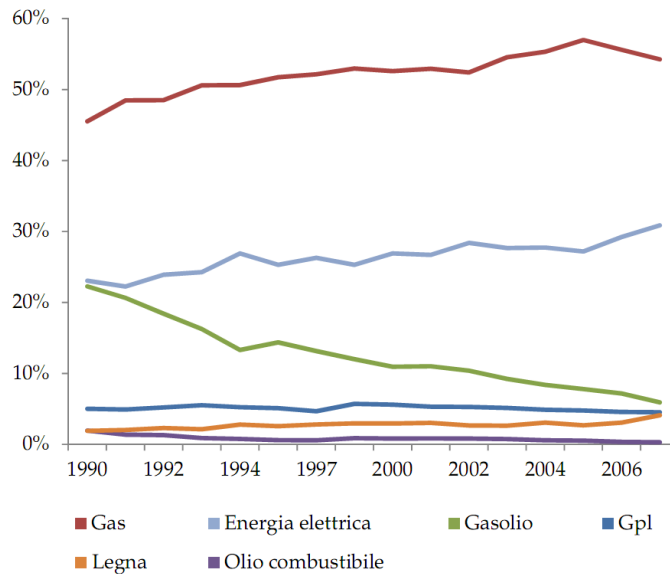


Figura 9 - Andamento consumo energetico italiano residenziale e terziario percentuale per fonte.

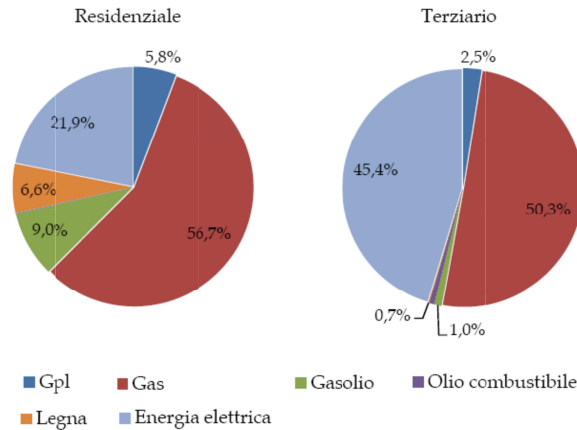


Figura 10 - Consumo energetico percentuale italiano per il settore residenziale e terziario nel 2007

2.3.1 MACRO INTERVENTI AUSPICABILI

Molti sarebbero i sistemi da attuare per aumentare l'efficienza energetica di questi settori imponendo, ad esempio, regole per le nuove costruzioni, l'adeguamento con incentivi per le vecchie, incentivando l'uso di elettrodomestici e illuminazione a basso consumo, agendo sul settore dei trasporti con l'eliminare le strozzature nelle strade ad intenso traffico e nelle autostrade, col rilanciare la ferrovia e in particolare l'alta velocità, col promuovere nelle città l'uso di auto più efficienti, meno inquinanti e privilegiando anche i "trasporti collettivi", col dare un forte impulso al trasporto marittimo "roll-on roll-off", particolarmente indicato per la conformazione geografica, peninsulare ed insulare, del nostro Paese, col ricorrere ai biocarburanti e ai carburanti sintetici di alta qualità e prestazioni, per la cui produzione già nel nostro Paese sono in atto iniziative di avanzata tecnologia in fase di sviluppo. Inoltre vanno rinforzati in un quadro organico gli interventi tesi a sviluppare, con adeguati incentivi, le energie rinnovabili puntando sull'eolico, sui termovalorizzatori, sul solare, sulla biomassa, sulla minidraulica.

In sostanza, la politica energetica italiana dovrà orientare la domanda per modificare i comportamenti degli utenti, sensibilizzandoli e responsabilizzandoli nelle scelte, finalizzate ad un minor consumo con effetti positivi sulla tutela dell'ambiente.

Diventa essenziale per l'Italia per ovviare alla sua forte dipendenza energetica che l'Unione abbia una vera politica energetica comune, poiché la sicurezza dell'approvvigionamento non solo del nostro Paese, ma dell'Unione, non può essere lasciata al semplice coordinamento delle politiche energetiche degli Stati membri e la nostra azione sarà tanto più efficace nei confronti dei Paesi dai quali importiamo energia, quanto più riusciremo a parlare come Unione Europea, con una sola voce. Altro punto di forza rimane la ricerca in campo energetico, unica reale salvezza a lungo termine capace, se sostenuta in modo

serio, di ribaltare la nostra difficile situazione magari rendendoci protagonisti di attività industriali che possano portare ricchezza al nostro paese rendendolo esportatore in campo energetico ma non di materie prime ma di tecnologie e know how energetico

2.4 IL TREND CLIMATICO

Il problema energetico non vive isolato ma direttamente genera ripercussioni notevoli sull'ambiente tra cui la più evidente e conosciuta è sicuramente la variazione del clima. Studi di settore monitorano periodicamente la concentrazione di CO₂ in atmosfera, la temperatura media superficiale globale, il livello del mare, la temperatura globale degli oceani, l'estensione del ghiaccio nel mare artico, l'acidificazione degli oceani, la frequenza e intensità degli eventi climatici estremi. In presenza di una mancata riduzione delle emissioni, molte di queste tendenze climatiche sono probabilmente destinate ad accelerare, portando a un crescente rischio di improvvisi o irreversibili cambiamenti climatici. A rendere più preoccupante il bilancio sono recenti osservazioni che indicano la vulnerabilità della società anche a variazioni modeste di alcuni parametri climatici e che gli ecosistemi e la biodiversità nei paesi più poveri sono esposti a rischi maggiori. Aumenti di temperatura significativamente superiori ai 2°C, potrebbero causare gravi disagi sociali e ambientali fin oltre la fine del secolo. Al fine di ridurre il rischio, è necessario mettere in atto interventi rapidi ed efficaci per la mitigazione delle emissioni coordinati a livello mondiale e regionale.

Inesorabilmente da anni si registra un' incremento generale delle temperature troppo repentino per essere legato solo a cicliche fluttuazioni naturali.

3. IMPIANTI AD ENERGIE RINNOVABILI

INDICE CAPITOLO

3.1	TECNOLOGIE ENERGETICHE	14
3.1.1	ENERGIA EOLICA.....	15
3.1.2	ENERGIA DA BIOCOMBUSTIBILI	15
3.1.3	ENERGIA SOLARE.....	16
3.2	ANALISI DEL MERCATO.....	19
3.2.1	SVILUPPO DEL SOLARE TERMICO.....	19
3.2.2	SVILUPPO DEL FOTOVOLTAICO.....	21
3.2.3	SVILUPPO DEL SOLAR-COOLING.....	22
3.2.4	GRANDI POTENZIALITÀ DEL SOLARE IN ITALIA.....	23
3.3	LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DI EDIFICI PUBBLICI	
	24	

Come per il concetto di efficienza energetica così la trattazione delle tecnologie rinnovabili mal si presta a sintesi, comprendendo un ampio ventaglio di opportunità in continua evoluzione.

Negli scenari globali (ETP 2008) il potenziale contributo delle rinnovabili è valutato complessivamente intorno al 20% degli obiettivi di mitigazione previsti, di cui 4,4% eolico, 5,2% solare, 3,1% biomasse, 4,6% biocombustibili di seconda generazione, 2,1% idroelettrico e geotermico. Queste valutazioni, come le precedenti, tengono conto del tasso di penetrazione, dei costi attuali delle tecnologie e delle proiezioni di costo basate sui dati storici delle curve e non tengono conto di possibili accelerazioni dovute a nuove tecnologie applicabili agli odierni sistemi già in fase di sperimentazione come per il solare a concentrazione.

3.1 TECNOLOGIE ENERGETICHE

È chiaro tuttavia che il potenziale complessivo delle fonti rinnovabili può essere superiore a quello emergente da analisi tecnologiche e quantitative sia ad opera dei suddetti sviluppi, sia ad opera di politiche di incentivo, tendenze sociali e di mercato. Queste potrebbero favorire ad esempio una larga diffusione della generazione distribuita, non solo quella elettrica ad alta tecnologia, ma anche la generazione di calore a bassa temperatura e la generazione di biogas per usi domestici. Sul piano della ricerca e dell'industria l'interesse si concentra sulle opzioni con maggior potenziale come fotovoltaico, solare a concentrazione, biocombustibile ed eolico.

Come per il concetto di efficienza energetica così la trattazione delle tecnologie rinnovabili mal si presta a sintesi, comprendendo un ampio ventaglio di opportunità in continua evoluzione.

Negli scenari globali (ETP 2008) il potenziale contributo delle rinnovabili è valutato complessivamente intorno al 20% degli obiettivi di mitigazione previsti, di cui 4,4% eolico, 5,2% solare, 3,1% biomasse, 4,6% biocombustibili di seconda generazione, 2,1% idroelettrico e geotermico. Queste valutazioni, come le precedenti, tengono conto del tasso di penetrazione, dei costi attuali delle tecnologie e delle proiezioni di costo basate sui dati storici delle curve e non tengono conto di possibili accelerazioni dovute a nuove tecnologie applicabili agli odierni sistemi già in fase di sperimentazione come per il solare a concentrazione.

3.1.1 ENERGIA EOLICA

Il potenziale dell'eolico, tecnologia matura, competitiva, con crescita annua a due cifre, è ormai sufficientemente noto. La produzione annua nel 2007 rappresentava ancora una piccola frazione della produzione elettrica globale, ma l'obiettivo raggiungere nel lungo termine è una quota dell'ordine del 12-15%. La ricerca è ormai prevalentemente di tipo industriale, volta al miglioramento delle tecnologie, dei materiali (soprattutto off-shore), al contenimento dei costi (ridotti di circa 4 volte in circa 20 anni). Per livelli di impiego significativi, la variabilità della sorgente deve essere compensata da reti intelligenti e/o sistemi di energy storage. I costi di abbattimento si collocano tra 10 e i 20 /tCO₂.

3.1.2 ENERGIA DA BIOCOMBUSTIBILI

I biocombustibili rappresentano un'area di grande potenzialità, ma anche di significativa incertezza. Le proiezioni indicano che nel lungo termine il 26% della domanda globale di combustibili da trasporto potrebbe essere soddisfatta da biocombustibili utilizzando il 4% delle terre arabili. In anni recenti, la grande enfasi sui biocombustibili di prima generazione (tipicamente bioetanolo da colture zuccherino-amidacee e biodiesel da piante oleaginose) si è presto esaurita nella seconda metà del 2007 con un crollo degli investimenti a livello mondiale determinato in parte dal forte rialzo dei prezzi agricoli e in parte dai problemi legati all'uso dei terreni agricoli e alla competizione con la produzione alimentare.



Figura 11 - Esempio di sistema fotovoltaico a concentrazione

Autorevoli organizzazioni internazionali hanno espresso forti perplessità circa la sostenibilità di tali produzioni di biofuels anche sul piano della effettiva riduzione delle emissioni.

L'attenzione si è quindi rapidamente spostata sui biocombustibili di seconda generazione: bioetanolo da processi di idrolisi e fermentazione di materiali ligneo-cellulosici (residui agroindustriali e forestali, coltivazioni dedicate non-food, rifiuti urbani) o biodiesel da processi Fischer-Tropsch (biomass to liquid, BTL) e colture microalgali per la produzione sia di bioetanolo che di biodiesel (queste ultime indicate come tecnologie di terza generazione).

Tali soluzioni non sono in competizione con la produzione agricola alimentare anche se possono comportare occupazione di territorio. Mentre la ricerca affina i processi, diversi impianti dimostrativi sono già in esercizio o in fase di realizzazione con soglie di competitività con i prezzi petroliferi che si collocano tra 60 e 100 \$ per barile e costi di abbattimento nella fascia 10-20 /tCO₂. La crisi economica e il ribasso dei prezzi petroliferi hanno prodotto un rallentamento delle realizzazioni dimostrative industriali che stanno riprendendo con il nuovo aumento dei prezzi del greggio.

3.1.3 ENERGIA SOLARE

Nelle tecnologie solari risiede il maggiore potenziale di espansione della produzione energetica mondiale. Sotto ipotesi prudenti (dettate dalle dinamiche di sviluppo delle 32 tecnologie solari nei due decenni trascorsi e prescindendo da particolari accelerazioni del mercato) le proiezioni ETP indicano un potenziale di produzione pari all'11% della domanda elettrica globale ripartito equamente tra fotovoltaico e solare termico a concentrazione.

Solare termico a concentrazione.

Il solare termico a concentrazione (CPS) è stato oggetto di una riscoperta nel decennio in corso ed è considerato oggi più competitivo del fotovoltaico per applicazioni in aree con grande insolazione e radiazione media. Esso si colloca in una fase di decollo industriale con alcuni grandi impianti dimostrativi in esercizio e molti altri in fase di realizzazione. Gli impianti CPS utilizzano specchi per concentrare la radiazione solare e per produrre calore ad alta temperatura per l'elettrogenazione o per altre applicazioni (dissalazione dell'acqua). Per maggiori dettagli tecnici si veda il Punto 5.1.2 Qui di seguito si darà maggior peso a considerazioni generali e di tipo economico.

Per gli impianti a torre centrale l'uso di sistemi di accumulo termico consente fattori di utilizzazione dell'ordine di 5000 h/anno. I costi di investimento sono nella fascia 3000-3500 €/kW e i costi di generazione compresi tra 80 e 130 €/MWh.

Impianti con collettori parabolici lineari hanno capacità ottimale dell'impianto limitate non da fattori tecnologici ma deducibile da economie di scala e permette impianti anche da qualche centinaio di MWe. I costi di investimento sono intorno ai 3500 e 4000 €/kWe e i costi di generazione intorno ai 120-130 €/MWh, con notevoli prospettive di riduzione.

Gli impianti a dischi parabolici, infine, hanno potenze di circa 25 kWe limitate dal diametro massimo del disco (circa 10 m). Si tratta di dispositivi adatti alla generazione distribuita. I costi sono piuttosto elevati (> 3500 €/kWe) ma offrono prospettive di riduzione per produzioni in grande serie.

Negli ultimi 10 anni, ENEA ha introdotto consistenti innovazioni nella filiera Parabolic Trough utilizzando sali fusi sia come fluido di accumulo termico che come fluido termovettore. Ciò consente l'accumulo ad alta temperatura con elevato salto termico e permette di raggiungere, a latitudini dell'Europa meridionale, fattori di utilizzazione del 55%. La tecnologia ENEA consente di ridurre del 50% il volume e il costo del sistema di accumulo e abbatta i costi di generazione del 20%. Nelle regioni desertiche del Nord Africa, installazioni CPS potrebbero fornire elettricità da esportazione verso il Sud Europa (a costi competitivi con altre fonti rinnovabili pur tenendo conto dei costi di trasmissione) e opportunità di utilizzo di territori altrimenti non utilizzabili. In questa ottica si collocano iniziative come Desertec e come il Mediterranean Solar Plan.

Fotovoltaico.

Il fotovoltaico è oggi la tecnologia energetica in più rapida espansione.

La produzione industriale globale nel 2008 ha raggiunto circa 7 GW con un incremento dell'85% sul 2007. Il mercato è dominato da installazioni domestico-residenziali connesse in rete, con un 10% di impianti off-grids in aree remote. Occorre distinguere tra tecnologie correnti (silicio cristallino o wafer-based crystalline silicon), tecnologie a film sottile (thin-film, di cui alcune in fase di penetrazione commerciale ed altre ancora in fase precommerciale), fotovoltaico a concentrazione (in fase dimostrativa), e tecnologie innovative quali il fotovoltaico organico.

SILICIO CRISTALLINO. Oltre l'85% della capacità installata si basa sulla tecnologia del silicio cristallino. I costi di generazione attuali consentono, in regioni idonee, una marginale competitività con tecnologie per la produzione di picco in rete e per la produzione off-grids, non certo con tecnologie per la produzione di base. I costi di investimento variano tra 4000 e 7000 €/kW secondo il tipo di installazione, la taglia dell'impianto, le condizioni locali di mercato. Gli analisti indicano un declino rapido dei costi a 2000-4000 €/kW entro il 2015. Stime più ottimistiche indicano addirittura riduzioni fino a 1000 €/kW entro tale data. Le proiezioni suggeriscono costi di generazione di lungo termine di circa 50 €/MWh nelle aree più idonee a condizione di aumentare opportunamente l'efficienza e la durata dei film sottili e sviluppare celle di nuova generazione ad alta efficienza e basso costo. Trattandosi di tecnologia ad alto costo di investimento, la vita media (attualmente 25 anni), l'efficienza, la stabilità e l'affidabilità delle celle fotovoltaiche sono ugualmente importanti ai fini della competitività economica. La riduzione dei costi ottenuta in anni recenti per il silicio cristallino è anche dovuta al risparmio di energia (circa 50%) e materiali conseguito in processi di produzione che non richiedono più lavorazioni in ambienti classificati, pur mantenendo elevati standard di qualità (efficienze di modulo tra 15% e 19% da confrontarsi con valori tra 12% e 14% per produzioni più commerciali).

FILM SOTTILI. Le tecnologie dei film sottili rappresentano attualmente il 13% del mercato con potenziale di crescita fino a 30% entro il 2012. Le tecnologie di riferimento - pur con diverso grado di maturazione commerciale - sono: il silicio amorfo/microcristallino e il silicio-germanio con efficienze di cella comprese tra 9% e 12% che si traducono in efficienze dei moduli commerciali tra 6,5 e 8,5%; i semiconduttori policristallini tellurio-cadmio con efficienza di cella tra 10% e 16,5% e i film sottili (TFCIGSS) con efficienze di cella fino a 19,5%. A queste si aggiunge un numero elevato di altre varianti e soluzioni. A fronte di efficienze per il momento più basse, il film sottile offre riduzioni di costo associate al minor uso di materiali di pregio, a tecniche di produzione più idonee alla produzione di massa, a riduzione sensibili della temperatura nei processi di lavorazione, alla maggior tolleranza nei livelli di purezza. Di conseguenza, esso permette maggiore flessibilità e ritorni più rapidi degli investimenti.

FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE. Nei sistemi fotovoltaici a concentrazione, si accresce l'efficienza e si riduce la superficie dei moduli usando sistemi ottici (lenti e specchi) per concentrare la radiazione solare e sistemi a inseguimento per migliorare l'esposizione alla radiazione. Maggiore efficienza ed esposizione compensano il maggior costo dei dispositivi. Tra le migliori efficienze ottenute si registrano valori compresi tra il 27% e il 40%. I prodotti commerciali presenti sul mercato offrono efficienze tra 18% e 23%. In [Figura 11](#) si è riportato un esempio di sistema fotovoltaico a concentrazione con inseguimento solare.

3.2 ANALISI DEL MERCATO.

3.2.1 SVILUPPO DEL SOLARE TERMICO.

Con il termine impianto solare termico si intende un sistema in grado di trasformare l'energia irradiata dal Sole in energia termica, ossia calore che può essere utilizzato negli usi quotidiani, quali ad esempio il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria o il riscaldamento degli ambienti. Negli ultimi anni molti paesi europei hanno intensificato le loro attività nel settore della tecnologia solare introducendo normative ecologiche, programmi di sostegno ed altri incentivi per le energie rinnovabili in generale.

Il mercato europeo è attualmente dominato da solo 3 paesi, la Germania, l'Austria e la Grecia, nei quali solo nel 2003 è stato installato circa il 75% della superficie di collettori. La Spagna, la Francia e l'Italia sfruttano solo in minima parte il loro alto potenziale di radiazione solare; sono state tuttavia intraprese azioni di promozione e incominciano a vedersi sviluppi dinamici con tassi di sviluppo elevati. D'altra parte, i paesi più a Nord, come la Danimarca e la Svezia, che non dispongono di sole in eccedenza, mostrano che i sistemi solari funzionano anche in queste regioni. In questi paesi del Nord così come dell'Europa Centrale i sistemi solari sono spesso utilizzati non solo per la produzione domestica di acqua calda, ma anche per il riscaldamento invernale cosa che richiede tecnicamente una maggiore densità energetica.

Un importante applicazione senza accumulo stagionale sono i sistemi combinati per la produzione domestica di acqua calda sanitaria e riscaldamento, i quali per esempio in Germania rappresentano il 20% del mercato (taglia tipica dell'impianto: 10-15 mq superficie collettore con un accumulo inerziale di 500-1.500 l).

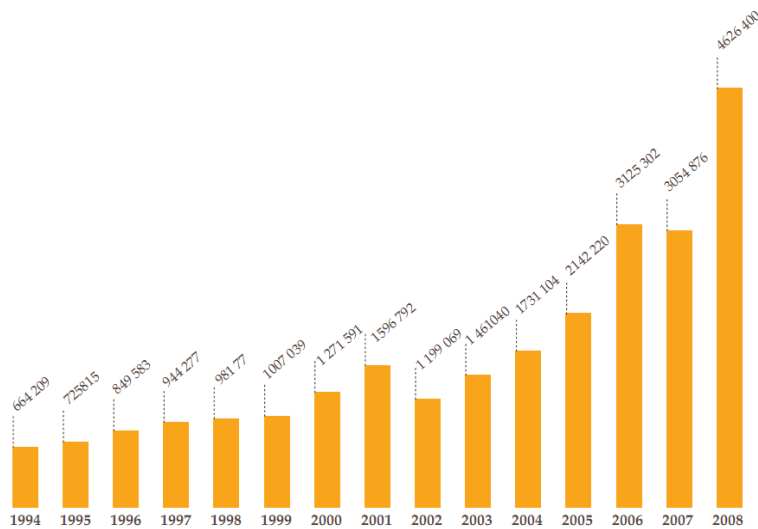


Figura 12- Evoluzione delle superfici installate annualmente nell'Unione Europea dal 1994 in m²

In Austria, a causa del grande numero di caldaie a legna esistenti utilizzate in combinazione con accumuli inerziali, la quota di sistemi combinati per la produzione di acqua calda sanitaria e integrazione riscaldamento rappresenta circa il 50% del mercato, con impianti con superfici esposte al sole molto ampie (fino a 20-30 mq).

Al contrario, nelle regioni mediterranee, le installazioni solari tipiche sono piccoli sistemi domestici a circolazione naturale per la produzione di acqua calda sanitaria. Nei paesi come la Grecia e Cipro, con una elevata percentuale di sistemi solari, il mercato è già parzialmente saturo e una parte importante del mercato è rappresentata dalle sostituzioni di sistemi in funzione da 15 anni.

In genere si può affermare che molti degli ostacoli iniziali che hanno caratterizzato gli inizi del solare termico alla fine degli anni '70 sono stati superati. In particolare, i costruttori sono diventati sempre più professionali e i prodotti sono tecnicamente maturati. Un grande risultato è stato la formulazione e l'adozione degli Standard Europei EN 12975, 12976 e (pre-standard) 12977, nel 2001 da una grande parte degli sti membri. Lo sviluppo della superficie collettore installata annualmente in Europa è mostrato in [Figura 12](#).

L'Italia è uno dei paesi europei con il maggiore potenziale per il solare termico, grazie alla grande disponibilità di energia solare e ai costi relativamente alti dell'energia convenzionale. Negli ultimi anni il mercato italiano del solare termico ha registrato uno dei tassi di crescita maggiori in Europa, partendo, comunque, da un livello molto basso rimasto stabile dai valori del boom dopo l'aumento del prezzo del petrolio negli anni '70. Il nuovo periodo di forte sviluppo a partire dalla metà degli anni '90 è basato molto probabilmente sul successo del solare termico in altri paesi europei che hanno mostrato la maturità tecnica del settore e hanno permesso un trasferimento di conoscenza. In Italia la crescente consapevolezza delle problematiche ambientali e del risparmio energetico sta dando un nuovo impulso al mercato del solare termico.

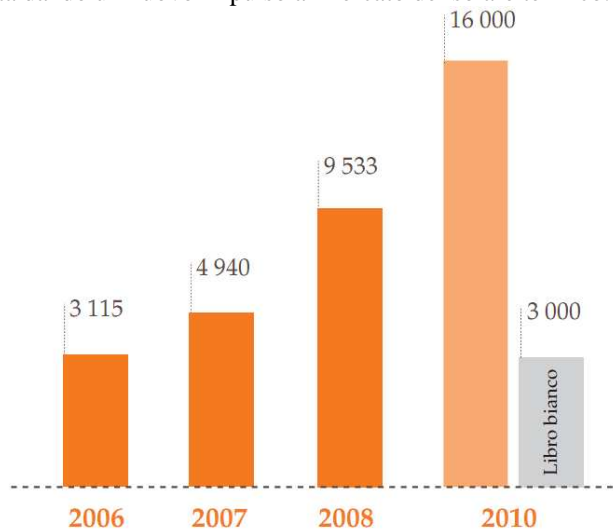


Figura 13 - Forte sviluppo del fotovoltaico in MWp.

Oggi nel nostro paese il 70% dei sistemi sono usati per la produzione domestica di acqua calda sanitaria, suddivisa fra circolazione naturale e circolazione forzata, il restante 30% è rappresentato da impianti a circolazione forzata per integrazione riscaldamento e dai grandi impianti per la produzione di acqua calda sanitaria nelle strutture ricettive (camping, hotel, piscine etc.), che rappresentano un mercato di nicchia ad altissimo potenziale.

3.2.2 SVILUPPO DEL FOTOVOLTAICO.

Un impianto solare fotovoltaico è un sistema in grado di trasformare l'energia irradiata dal sole in energia elettrica, ossia energia che può essere utilizzato negli usi quotidiani.

Nel 2005 nell'Unione Europea è stata installata una potenza di oltre 645 MWp pari a una crescita del 18% rispetto al mercato 2004. Per la prima volta, nel 2005, sono stati raggiunti i limiti di capacità produttiva dell'industria produttiva dei pannelli fotovoltaici a causa di persistente penuria di silicio. Complessivamente nel gennaio 2005 nell'UE risultavano installati oltre 1.793 MWp, valore corrispondente alla domanda elettrica di 600 mila famiglie con consumo medio di 3.000 kWh/anno.

Anche a livello mondiale lo sviluppo del settore è stato superiore al previsto, con una crescita record registrata nel 2004 (+57,4% rispetto all'anno precedente). Per il futuro le stime sono di un settore in piena crescita che deve ancora raggiungere la sua maturità e, in particolare nell'Unione Europea, grazie alla funzione di traino che continua a svolgere il mercato tedesco, oltre che grande installatore anche grande produttore di pannelli.

La fase di rapida espansione commerciale del fotovoltaico nei paesi occidentali è trainata dalla sensibile riduzione dei costi ma anche da significativi incentivi con cui i vari governi hanno dato impulso al mercato nell'ambito dei programmi di riduzione delle emissioni. Gli incentivi hanno reso la remunerazione degli investimenti garantita per un congruo numero di anni e la tecnologia competitiva con opzioni più tradizionali. A questo fattore si è unito naturalmente l'alto corso del petrolio e del gas fino alla prima metà del 2008 e continua ad unirsi un certo effetto di familiarità che la tecnologia registra presso l'utenza per applicazioni di autoproduzione e generazione distribuita. La possibilità di autoprodurre l'energia di cui si necessita con una tecnologia che non espone a rischi e complicazioni gestionali è un aspetto che esula dalle valutazioni economiche ma non dalle logiche di mercato e potrebbe costituire quel servizio aggiuntivo che potrebbe indurre l'utenza ad accettare anche costi di generazione superiori a quelli di altre tecnologie.

Per tali motivi tutti i principali osservatori stanno rivedendo al rialzo le previsioni di sviluppo a breve: al 2010 la potenza fotovoltaica installata nella UE è stimata tra 6 GWp e 7 GWp : cioè più del doppio degli obiettivi che per il 2010 l'Unione si era posta nel Libro Verde sull'Energia.

3.2.3 .. SVILUPPO DEL SOLAR-COOLING

Le prime significative applicazioni di climatizzazione elioassistita sono comparse in attività sperimentali concorrenti alla prima diffusione dei sistemi solari termici, negli anni '80. Ad oggi nel mondo sono presenti un numero stimabile tra i 150 ed i 200 impianti funzionanti, circa 100 in Europa. Dai dati prodotti dal gruppo di lavoro denominato Task 38 - Solar Air-Conditioning and Refrigeration⁵, che opera nell'ambito del Solar Heating and Cooling Programme dell'Agenzia Internazionale dell'energia (IEA), Germania e Spagna guidano la sperimentazione dei sistemi di solar cooling. Dai dati prodotti dal lavoro del Task 38, risulta che gli impianti sono applicati ad utenze molto diversificate ed hanno capacità frigorifere molto differenti tra loro. Una percentuale consistente è costituita da impianti pilota su cui sono state implementate attività di ricerca di sistema o prove su nuovi componenti. Complessivamente la potenza frigorifera installata è pari a circa 7700 kW_{fr}, e l'area della superficie captante dei collettori ammonta a circa 21.600 m².

Il rapporto tra superficie captante dei collettori e potenza frigorifera delle macchine refrigeranti è molto diverso tra gli impianti citati, e dipende dal tipo di applicazione, dalle utenze servite dall'impianto solare, dalle condizioni climatiche e dalle tecnologie di climatizzazione utilizzate. Una stima media per gli impianti ad as-adsorbimento è di circa 3 m²/kW_{fr} e di circa 10 m²per 1000 m³/h per le macchine DEC. La Germania, tra i paesi comunitari, è quello che presenta il maggior numero di esempi di applicazione, nonostante l'andamento della domanda energetica non sia fortemente influenzato dal fabbisogno di condizionamento estivo. Nei 36 impianti installati, sono state sperimentate le tre tecnologie che dominano il mercato e due applicazioni impiegano tecnologie sperimentali a raffreddamento evaporativo basate su adsorbente liquido. Anche la Spagna, con circa 31 impianti, mostra grande attenzione alla produzione di freddo elioassistita.

Le statistiche mostrano che in Italia, nonostante sia il primo mercato Europeo del condizionamento dell'aria, esistono solo pochi impianti installati di solar cooling (4 - 8 impianti di almeno media dimensione). Anche in Italia circa l'80% degli impianti usano macchine ad assorbimento (probabilmente per ragioni di costo) e un sistema usa un DEC. Le utenze sono per la maggior parte uffici e due servono utenze residenziali. Le capacità installate sono in tre casi intorno ai 100 kW e per il resto al di sotto dei 35 kW. Le installazioni sono state realizzate quasi totalmente nelle regioni del nord Italia: Trentino, Lombardia e Veneto. nonostante ciò ad oggi risulta che siano in realizzazione impianti anche al sud, ad esempio, in Puglia.

La tecnologia è da considerarsi per i numeri installati allo stadio precompetitivo di sviluppo; nonostante la maggior parte dei componenti dell'impianto (es. collettore solare, macchina frigorifera, accumuli, ecc.) siano spesso disponibili sul mercato, l'esperienza nell'assemblaggio degli stessi è ancora ridotta. Infatti è quasi impossibile ad oggi acquistare sistemi di solar cooling completi (tranne in rarissimi casi) da un unico soggetto e spesso i costi

⁵ <http://www.iea-shc.org/task38/index.html>

risultano, per l'utente, di gran lunga maggiori (anche di un ordine di grandezza) rispetto a tecnologie convenzionali. Ad oggi la maggiore richiesta di sviluppo di questi sistemi proviene dai produttori di tecnologie solari termiche che intravedono una grossa opportunità di aumentare il loro fatturato (un impianto di solar cooling ha in media una superficie captante pari a circa 3-4 volte quella di un impianto ACS). Quasi tutti i produttori di impianti solari termici che commercializzano sistemi nei paesi del sud Europa esprimono la necessità di avere tra i prodotti offerti sistemi di solar cooling. Il fatto che la maggior parte del mercato del solare termico Europeo (in Italia circa 90%) sia costituita da impianti di piccola capacità per utenze residenziali (mono-bifamiliari) fa sì che i produttori immaginino di creare un prodotto per la climatizzazione estiva delle stesse utenze. Questo richiede l'uso di macchine frigorifere, capaci di produrre acqua refrigerata di piccola taglia (dai 4 ai 10 kW_{fr}). Il potenziale maggiore, per l'applicazione dei sistemi di solar cooling è però nelle taglie di impianto maggiori. Impianti di climatizzazione estiva centralizzati per utenze come alberghi, ospedali o terziario in genere, mostrano un potenziale di applicazione più vasto del piccolo residenziale e già oggi tempi di ritorno dell'investimento decisamente migliori. Questo principalmente perché i costi specifici di investimento relativi alla generazione di energia frigorifera, per impianti sopra i 100 kW, si riducono significativamente.

I sistemi installati in Europa hanno ancora per la maggior parte carattere sperimentale e pochissimi soggetti (Solarnext in Germania, Solid in Austria) sono in grado di fornire un prodotto completo. Le attività in corso per lo sviluppo di questa tecnologia sono concentrate sulla ricerca a livello di sistema e sullo sviluppo di componenti: sviluppo strumenti per la progettazione di sistema di grandi e medie dimensioni, realizzazione di sistemi pre-ingegnerizzati (kit) per piccola utenza residenziale e del terziario; sistemi per applicazioni speciali (non solo climatizzazione estiva, es. processi industriali), sviluppo macchine di piccola capacità, sviluppo di nuovi sistemi che implementano cicli aperti (DEC).

Altra direzione verso cui vi è un grande sforzo è la ricerca per definire sempre più affidabili metodologie di calcolo. Tra i filoni di ricerca più promettenti vi è quello dell'impiego di metodi di calcolo in transitorio per il progetto e la verifica degli impianti da installare. Una maggiore affidabilità del calcolo di progetto permetterebbe sicuramente una più rapida evoluzione della tecnologia in campo commerciale.

3.2.4 GRANDI POTENZIALITÀ DEL SOLARE IN ITALIA.

L'Italia offre condizioni meteorologiche molto buone per l'uso dell'energia solare. Il valore di insolazione compreso tra 1200 e 1750 kWh/mq all'anno presenta una differenza tra nord e sud intorno al 40% rimanendo in entrambi i casi maggiore del fabbisogno pro-capite di calore necessario per la preparazione di acqua calda nel residenziale. A queste condizioni un impianto solare standard consente di risparmiare fino al 70% dell'energia necessaria per la preparazione di acqua calda e fino al 40% della domanda complessiva di calore

per l'acqua calda sanitaria e per il riscaldamento degli ambienti. Condizioni tanto favorevoli e la disponibilità di una tecnologia affidabile ed efficace conferiscono all'Italia un alto potenziale economico e tecnico nel campo del solare. Anche in termini ambientali l'uso dell'energia solare può dare un grande contributo per ridurre l'inquinamento e l'accumulo dei gas serra. Un metro quadro di collettore, producendo acqua calda per venti anni, fornisce circa 15000 kWh di energia. Per produrre la stessa quantità di energia occorre bruciare ad esempio 3000 mc di metano, emettendo circa 4500 kg di CO₂ in atmosfera.

Il meccanismo di incentivazione particolarmente generoso sta trainando in modo sostanzioso l'installazione di nuovi impianti oltre ogni previsione e evidenziando anche inattesi effetti negativi. Alcune analisi indicano, infatti, anche aspetti non del tutto positivi: i benefici degli investitori ricadono come costi sui consumatori; l'effetto al rialzo sul costo medio di generazione, già tendenzialmente elevato; il pericolo che incentivi generosi inducano fenomeni di lock-in dei prezzi. Tuttavia il fotovoltaico, nelle versioni più avanzate ed innovative, costituisce una delle poche tecnologie energetiche in grado potenzialmente di fornire energia in quantità illimitata ed eventualmente a basso costo.



Figura 14 - 14: Ente Gestore dei Servizi Energetici in Italia.

3.3 LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DI EDIFICI PUBBLICI

In Italia che è un paese con un patrimonio edilizio ormai maturo e con caratteristiche spesso di valore storico la strada da perseguire per migliorare l'efficienza, ridurre i consumi e invogliare uno sviluppo sostenibile è quello della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio, privato e pubblico. Negli ultimi anni sono stati proposti interessanti studi per poter valutare i margini di miglioramento ottenibili intervenendo sul patrimonio edilizio, efficientando impianti, sistemi e consumi. Il patrimonio pubblico, lontano dall'interesse per queste problematiche per anni ha mostrato i margini di intervento più interessanti.

Tra i vari studi si riporta a scopo esemplificativo quello svolto dall'ENEA su un campione costituito da circa 15.000 unità immobiliari di edilizia pubblica selezionate tra quelle con le maggiori potenzialità di risparmio e tra quelle che necessitano di interventi di tipo strutturale. In relazione a questo campione sono

stati ipotizzati interventi che riguardano l'involucro edilizio (isolamento pareti e sostituzione infissi, installazione di elementi schermanti), gli impianti di produzione di calore e di condizionamento con impianti moderni più efficienti, il ricorso a fonti rinnovabili (attraverso dispositivi sia attivi che passivi), dispositivi per una gestione efficiente dei servizi di climatizzazione e illuminazione modulabili in funzione della domanda. Il costo complessivo di tali interventi è stato stimato in 8,2 miliardi di euro. Dal punto di vista dell'efficienza energetica, gli interventi previsti sono in grado di determinare una riduzione del fabbisogno energetico dell'insieme degli edifici censiti pari al 18% in termini di energia termica e al 23% in termini di energia elettrica. Il costo complessivo della bolletta energetica annua per i servizi di climatizzazione e illuminazione si dovrebbe così ridurre per il totale degli edifici determinando un risparmio pari al 23% della bolletta attuale.

Nella fase di realizzazione dell'investimento, a fronte di una spesa di 8,2 miliardi di euro, si stima una crescita della produzione attivata di 19 miliardi di euro, la creazione di valore aggiunto per 14 miliardi di euro ed un incremento complessivo del PIL nell'ordine di 0,6 punti percentuali per anno. I maggiori consumi e la crescita della produzione sarebbero inoltre in grado di attivare un incremento della domanda di lavoro pari a circa 150.000 unità.

I benefici creati dall'intervento sono riconducibili principalmente al risparmio nel consumo energetico. Questi sono stati stimati, pari a 337 milioni di euro per le scuole e 91 milioni di euro per gli uffici, per un totale di 428 milioni di euro all'anno.

4. ENERGIA SOLARE

INDICE CAPITOLO

4.1	LA RADIAZIONE SOLARE	27
4.1.1	LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN	28
4.1.2	LEGGE DI WIEN	29
4.1.3	LA RADIAZIONE AL SUOLO	29
4.2	CALCOLO DELLA RADIAZIONE AL SUOLO	30
4.2.1	ESEMPI SVILUPPATI CON TRNSYS	31

Il nostro pianeta riceve dal sole in un anno, al limite dell'atmosfera, una quantità di energia pari a $5,4 \times 10^{21}$ kJ, che corrisponde al prodotto della costante solare $C_s = 1350 \text{ W/m}^2$, per l'area del cerchio massimo. Questa energia non raggiunge interamente il suolo terrestre ma solo il 45% e il restante 55% si disperde nello spazio. Una frazione dell'energia incidente raggiungendo il suolo, viene riflessa dalla superficie della terra che infine, ne assorbe solo $4,8 \times 10^6$ kJ. A questa va aggiunta l'energia che l'atmosfera invia sulla Terra dopo averla raccolta dal sole e dalla terra stessa. La Terra infatti come qualunque corpo a temperatura differente dallo zero assoluto, emette per irraggiamento energia. Nel suo caso mediamente sono emessi $1,3 \times 10^7$ kJ/(m² x anno) per irraggiamento a cui si devono aggiungere circa $2,5 \times 10^6$ kJ/(m²) che l'atmosfera cede per convezione ed evaporazione. Nel suo complesso la quantità di energia che viene assorbita dalla superficie della terra è $1,5 \times 10^{21}$ kJ/m².

Quanto fin qui sommariamente calcolato porta a dedurre che basterebbe lo 0,6 % dell'energia che giornalmente arriva sulla superficie emersa della terra per far fronte alle nostre necessità energetiche. Questi calcoli pur se brutali hanno ritrovato conferme importanti in dati di verifica ottenuti con installazioni localizzate in diverse parti della superficie terrestre per misurare i valori puntuali di energia captabile. Dalle rivelazioni si trova anche conferma del fatto che la risorsa non sia costante ma vari con la latitudine e altri parametri:

Zone climatiche	GJ/(m ² x anno)
Zone glaciali	4,68
Zone temperate	3,6 - 6,12
Zone calde	6,12
Zone desertiche	8,3

Volendo riassumere senza eccessivamente dilungarci possiamo schematizzare affermando che le caratteristiche principali di questa fonte di energia sono:

- distribuzione su una superficie molto vasta;
- una potenza incostante nel tempo;
- differenza della disponibilità con la latitudine.

4.1 LA RADIAZIONE SOLARE

La radiazione solare è l'energia radiante emessa dal Sole a partire dalle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel nucleo solare e producono radiazioni elettromagnetiche le quali si propagano poi, nello spazio interplanetario.

La radiazione solare non è concentrata su una sola frequenza, ma è distribuita su un ampio spettro di ampiezza non costante con la forma di una campana simile a quello di un corpo nero col il quale la sorgente solare può essere approssimata. La maggior parte dell'energia irradiata dal sole è costituita da radiazioni la cui lunghezza d'onda è compresa fra 0,2 e 3 μm ; poichè le radiazioni vengono suddivise in tre intervalli in base alla loro lunghezza d'onda, possiamo dire che la maggior parte della radiazione solare arriva a noi sotto forma di luce. Nella tabella seguente si riassume la sua distribuzione percentuale:

Lunghezza d'onda [μm]	% Energia totale	Tipo di radiazione
0,25 - 0,38	1 - 7	ultravioletto
0,38 - 0,78	40 - 42	visibile
0,75 - 2,5	50 - 60	infrarosso

Tabella 2 – Distribuzione percentuale di radiazione solare.

Nello spettro della radiazione solare possiamo riconoscere diverse regioni di lunghezze d'onda, che hanno caratteristiche diverse, in particolare:

- ultravioletto ($0,1 \mu\text{m} < 0,38 \mu\text{m}$) contiene le radiazioni che trasportano maggior energia e potrebbero per questo risultare dannose per la vita sulla Terra. Queste radiazioni rappresentano una piccolissima percentuale dello spettro solare e vengono quasi interamente “fermate” nella parte più alta dell'atmosfera dall'ossigeno e dall'ozono;
- visibile ($0,38 \mu\text{m} < 0,78 \mu\text{m}$) contiene le radiazioni alle quali è sensibile l'occhio umano, dal violetto al rosso, e rappresenta il 42% del totale della radiazione solare;
- infrarosso ($0,78 \mu\text{m} < 3 \mu\text{m}$) contiene la radiazione che sperimentiamo come calore e rappresenta il 53% della radiazione emessa.

E' qui il caso di ricordare che una radiazione con lunghezza d'onda compresa tra 0,1 e 100 μm è detta radiazione termica poiché quando investe un corpo lo riscalda. Ciò spiega il motivo per cui una radiazione termica emessa da un corpo a temperatura inferiore ai 500 K non è visibile ad occhio umano anche se può essere avvertita come calore.

Si può accettare l'ipotesi semplificativa che il Sole si comporti, ai fini dell'irraggiamento, come un corpo nero a temperatura uniforme. E cioè come un oggetto (ideale) che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza riflettere né trasmettere energia luminosa apparendo in prima approssimazione nero, secondo l'interpretazione classica del colore dei corpi (entro i limiti della propria emissività termica).

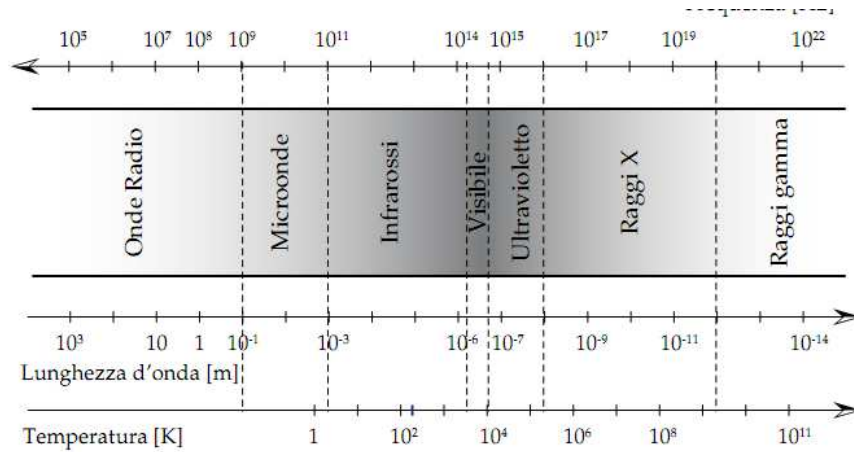


Figura 15 – Spettro elettromagnetico.

Non riflettendo il corpo nero assorbe dunque tutta l'energia incidente e, per il principio di conservazione dell'energia, re-irradia tutta l'energia assorbita (coefficiente di emissività uguale a quello di assorbività e pari ad uno) e deve quindi il suo nome unicamente all'assenza di riflessione.

Lo spettro definito come l'intensità o densità della radiazione emessa in funzione della lunghezza d'onda per un corpo nero è uno spettro dalla caratteristica forma a "campana" (più o meno asimmetrica e più o meno schiacciata) dipendente unicamente dalla sua temperatura T .

Quanto detto in questa breve digressione serve a giustificare l'impiego delle leggi di Stefan-Boltzmann e di Wien valide per un corpo nero e di seguito riportate.

4.1.1 LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN

La legge di Stefan-Boltzmann fornisce il valore dell'irraggiamento globale di un corpo nero, correlandolo con la sua temperatura:

$$E = \sigma_0 T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4.1)$$

dove:

- E è la quantità di energia totale irradiata o anche emittanza totale espressa in W/m^2 ;
- σ_0 è la costante di Stefan-Boltzmann uguale a $5,672 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$ ⁶
- T è la temperatura [K].

⁶ Per i corpi grigi la relazione è ancora valida ma il valore σ_0 è da moltiplicarsi per l'emissività compresa tra 0 (corpo bianco) e 1 (corpo nero)

4.1.2 LEGGE DI WIEN

La legge di Wien ci permette di conoscere la lunghezza d'onda cui corrisponde la massima intensità di emissione specifica:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} [m] \quad (4.2)$$

dove:

- λ_{max} [m] è la lunghezza d'onda per la quale è massima l'emissione;
- b è la costante dello spostamento di Wien uguale a $2,8978 \times 10^{-3}$ [m K];
- T è la temperatura del corpo emittente in K.

4.1.3 LA RADIAZIONE AL SUOLO

L'energia radiante del sole quando attraversa l'atmosfera terrestre si disperde uniformemente nello spazio in tutte le direzioni. Sulla terra, che è a circa 150 milioni di km dal sole, arriva solo una frazione estremamente piccola del flusso iniziale, pari a circa lo 0,002 % (ovvero 20 milionesimi). In termini quantitativi questo flusso energetico è pari alla costante solare di cui si è parlato al 4.1.1. Tuttavia, tale flusso energetico arriverebbe integralmente al suolo se la terra fosse piatta e fosse esattamente perpendicolare ai raggi solari e, per di più, non avesse alcun mezzo interposto, come l'atmosfera, che attenua e diffonde la radiazione solare.

La sfericità della terra provoca una distribuzione non uniforme del flusso solare tra zone equatoriali e zone polari. Inoltre, il moto di rotazione e di rivoluzione terrestre provoca una ulteriore disuniformità nella distribuzione della radiazione solare al suolo tra giorno e notte e tra una stagione e l'altra. Tutte queste oscillazioni sono, comunque, cicliche e si ripetono regolarmente con periodo annuale, ciò significa che è possibile raccogliere in database a base annuale i dati necessari per il calcolo per ogni punto terrestre di interesse.

Il flusso energetico realmente utilizzabile dal nostro pianeta è invece minore poiché la Terra non ha una superficie "nera", ovvero in grado di assorbire totalmente la radiazione solare incidente, ma una superficie composta da suoli, rocce, mari ed oceani, che hanno una certa riflettività (definita albedo) e mediamente pari circa al 30%. Questo patrimonio energetico di cui disponiamo, permetterebbe al nostro pianeta, se non ci fosse l'atmosfera, di raggiungere al massimo una temperatura media di 254 K (circa -19 °C). Le escursioni termiche attorno a questo valor medio sarebbero, però, molto elevate tra zone polari ed equatoriali, tra notte e giorno e fra estate ed inverno.

Una volta che la radiazione solare è giunta sulla superficie terrestre, essa viene assorbita dai suoli e dai mari, i quali si riscaldano aumentando la loro temperatura. Via via che aumenta la temperatura, la superficie terrestre emette energia sotto forma di calore per irraggiamento tramite radiazione infrarossa,

fino a quando non si stabilisce l'equilibrio, tra flusso di energia solare incidente e flusso di energia terrestre uscente verso lo spazio.

La radiazione solare che arriva al suolo è oltre che geograficamente anche temporalmente molto variabile essendo influenzata in modo sostanziale dalla situazione meteorologica. La misurazione dell'irradiazione istantanea viene effettuata con un piranometro; tale strumento è in grado di misurarla tramite le misure di una pila termoelettrica.

4.2 CALCOLO DELLA RADIAZIONE AL SUOLO

Prima di introdurre i metodi di calcolo usati per determinare la radiazione disponibile al suolo, si definiscono di seguito di seguito le fondamentali grandezze geometriche per la descrizione della posizione solare:

Latitudine ϕ : è l'angolo misurato lungo il meridiano fra l'equatore (latitudine zero) e il parallelo passante per una data località;

Angolo Zenitale θ_z : è l'angolo formato fra la direzione del Sole e la direzione del raggio terrestre cioè del filo a piombo. Lo zenit si trova nella direzione perpendicolare al piano dell'orizzonte;

Declinazione solare δ : è l'angolo con l'Equatore individuato dai raggi del Sole. Questo angolo ovviamente varia nel corso dell'anno.

Ove vale la relazione:

$$\phi = \theta_z + \delta \quad (4.3)$$

Per calcolare la radiazione disponibile sulla superficie terrestre partendo dalla conoscenza fisica del fenomeno di irraggiamento sono stati sviluppati diversi modelli di calcolo. Avendo a disposizione solo il dato sulla radiazione totale orizzontale al suolo (I) è possibile attraverso l'uso del "modello di Reindl" (implementato tra l'altro nella *Type 16* del TRNsys) che con buona approssimazione coinvolge anche temperatura e umidità relativa, calcolare il rapporto tra radiazione diffusa (I_d) e diretta (I_b) e tramite la relazione seguente:

$$I = I_b + I_d \quad (4.4)$$

determinare i due contributi alla radiazione totale.

Una volta calcolati o forniti statisticamente questi dati sarà possibile ricostruire la radiazione su qualsiasi superficie inclinata fissa o ad inseguimento solare. Su una superficie inclinata infatti la radiazione totale può essere così composta da i tre contributi:

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{gT} \quad (4.5)$$

ove l'ultima componente I_{gT} rappresenta la parte riflessa dall'ambiente circostante. La radiazione incidente sulla superficie inclinata I_{bT} è così deducibile:

$$I_{bT} = I_b \frac{\cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \sin\beta}{\cos\theta_z} \quad (4.6)$$

con β angolo di inclinazione della superficie sull'orizzontale, γ l'azimuth della superficie e il meridiano locale e γ_s l'azimuth solare. La convenzione è quella generale che prevede lo zero per la direzione dell'equatore, positivo l'ovest e negativo l'est. La radiazione riflessa dal suolo invece, supponendo una riflessione isotropa di quest'ultimo, è calcolabile in questo modo:

$$I_{gT} = \rho_g I \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (4.7)$$

dove ρ_g è il coefficiente di riflessione del suolo in media pari a 0,2 (con neve può arrivare fino a 0,9). Per la valutazione della radiazione diffusa sulla superficie inclinata si può far riferimento a diversi modelli tra cui si ricordano quello di diffusione isotropa, di *Hay and Davies*, di *Reindl* e di *Perez*. Quest'ultimo oltre ad essere il più complesso di tutti si dimostra anche il più affidabile con l'utilizzo dei coefficienti di luminosità del cielo. Si riporta la formulazione per il modello diffusione isotropa, non affidabilissimo nei risultati ma sicuramente semplice nella sua espressione concettuale:

$$I_{dT} = I_d \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (4.8)$$

È di grande importanza precisare che i calcoli fin qui esposti sulla radiazione solare e sulla posizione solare sono basati sull'orario solare effettivo e non su quello imposto a livello nazionale in generale differenti⁷.

4.2.1 ESEMPI SVILUPPATI CON TRNsys

Nella realizzazione di modelli per sistemi termici che coinvolgono la radiazione solare, sia in modo attivo che passivo, l'analisi di quest'ultima viene effettuata in TRNsys in modo dettagliato facendo riferimento ai modelli fin qui descritti.

⁷ In TRNsys la procedura da seguire per aggiustare questa discordanza è quella di intervenire nella Type 16 impostando tra i parametri lo Shift in solar time ricavabile o analiticamente o più semplicemente, usando file meteo Meteonorm tramite il file list prodotto dal software contenente per la località di calcolo appunto il valore Shift da impostare. Ad esempio per Roma **-2,77 gradi**.

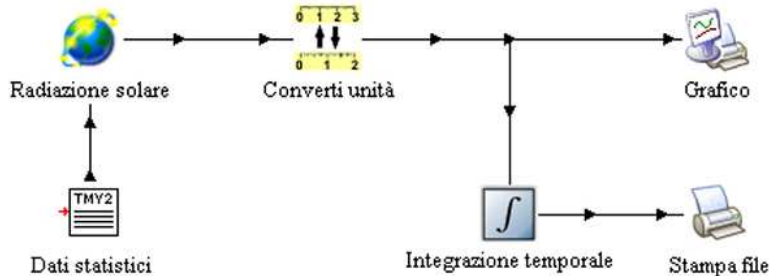


Figura 16 - Modello realizzato con TRNsys per l'analisi della radiazione solare.

La loro processazione è ovviamente effettuata ad ogni step di calcolo. Le Type da impiegare per impostare il modello sono la *Type 89d*⁸ per la lettura dei file statistici in formato .tmy2 e la *Type 16* per il calcolo delle radiazioni solari. Si segnala anche l'utilizzo della *Type 57* comoda per la conversione dell'unità di misura del flusso solare e la sua espressione in W/m^2 . Di seguito verranno riportati dei grafici e delle tabelle per il caso di Roma che principalmente hanno la funzione di mostrare le potenzialità e la funzionalità del software, nonché di permetterne un raffronto con i dati presenti in letteratura. I valori ottenuti sono stati ricavati con il modello riportato in Figura 16.

La prima osservazione va fatta su i dati generati dal modello per la valutazione della "orizzontalizzazione" della radiazione extraterrestre riportati in Figura 17. Come si nota facilmente da questo grafico, i valori della radiazione extraterrestre orizzontalizzata sono uguali alla componente ortogonale della costante solare e quindi seguono l'andamento dell'angolo zenitale. I valori dell'angolo zenitale e di conseguenza quelli della radiazione orizzontale variano nell'arco della giornata e con le stagioni raggiungendo i massimi in corrispondenza del solstizio d'estate pari a $18,77^\circ$ con una radiazione extraterrestre sull'orizzontale pari a $1237 W/m^2$. La radiazione viene poi scomposta in base al modello di calcolo scelto in radiazione incidente e diffusa. È possibile in oltre calcolare i valori della radiazione incidente per superfici dalla diversa inclinazione (tilt angle). In Figura 19 si riportano gli output di simulazioni svolte a Roma con angoli di inclinazione differenti. Si capisce facilmente come questo parametro possa influenzare direttamente e in modo sicuramente non trascurabile l'efficienza del sistema a energia solare. La disposizione orizzontale (angolo di tilt 0°) porta ad un'assorbimento maggiore nel periodo estivo contrariamente a quanto fatto dalla disposizione verticale angolo di tilt 90°). La situazione ottimale con angolo di circa 33° fornisce il massimo apporto ottenibile con pannelli fissi grazie ad una distribuzione che media in modo ottimale le angolazioni del sole aumentando così la resa ottica.

⁸ La Type 89b ha le stesse funzionalità della 89d ma inizia la lettura dei dati nel file sempre dall'ora 1 senza permettere la possibilità di variare l'intervallo di analisi cosa, invece, possibile con la Type 89d e quindi da preferire in generale tranne casi specifici.

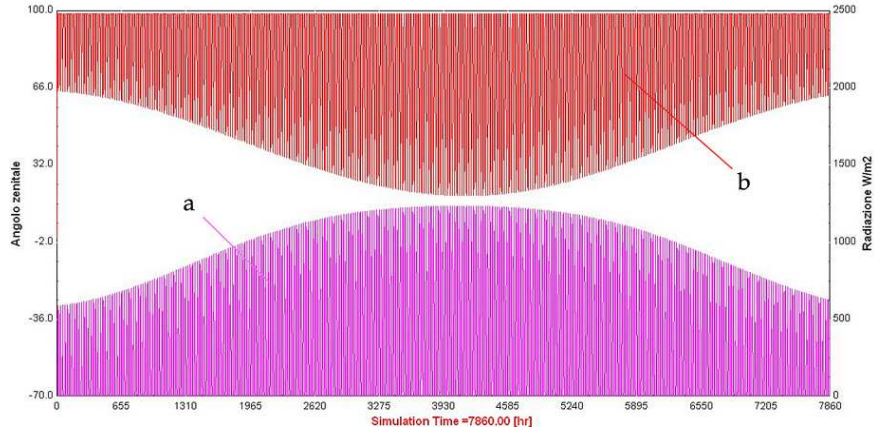


Figura 17 - Andamento radiazione extraterrestre(a) a confronto con l'angolo zenitale(b).

Inseguimento solare

Con il software TRNsys è possibile considerare oltre che superfici inclinate fisse, anche sistemi ad inseguimento con inseguimenti parziale o totale. Facendo riferimento alle denominazioni di Figura 18 si può controllare un inseguimento lungo l'asse A1, lungo l'asse A2 o lungo entrambi gli assi. Il parametro sul quale agire è quello della *Type 16* denominato *Tracking mode* che può assumere i seguenti valori:

- | | |
|---------------|--|
| MODE 1 | Imposta la superficie inclinata come fissa |
| MODE 2 | Fa ruotare la superficie inclinata attorno all'asse A ₁ |
| MODE 3 | Fa ruotare la superficie inclinata attorno all'asse A ₂ |
| MODE 4 | L'inseguimento solare totale sui due assi. |

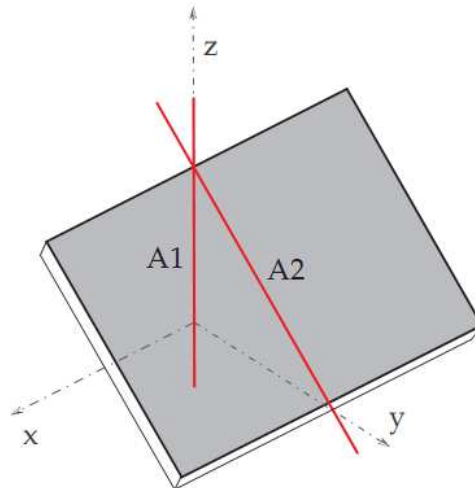


Figura 18 - Assi di rotazione per modello ad inseguimento solare.

Nella Tabella 3 e in Figura 20 vengono riportati i valori ottenibili tramite la *Type 24*⁹ per superfici inclinate con diversi angoli di tilt ma angolo di azimuth identico e pari a 0° (disposizione verso sud). Come si nota per la modalità 4 a completo inseguimento solare non ha alcuna importanza l'inclinazione impostata della superficie essendo questa adattata istante per istante dal software per massimizzare l'apporto che risulta complessivamente superiore del 32% rispetto a quello di riferimento (disposizione fissa con migliore inclinazione captante). L'analisi sicuramente non esaustiva della completa casistica possibile di angolazioni, fornisce un esempio metodologico, chiarendo come si possa operare alla ricerca di un'ottimizzazione della disposizione delle superfici inclinate in relazione alla loro funzionalità generale e stagionale. Si fa ancora notare come la variazione dell'angolo di tilt è di fondamentale importanza e può portare variazioni all'energia captata anche del 35%. E' evidente che per la particolare scelta degli angoli iniziali di tilt di 0° e 90° per le modalità di inseguimento 2 e 3 rispettivamente non si ha variazione dalla situazione fissa dell'energia incidente essendo la variazione ininfluente.

	Angolo di tilt [gradi]	Energia totale [kWh/m ² anno]	Efficienza di tilt [%]
Mode 1	0	1500	88
	90	1107	65
	33	1707	100
Mode 2	0	1500	88
	90	1778	104
	33	2089	122
Mode 3	0	2006	118
	90	1778	104
	33	2187	128
Mode 4	0	2248	132
	90	2248	132
	33	2248	132

Tabella 3 - Angolo di tilt e inseguimento solare: efficienza di captazione.

⁹ Questa Type permette l'integrazione temporale sotto forma integrale o di sommatoria. Fornendo a questa type come input delle potenze si otterranno in output dei lavori.

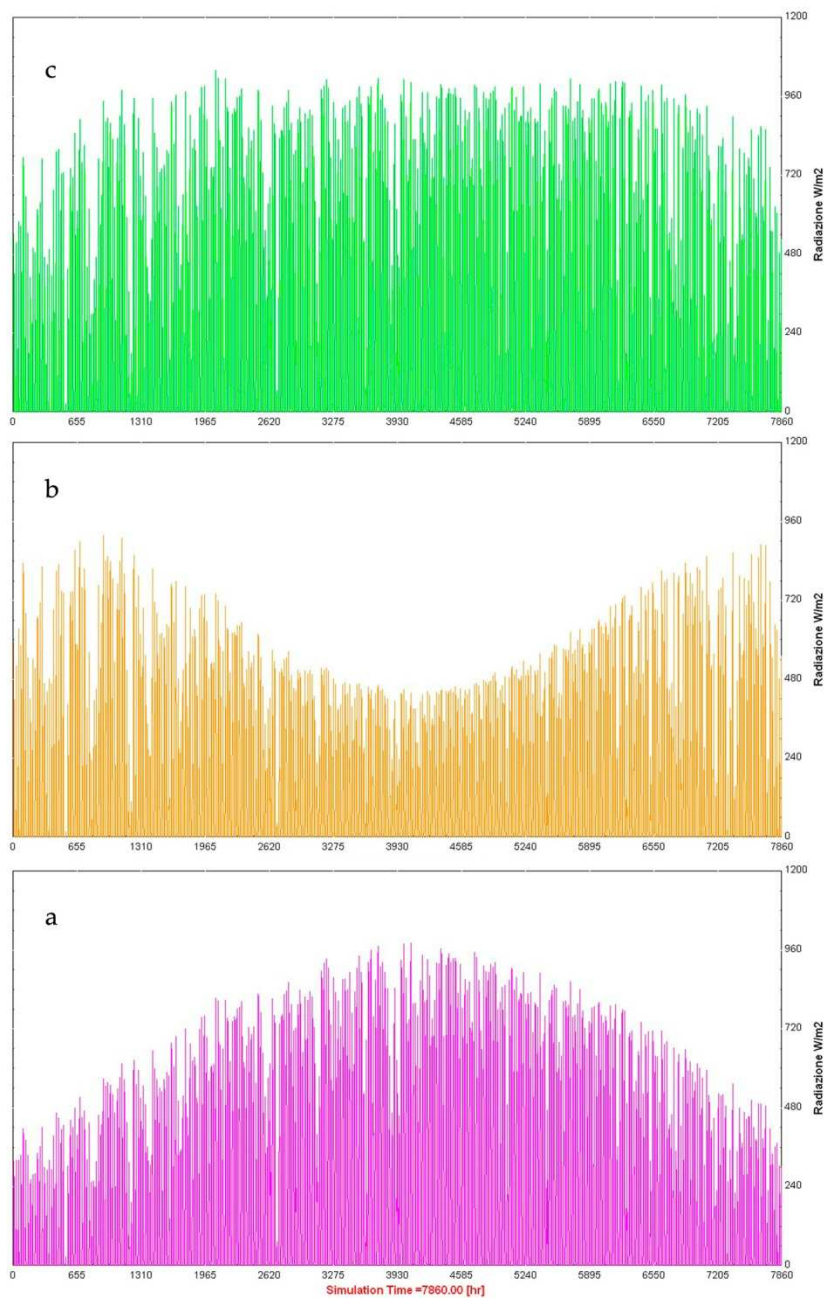


Figura 19 - : Andamento radiazione totale incidente con angolo di tilt di 0°(a), 90°(b), 33° (c)

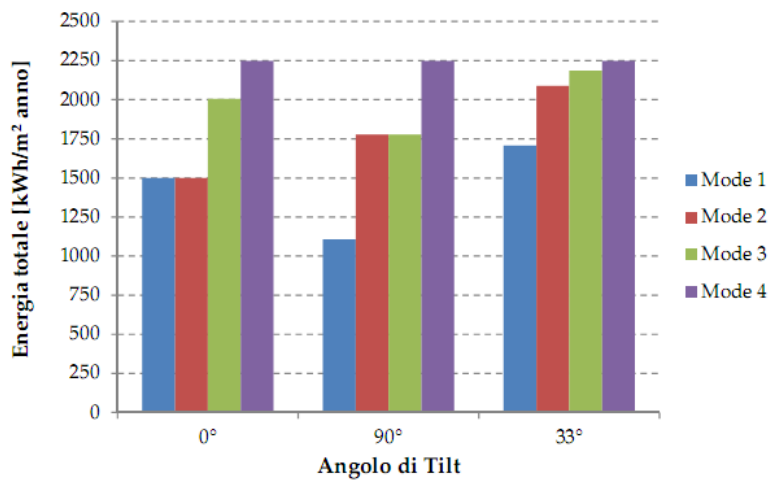


Figura 20 - Angolo di tilt e inseguimento solare: efficienza di captazione.

5.SOLARE ATTIVO

INDICE CAPITOLO

5.1	I COLLETTORI SOLARI.....	40
5.1.1	COLLETTORI A BASSE TEMPERATURE	40
5.1.2	COLLETTORI AD ALTE TEMPERATURE.....	45
5.1.3	PARAMETRI CARATTERISTICI DEI COLLETTORI.....	48
5.1.4	CALCOLO DELL'EFFICIENZA DEI COLLETTORI.....	50
5.1.5	ESEMPI SVILUPPATI IN TRNSYS.	56
5.2	I PANNELLI FOTOVOLTAICI.....	58
5.2.1	DEFINIZIONE DELL'EFFETTO FOTOVOLTAICO.....	58
5.2.2	STRUTTURE E TIPOLOGIE DI PANNELLI FOTOVOLTAICI	59
5.2.3	DALLA CELLA AL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	60
5.2.4	INTEGRAZIONE DEI SISTEMI FOTOVOLTAICI IN ARCHITETTURA.....	61
5.2.5	MODELLAZIONE MATEMATICA DI UN PANNELLO FOTOVOLTAICO.....	62
5.2.6	ESEMPI SVILUPPATI CON IL TRNSYS.....	65
5.3	IL SOLAR COOLING	67
5.3.1	MACCHINE FRIGORIFERE AD AS/ADSORBIMENTO.....	68
5.3.2	MODELLAZIONE MATEMATICA: MACCHINA FRIGORIFERA AD ASSORBIMENTO	70

L'energia solare in ambito edilizio può essere sfruttata con due approcci attraverso l'impiego di tecniche e tecnologie differenti. Questi si distinguono in due categorie: solare attivo e solare passivo. I sistemi passivi sono quelli che si avvalgono di mezzi e accorgimenti strettamente integrati negli edifici e che per il loro funzionamento non richiedono impianti aggiuntivi. Ad esempio sono quelli che prevedono un adeguato orientamento dell'edificio, l'utilizzo oculato di superfici vetrate come di serre, lucernari, frangisole, superfici riflettenti, oppure strutture ad elevata inerzia termica, quali i muri di Trombe, i muri a cambiamento di fase o le pareti ad acqua. I sistemi attivi sono invece quelli che si avvalgono di veri e propri impianti tecnici di supporto, con mezzi per captare, convertire, trasportare e utilizzare l'energia solare. Sono in pratica tutti quei sistemi che utilizzano direttamente la radiazione solare per trasformarla in energia termica o elettrica.

Come si è schematizzato in Figura 21 la fonte di energia solare viene trasformata nel caso del solare attivo in energia termica o energia elettrica. Nella trasformazione si hanno rendimenti sempre minori dell'unità e nel caso del fotovoltaico anche di molto. Tra energia termica ed energia elettrica sono possibili ulteriori conversioni tramite apposite macchine con un ulteriore abbattimento della resa. Gli impianti necessari alla captazione dell'energia solare e alla loro trasformazione sono costituiti nei loro elementi fondamentali da pannelli fotovoltaici e/o collettori termici. I pannelli fotovoltaici trasformano direttamente l'energia solare in energia elettrica. I pannelli o (collettori) termici trasformano l'energia solare in calore che può essere sfruttato, ad esempio, per attivare turbine di cogenerazione elettrica, oppure per eseguire trattamenti

specifici in alcuni settori industriali o agricoli, oppure ancora per produrre acqua calda sanitaria e riscaldare gli ambienti in base al sistema di concentrazione adottato e quindi alle temperature di funzionamento.

Le tecnologie a bassa temperatura comprendono i sistemi che usano un collettore solare per riscaldare un liquido o l'aria. Lo scopo è captare e trasferire energia solare per produrre acqua calda o riscaldare gli ambienti. Con la denominazione "bassa temperatura" ci si riferisce a fluidi scaldati al di sotto dei 100°C o comunque non superiori ai 150°C in condizioni di regime per i tubi sottovuoto. Tale limitazione tecnica più chiarita al punto 5.1.4 ove si mostrerà come il rendimento di questa tecnologia è fortemente dipendente dalla differenza di temperatura tra fluido termovettore nel sistema e l'ambiente.

Le tecnologie a media alta temperatura sono relative a sistemi a concentrazione parabolici, lineari o puntuali con temperature anche superiori a 300 °C. Questa tecnologia oggi rimane comunque ancora impiegata quasi esclusivamente per centrali sperimentale di produzione elettrica anche se i recenti sviluppi tecnologici fanno prevedere un rilancio applicativo di questa tecnologia sia per la generazione di energia elettrica su piccola scala, sia per la produzione di calore di processo per l'industria chimica, sia per applicazioni in ambito domestico per l'affiancamento a sistemi tradizionali. Tutto ciò trova conferma nei recenti studi svolti attualmente anche in Italia dall'ENEA con il progetto Archimede¹⁰.

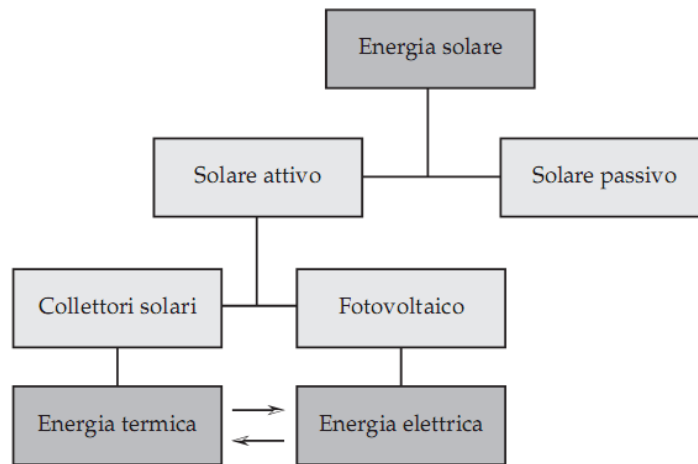


Figura 21 - Rappresentazione logica energie nei sistemi ad energia solare.

¹⁰ A tal proposito si consiglia di documentarsi direttamente sul sito dell'ENEA: www.enea.it ove è possibile ritrovare pubblicazioni di ricerche e studi in merito a questo progetto e ad altre attività inerenti sistemi e tecnologie per lo sfruttamento di fonti rinnovabili.

Altro utilizzo attualmente in grande sviluppo applicativo è quello del *Solar Cooling* che prevede con l'accoppiamento di sistemi captanti termici (collettori solari) e di macchine ad assorbimento il raffrescamento di ambienti.

Ad oggi i sistemi largamente diffusi a livello residenziale sono ovviamente quelli a bassa temperatura principalmente utilizzati per la produzione di acqua calda e per l'integrazione del riscaldamento e i sistemi fotovoltaici spinti da precise scelte energetiche a livello nazionale che con incentivi statali integrano economicamente l'investimento in modo significativo. Negli ultimi anni si segnala l'interessante presenza sul mercato di collettori solari a concentrazione¹¹ e macchine ad assorbimento di piccole dimensioni pensati per l'istallazione in piccoli impianti nel settore terziario o residenziale.

¹¹ Si faccia riferimento per esempio all'americana Sopogy® attiva in questo settore del MicroCPS: www.sopogy.com.

5.1 I COLLETTORI SOLARI

I collettori è senza dubbio l'elemento più importante, anche se non l'unico nell'impianto solare ove ne rappresenta la forza motrice. E' qui che l'energia solare della radiazione luminosa riscalda il fluido termovettore realizzando il passaggio da energia solare a energia termica. Ogni impianto quindi, mirano a convertire in maniera il più efficace possibile l'irraggiamento in calore e a fornire questo calore con le minori perdite possibili agli utenti. I collettori si distinguono considerevolmente per qualità, prestazioni, costruzione e costi. Nei paragrafi seguenti si descriveranno le tipologie di collettori disponibili in commercio e le caratteristiche e i parametri quantitativi che ne individuano prestazioni e funzionalità. Una lista completa di tutti i valori caratteristici fa parte di una corretta definizione tecnica delle proprietà di un collettore, non è possibile alcuna analisi o paragone tra collettori se mancano alcuni di questi dati chiave che sono regolamentati in Europa dalla norma EN12975. L'attuale offerta tecnologica è molto variegata e propone come sistemi a bassa temperatura:

- Collettori a piastra;
- Collettori a tubi sottovuoto;
- Collettori monoblocco e/o sferici;
- Collettore non vetrato;
- Collettore ad aria;

e come sistemi ad alta temperatura:

- Collettore a concentrazione;

I sistemi sono caratterizzati in modo determinante dalla loro filosofia costruttiva e la scelta di un sistema piuttosto che un altro deve scaturire da un'attenta e consapevole analisi del luogo di installazione e delle finalità utilizzative. La temperatura di circolazione del liquido termovettore al loro interno è un parametro analiticamente determinante.

5.1.1 COLLETTORI A BASSE TEMPERATURE

Una prima schematizzazione di questi collettori solari può essere così proposta:

- **Assorbitore:** ha la funzione di assorbire la radiazione solare (piastra metallica);
- **Copertura trasparente:** limita le perdite per convezione-irraggiamento e permette il passaggio della radiazione solare fino all'assorbitore;
- **Fluido termovettore:** fluido con determinati valori di capacità termica (acqua, glicole, miscela acqua-glicole o aria);
- **Tubi metallici;**
- **Coibentazione** con materiale ad alta trasmittanza della base e dei lati;
- **Involucro metallico.**

La piastra captante (assorbitore) è in genere realizzata con materiali buoni conduttori di calore (rame, alluminio). Per incrementare la quantità di energia solare assorbita vengono spesso impiegati assorbitori dotati di un cosiddetto strato selettivo, con un alto coefficiente di assorbimento ($a > 0,95$) nel campo della lunghezza d'onda della radiazione solare e un basso coefficiente di emissività ($e < 0,1$) in quello delle lunghezze d'onda della radiazione termica. Gli strati selettivi possono essere ottenuti con procedimento galvanico (cromo, alluminio con pigmentazione al nickel) oppure applicati sottovuoto (per esempio Timox o Cermet).



Figura 22 – collettore solare a piastra piana.

Collettore a piastra piana

I collettori a piastra I collettori a piastra o collettori piani (Figura 22) presentano un ottimo

rapporto qualità prezzo e hanno una durata superiore ai 20 anni. Sono utilizzati per la produzione di acqua calda sanitaria e/o per l'integrazione con il riscaldamento domestico, ideale anche per l'incasso nel tetto. Tali collettori possono essere a superficie selettiva o non selettiva a seconda dell'utilizzo. Per un uso prevalentemente estivo si può prendere in considerazione l'utilizzo di un collettore non selettivo mentre per l'utilizzo annuale si deve preferire un assorbitore selettivo. La selettività della superficie assorbente assume una particolare importanza nel rendimento del collettore nonché nel rendimento dell'intero sistema.

Nei collettori piani, l'assorbitore solare è protetto dalle perdite di calore a mezzo di materiali isolanti, principalmente lana di vetro e lastre di vetro. Il vetro usato oggi come copertura per collettori di alta qualità è progettato espressamente per una bassa riflessione, temprato estremamente trasparente (con pochissimo ferro). Per le cornici laterali si ricorre per lo più a lamiere in alluminio o zinco. Per la parte posteriore si usano materiali isolanti, feltri per tetto oppure lastre d'alluminio, zinco o acciaio inossidabile. I telai possono essere in alluminio, plastica o acciaio inox. Dal punto di vista della forma strutturale, vi è una differenza tra piccoli collettori (circa 2 m²) completamente prefabbricati e grandi collettori (5-12 m²) che vengono assemblati direttamente sui tetti oppure, quelli prefabbricati, installati con la gru. In Italia i collettori piani sono sicuramente i più usati con un lento inserimento dei sistemi a film sottile. I vantaggi dei collettori piani sono:

- struttura semplice e robusta;
- tecnologie mature;
- rapporto qualità/prezzo favorevole;
- attraenti dal punto di vista estetico grazie alla superficie piana.

Nel dettaglio, i collettori si distinguono in funzione di numerose caratteristiche, dalla struttura e la copertura degli assorbitori, la circuitazione idraulica e le perdite di carico, ai tipi di connessione, lo spessore e la qualità dell'isolamento e del telaio, la copertura trasparente, le guarnizioni, fino ai tipi di lavorazione e di assemblaggio dei sistemi, i dispositivi per facilitare il trasporto, l'aspetto estetico e la durata in esercizio.

Collettori a tubi sottovuoto

Al fine di ridurre le perdite di calore per convezione e conduzione, questi tubi sotto vuoto sono simili a dei termos (Figura 23). L'entità del vuoto è di importanza decisiva per l'interruzione del meccanismo di trasmissione del calore (convezione e conduzione). La pressione deve scendere ben al disotto della pressione atmosferica per ottenere una riduzione dei coefficienti di perdita di calore (a_0 , a_1 , a_2) nel collettore. Per cui una variante di tubi prodotti vengono riempiti con Xenon, analogamente ai collettori piani contenenti gas inerte, in modo da ottenere una riduzione significativa dei coefficienti di perdita di calore anche solo con una leggera depressione. Basse depressioni permettono risparmi considerevoli nell'uso di materiali e nella loro costruzione. Poiché i collettori sotto vuoto possono raggiungere temperature sostanzialmente più alte di quelle dei collettori piani, il carico termico sull'isolamento dei tubi, sui sensori di controllo e sul fluido termovettore può essere molto alto. L'isolamento termico delle tubazioni deve resistere in modo durevole a temperature anche superiori ai 150°C. Nei sistemi a tubi sottovuoto si può ricorrere soltanto a fluidi termovettori espressamente progettati per questo tipo di funzionamento. Il tipo di connessione delle tubazioni deve poter resistere alle temperature nel circuito collettore (fino a 160°C). Inoltre, è necessario assicurarsi che il fluido termovettore abbia la possibilità di evaporare anche nelle tubazioni del collettore, specialmente in presenza di bassa pressione e alte temperature.

I vantaggi dei tubi sotto vuoto:

- possibilità di raggiungere temperature di esercizio più alte rispetto a quelle dei collettori piani. Questo può essere utile per la generazione di calore di processo (ad es. per l'industria o il raffrescamento solare) o in generale per tutti i sistemi che seguono indicazioni di rendimento termodinamico simili alla macchina di Carnot;
- perdite termiche ridotte nei confronti dei collettori piani grazie all'eccellente isolamento termico.



Figura 23 – collettore solare a tubi sottovuoto

Gli svantaggi dei tubi sottovuoto:

- alte temperature di stagnazione con corrispondente carico su tutti i materiali vicini al pannello e al fluido termovettore;
- formazione maggiore di vapore in caso di stagnazione;
- costi più elevati per il calore solare utile a temperature di esercizio medie. Vantaggi economici solo per temperature di esercizio più alte;
- installazione ad incasso sul tetto non consentita.

Tubi sottovuoto a flusso diretto. In questo modello il fluido termovettore attraversa direttamente i tubi sotto vuoto dell'assorbitore. In questo modo si possono raggiungere rendimenti alti grazie alla diretta trasmissione di calore. A seconda delle necessità (ad esempio nel caso di montaggio su facciata), l'assorbitore può essere meglio orientato verso il sole, tramite rotazione dei singoli tubi al momento dell'installazione. I tubi sottovuoto a flusso diretto hanno un vantaggio addizionale rispetto ai tubi sotto vuoto usuali. Essi possono infatti essere montati direttamente su tetti piani (ma solo nelle regioni con poca

neve). Ciò significa che il costo per la struttura sottostante può essere minimizzato. L'impatto visivo è basso con questo tipo di montaggio (questo vale anche per i collettori che funzionano secondo il principio Sydney).

Tubi sottovuoto secondo il principio del tubo di calore. Secondo il principio del tubo di calore, quando c'è depressione, una piccolissima quantità di acqua (o altro fluido, a seconda delle esigenze di temperatura) evapora nel tubo dell'assorbitore, sale nel condotto assorbitore, si condensa nel condensatore e ritorna in forma liquida nell'assorbitore. Il condensatore trasferisce il calore al mezzo termovettore che circola nel collettore. A differenza dei tubi a flusso diretto, questo principio richiede un'inclinazione minima del tubo assorbitore, compresa in genere tra i 20° e 30°. Temperature nel condensatore superiori a quella di evaporazione del fluido nell'assorbitore provocano un'evaporazione completa. Questo può succedere in caso di raggiungimento della temperatura di stagnazione per consumo di calore insufficiente. In questo caso, non c'è più trasmissione di calore dall'assorbitore al condensatore. Questo limite intrinseco di temperatura può avere un effetto positivo nei sistemi che sono soggetti a frequenti ma brevi fasi di stagnazione. In caso di periodi di stagnazione più lunghi, la temperatura nel condensatore raggiungerebbe valori molto elevati e di conseguenza anche il fluido termovettore del circuito collettore, a causa della conduzione termica dall'assorbitore al condensatore e nonostante il limite di temperatura teorico.

A causa della trasmissione di calore supplementare tra il condensatore e il fluido termovettore del circuito collettore, la temperatura di esercizio di questo tipo di collettori è in principio leggermente inferiore a quella dei tubi a flusso diretto.

Tubi sottovuoto CPC. Al fine di evitare perdite di vuoto a livello della connessione vetro/metallo nei collettori a tubo, è stato progettato il tubo "Sydney" che consiste semplicemente in un tubo a doppia parete di vetro. In questo tipo di tubo la superficie di assorbimento si trova direttamente all'interno del tubo di vetro. A causa della forma rotonda dell'assorbitore, si rende necessario l'impiego di un riflettore al fine di poter comunque utilizzare la parte della superficie non direttamente esposta al sole. Questi riflettori sono di solito usati come concentratori da cui il nome CPC (Compound Parabolic Concentrator), con il quale i collettori a tubi "Sydney" sono commercializzati. L'azione dei riflettori non protetti da apposita copertura può diminuire con il tempo a causa degli agenti atmosferici. Durante gli interventi di manutenzione, comunque necessari, è importante quindi che i riflettori siano controllati e puliti. Questo tipo di tubi ha raggiunto una buona posizione sul mercato a causa del prezzo basso e nonostante il rendimento inferiore rispetto ad altri tipi di tubo impiegati per i piccoli impianti. Per paragonare i differenti tipi di sistemi si devono tenere in debito conto le indicazioni circa la superficie di riferimento. I collettori CPC presentano grazie ai riflettori una superficie di apertura in genere maggiore e una superficie assorbitore relativamente piccola.

Collettori monoblocco e/o sferici.

Hanno un serbatoio in acciaio INOX esposto al sole, servito da un collettore piano. Il serbatoio è dipinto di nero, termicamente isolato e coperto da una lastra di materiale trasparente termoisolante. Si può ritenere un sistema completo e per questo semplice da installare. È un sistema utile per la sola produzione di acqua calda sanitaria e per un uso prevalentemente estivo per le singole famiglie.

I collettori sferici, invece, sono dei collettori con la medesima funzionalità dei collettori monoblocco ma con forma sferica in modo da poter limitare l'impatto visivo e poterli inserire in un giardino come elementi decorativi oltre che funzionali.

Collettori non vetrati.

Sono collettori piani privi del vetro esterno, caratterizzati da un costo decisamente inferiore. Visto il loro scarso rendimento sono utilizzati prevalentemente per un uso estivo e limitati a applicazioni con basse differenze di temperature con l'ambiente esterno come ad esempio piscine esterne per uso privato.

Collettori ad aria.

Sono simili ai normali pannelli vetrati ma in questo caso il fluido vettore è aria anziché acqua, che può circolare fra vetro e assorbitore oppure fra assorbitore e fondo del pannello. I campi di applicazione sono tipicamente quelli di riscaldamento dell'aria per la climatizzazione ambientale e, in campo industriale, per il processo di essiccazione di prodotti alimentari. Il loro utilizzo è stato sperimentato con successo in Germania per la climatizzazione di ampi edifici pubblici.

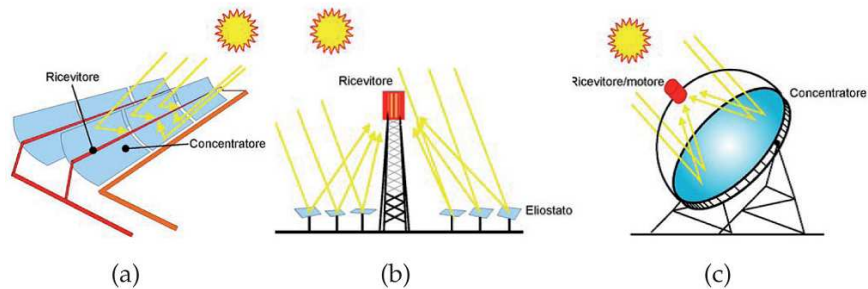


Figura 24 – Schemi di collettori a concentrazione solare: parabolici lineari (a), a torre con ricevitore centrale (b), a disco (c).

5.1.2 COLLETTORI AD ALTE TEMPERATURE

Il componente alla base delle tecnologie e dei sistemi solari termici a concentrazione è un “collettore concentratore”, vale a dire un dispositivo in grado di raccogliere e convogliare la radiazione solare verso un ricevitore. Il ricevitore può essere di tipo termico, ma anche fotovoltaico o termofotovoltaico.

In relazione alla geometria e alla disposizione del concentratore rispetto al ricevitore si hanno i concentratori parabolici lineari, a torre con ricevitore centrale e i concentratori parabolici puntuali o a disco (Figura 24). Soprattutto negli ultimi 5-15 anni, i sistemi solari a concentrazione sono stati oggetto di profonde innovazioni che ne hanno migliorato le prospettive, rendendo superati quei luoghi comuni secondo i quali tali sistemi risulterebbero inadatti alle alte latitudini o inaffidabili a causa dei complicati sistemi di inseguimento del sole. L'energia termica prodotta può efficacemente essere utilizzata per produrre vapore per un ciclo Rankine, spesso inserendola in parallelo ad un impianto a ciclo combinato turbogas-turbina a vapore che ne assicuri la continuità. Sistemi con un rapporto non troppo elevato di concentrazione possono venire utilizzati anche per la generazione di freddo tramite l'inserimento in cicli frigoriferi ad assorbimento. I più recenti sistemi solari a concentrazione sono molto diversi da quelli prodotti appena qualche anno or sono. L'affidabilità sta aumentando e concentrazioni elevate della radiazione solare possono essere ottenute anche con sistemi completamente statici. L'applicazione dell'ottica senza immagini ha svolto un ruolo determinante nel migliorare la qualità delle tecnologie utilizzate. Questa disciplina scientifica ha aperto la strada alla realizzazione di sistemi a concentrazione sempre più versatili, più economici e più efficienti - fino a 3 o 4 volte di quelli progettati e costruiti sulla base della più nota e tradizionale ottica con immagini. Con l'applicazione combinata dell'ottica con immagini e dell'ottica senza immagini, la radiazione solare può essere, attraverso fasi successive, intensificata fino e oltre a 10.000 soli anche in sistemi molto compatti.

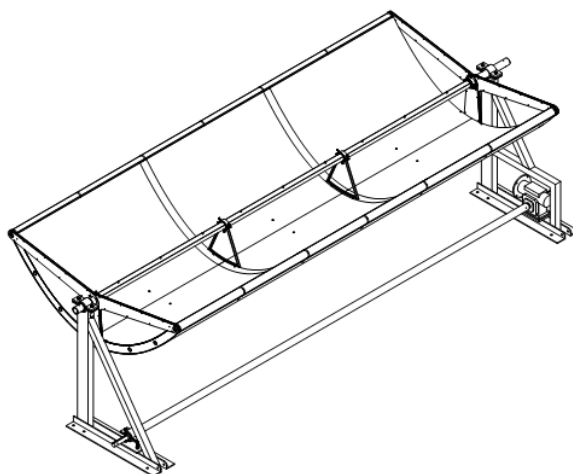


Figura 25 - Rappresentazione CAD 3D di un MicroCPS Sopogy SopoNova™.

Anche la recente disponibilità di nuovi materiali (alcuni utilizzati finora solo nell'industria spaziale) ha consentito di migliorare le prestazioni dei sistemi a concentrazione: rivestimenti a film sottile, nuovi materiali riflettenti, metalli ultraleggeri, materiali resistenti alle elevate temperature (importanti per la

costruzione di ricevitori capaci di operare a temperature dell'ordine di 1.000-2.000 °C e di alimentare sistemi per la produzione di energia elettrica e reattori chimici). Infine, innovazioni di rilievo riguardano le architetture degli impianti, studiate per ridurre al minimo le complicazioni impiantistiche e massimizzare le efficienze dei vari componenti. In Italia, come già sottolineato in precedenza, il tema del solare a concentrazione è di grande attualità scientifica data la notevole disponibilità di energia solare che questa tecnologia potrebbe sfruttare con la costruzioni di centrali nell'Italia Meridionale.

Impianti con collettori parabolici lineari.

In cui specchi di forma parabolica che ruotano su un solo asse riflettono e concentrano i raggi del sole su un tubo (tubo ricevitore) al cui interno scorre un opportuno fluido "termovettore"; questo fluido, generalmente costituito da oli sintetici, trasferisce il calore a un generatore di vapore per la successiva produzione di elettricità tramite un turboalternatore. Attualmente questa tipologia presenta la maggiore diffusione commerciale, dimostrata dall'esperienza di esercizio degli impianti SEGS (Solar Electric Generating Systems), in funzione da metà degli anni ottanta a Kramer Junction nel deserto del Mojave (California), con nove unità per una potenza complessiva di 354 MWe. Questi impianti hanno complessivamente prodotto e immesso in rete ad oggi più di 13 TWh (miliardi di kWh). Tali sistemi offrono fattori di concentrazione più bassi (200) e rendimenti del 12-16%. Rendimenti, prestazioni e costi dipendono in misura significativa dal fluido termo-vettore e dal sistema di accumulo termico. L'olio diatermico a 390 °C consente di produrre vapore a temperature modeste mentre i sali fusi (550°C) consentono di produrre vapore a 540°C per cicli termici con rendimento elevato ed efficienti sistemi di accumulo termico.

Questa tecnologia è oggetto di applicazioni anche su piccoli impianti (con il nome di MicroCPS) finalizzati all'impiego quasi domestico o comunque di medio-piccole dimensioni. In Figura 1Figura 25 è riportato la rappresentazione 3D cad di un sistema abbastanza innovativo prodotto dalla Sopogy con queste finalità chiamato SopoNova.

Impianti a torre centrale.

In cui un sistema di specchi indipendenti (eliostati) insegue il sole e concentra i suoi raggi su un ricevitore fisso posto alla sommità di una struttura a torre. Dal ricevitore un fluido opportuno trasferisce il calore a un generatore di vapore, che alimenta un turboalternatore. Con questo sistema si possono raggiungere fattori di concentrazione, e quindi temperature, superiori rispetto ai collettori parabolici lineari. Uno dei principali impianti realizzati con questa tipologia è il Solar Two negli Usa, da 10 MWe, che ha operato come impianto sperimentale dal 1996 al 1999 a Daggett, California. L'impianto Solar Two è stato il primo a impiegare come fluido termovettore una miscela di sali fusi, costituita da un 60% di nitrato di sodio (NaNO_3), e un 40% di nitrato di potassio (KNO). I fattori di concentrazione raggiungibile con questa tecnologia sono molto elevati (500-2000), le temperature di esercizio fino a 1000°C e rendimenti del 16-17%. La taglia dell'impianto è limitata a potenze dell'ordine di 50 MWe

dalla precisione e dal costo dei sistemi di puntamento nel caso di grande distanza tra specchi e torre.

Impianti con collettori a disco parabolico. Costituiti da un pannello riflettente di forma parabolica che insegue il sole, con un movimento di rotazione attorno a due assi ortogonali, e concentra la radiazione solare su un ricevitore montato nel suo punto focale. Il calore ad alta temperatura viene normalmente trasferito ad un fluido ed utilizzato in un motore, posizionato al di sopra del ricevitore, dove viene prodotta direttamente energia meccanica o elettrica. Questi sistemi forniscono fattori di concentrazione superiori a 2000 che permettono di ottenere alte temperature e rendimenti pari al 30%.

5.1.3 PARAMETRI CARATTERISTICI DEI COLLETTORI.

Efficienza del collettore.

L'efficienza del collettore rappresenta il rendimento energetico del collettore. Generalmente espresso in % è definito così:

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} \quad (5.1.)$$

dove Q_u rappresenta l'energia prodotta (calore) in uscita dal collettore, I_T la radiazione totale incidente sulla superficie e A l'area captante del collettore stesso.

Capacità termica e perdite di carico del collettore.

La capacità termica del collettore è determinata nei test secondo la norma EN 12975-4. Essa misura l'inerzia termica e pertanto il comportamento del collettore quando si riscalda e si raffredda. In presenza di un clima variabile, tipico dell'Europa centrale, si consiglia l'impiego di collettori con una bassa capacità termica. Secondo la norma le perdite di carico nel collettore sono determinate in funzione di diverse portate in un test che può essere eseguito con acqua oppure con una miscela in percentuale variabile di acqua/glicole e tenuta in considerazione la variazione di densità della miscela per il calcolo delle perdite di carico.

Temperatura di stagnazione.

Nel collettore si stabilisce un equilibrio tra apporti d'energia e perdite di calore. Ad una determinata temperatura (temperatura d'arresto o di stagnazione), il flusso energetico nel collettore si arresta. La temperatura d'arresto è tanto maggiore quanto maggiore è l'intensità radiazione solare. Una bassa temperatura d'arresto può significare che l'assorbitore cede, già a basse temperature, un'elevata quantità di calore all'ambiente (insufficiente isolamento termico), oppure che gli apporti solari sono troppo bassi. Quando l'energia utile non viene prelevata, il collettore solare si riscalda fino al punto in cui le perdite di calore raggiungono il livello dell'energia solare assorbita. In questo caso la temperatura raggiunta dal fluido termovettore nel collettore assume un valore tale, definito Temperatura di stagnazione (T_{stag}) che porta ad un rendimento nullo il sistema.

La T_{stag} aumenta con l'aumento degli apporti solari e dipende dai valori di trasmittanza e assorbimento.

La superficie captante del collettore

L'individuazione della superficie captante in modo chiaro e univoco ha grande importanza nella determinazione dell'efficienza energetica del collettore e non solo. Si invita per tanto a informarsi sempre in merito ogni qualvolta ci si trova di fronte ad un nuovo prodotto. In aiuto vengono le definizioni che si trovano in normativa anche se a volte anch'esse in contrasto tra di loro. Nell'appendice della norma EN 12975-2 i valori caratteristici del collettore si riferiscono alla superficie di apertura. Secondo la norma ISO 9806-1 del 1994, invece, essi si riferiscono alla superficie dell'assorbitore.

Partendo da alcune definizioni generali si cercherà qui di fare chiarezza in merito:

- Superficie lorda del collettore o totale è la superficie compresa nei bordi esterni del collettore, generalmente quelli del telaio del collettore.
- Superficie di apertura indica la superficie di apertura del collettore in base all'incidenza, verticale o angolare, della radiazione solare, generalmente si tratta della superficie vetrata visibile, compresa nel riquadro sigillato. Nel caso di collettori a tubi sotto vuoto senza riflettore, essa risulta dal prodotto del diametro interno dei tubi per la lunghezza interna del cilindro non ombreggiato per il numero dei tubi. Nel caso di riflettori applicati sul rovescio o nel collettore, essa è determinata dalla proiezione della superficie formata dall'assorbitore e dal riflettore sul piano del collettore. Usata nella norma EN 12975-2 del 1998.
- Superficie assorbitore corrisponde alla superficie dell'assorbitore per i collettori piani. Per i collettori a tubo, essa corrisponde alle alette dell'assorbitore più la proiezione dei tubi sul piano del collettore. Per i collettori con riflettori essa corrisponde alla superficie in grado di assorbire la radiazione. Usata nella norma ISO 9606-1 del 1994.
- Superficie assorbitore attiva generalmente corrisponde alla superficie dell'assorbitore Aa. Alcuni collettori, comunque, sono costruiti in modo tale che la superficie assorbitore sotto l'intelaiatura del collettore sia più grande della superficie di apertura. La superficie assorbitore attiva è pertanto l'area dell'assorbitore non interessata dall'ombreggiamento dell'intelaiatura (in questo caso è pari alla superficie di apertura). Le norme EN 12975 non fanno uso di questo concetto.

I parametri non sono sempre direttamente comparabili in quanto, a seconda dei vari istituti di collaudo, le dimensioni di un collettore sono correlate in parte a superfici differenti. Si ribadisce quindi che è importante conoscere quali dimensioni di riferimento sono state scelte per i rispettivi valori caratteristici. Inoltre, nel passato e a seconda dello

standard, furono utilizzate per i test procedure differenti riportate in una varia presenza normativa, il che portò a notevoli divergenze dei valori caratteristici. Si dovrebbe quindi sempre indicare nelle curve e tavole dei valori caratteristici il tipo di procedura applicata per le misurazioni e la superficie di riferimento utilizzata.

I risultati dei test da parte dell'Istituto per la Tecnologia Solare SPF in Rapperswil (Svizzera) sono presentati in modo esemplare in quanto viene fatta una distinzione sia tra le procedure per i test sia tra le superfici di riferimento¹²

Una volta l'Istituto SPF effettuava le misurazioni secondo proprie procedure, il che portava a dei risultati (solo apparentemente) migliori rispetto a quelli effettuati secondo le norme EN o ISO. Essendo la superficie di apertura sempre chiaramente definita per tutti i collettori (anche per quelli con riflettori), essa è stata prescelta come superficie di riferimento nella norma EN 12975. Nel caso la resa di un impianto solare sia calcolata usando programmi di simulazione, allora i risultati (nell'ambito delle stesse misurazioni) sono uguali per tutti i casi se, oltre alla corretta superficie del collettore, sono usati anche i suoi corrispondenti valori caratteristici. Ciò nonostante, in tutti i documenti di offerta, dovrebbe essere indicata una superficie di riferimento standard.

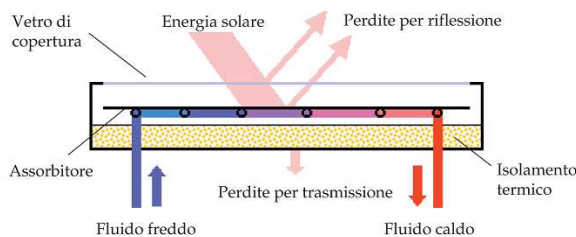


Figura 26 - Schema di funzionamento collettore solare piano.

5.1.4 CALCOLO DELL'EFFICIENZA DEI COLLETTORI

Il modello matematico comunemente impiegato per il calcolo dell'efficienza energetica definita al punto 5.1.3 (riportato anche nella norma EN12975) si basa sull'equazione di Hottel-Whillier-Bliss [4], che definisce il rendimento di un collettore come composto dalla parte ottica e da quella dispersiva. L'energia è infatti fornita sotto forma di irraggiamento solare e poi trasformata da un assorbitore in energia termica. La capacità del vetro di far passare la radiazione (τ) e quella dell'assorbitore di assorbirla (α) costituiscono la parte ottica. La capacità dell'involucro (vetro + "scatola") di trattenere il calore, invece, costituisce la parte dispersiva. La Figura 26 può guidare nella comprensione dei fenomeni fisici coinvolti nello schema di calcolo e far comprendere come

¹² Si consiglia di far riferimento quindi ai suoi test reperibili sul suo sito web alla pagina <http://www.solarenergy.ch>

operano i vari componenti di un collettore solare. Il tutto può essere matematicamente schematizzato come fatto dagli autori del modello nella seguente equazione:

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{\dot{m}c_{pf}(T_0 - T_i)}{AI_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{I_T} \quad (5.2)$$

Dove m rappresenta la portata di massa, c_{pf} il calore specifico, T_0 la temperatura di uscita, T_i la temperatura di ingresso del fluido termovettore e T_a la temperatura dell'ambiente. F_R è un coefficiente termico globale di efficienza del collettore, $\tau\alpha$ è una grandezza sintetica che esprime il prodotto tra la trasmittanza ottica (τ) della copertura del pannello e l'assorbanza ottica (α) dell'assorbitore.

Il coefficiente U_L detto di dispersione non è costante ma varia con la temperatura. Assumendo che, alle basse temperature, una variazione lineare di U_L con $(T_i - T_a)$ rappresenti un'approssimazione accettabile:

$$U_L = U_0 + U_1(T_i - T_a) \quad (5.3)$$

e sostituendo questa nella (5.2)

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{I_T} - F_R U_{L/T} \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (5.4)$$

Che può essere così riscritta:

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{T_i - T_a}{I_T} - a_2 \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (5.5)$$

mettendo in evidenza la dipendenza dai tre parametri principali che caratterizzano la curva di rendimento del collettore secondo le normative internazionali (ASHRAE, CEN): a_0 (fattore di conversione), a_1 (coefficiente lineare di perdita di calore) e a_2 (coefficiente quadratico di perdita di calore). I valori tipicamente assunti da questi coefficienti sono:

$$a_0 \cong 0.5 - 0.9 \quad a_1 \cong 1 - 5 \quad a_2 \cong 0.004 - 0.015$$

Questi coefficienti sono dipendenti dal T considerato. In USA si preferisce la formulazione fin qui descritta che è anche quella implementata in TRNsys facente riferimento alla differenza di temperatura tra la temperatura di ingresso del fluido termovettore e quella ambiente. Qualora si segua la normativa europea che impone la valutazione della curva di efficienza in funzione della differenza tra la temperatura media del collettore e quella ambiente, è necessario introdurre la seguente correzione alle suddette equazioni:

$$a_0^{US} = \frac{a_0^{EU}}{1 + a_0^{EU}/2m_{test}c_{pf}} \quad (5.6. a)$$

$$a_1^{US} = \frac{a_0^{EU}}{1 + a_1^{EU}/2m_{test}c_{pf}} \quad (5.6. b)$$

Il fattore di conversione a_0 indica l'efficienza del collettore quando la differenza tra la temperatura media dell'assorbitore e la temperatura ambiente è uguale a zero. Il collettore è quindi a temperatura ambiente e non ci sono perdite termiche e le uniche perdite sarebbero di natura ottica. Il fattore è pertanto chiamato anche efficienza ottica oppure efficienza a perdita zero. L'efficienza ottica (moltiplicazione del fattore di assorbimento dell'assorbitore con il fattore di trasmissione della copertura) è frequentemente ma erroneamente definita come *efficienza del collettore*.

Le perdite termiche del collettore sono espresse dai due coefficienti di perdita di calore a_1 e a_2 dove a_1 rappresenta la parte lineare e a_2 la parte quadratica, con perdite di calore che aumentano insieme alla differenza di temperatura tra il collettore e l'ambiente circostante. Si tratta di un'approssimazione matematica del modello fisico. Quanto più alti sono i valori a del collettore tanto più bassa è l'efficienza del collettore all'aumentare delle differenze di temperatura fra collettore e ambiente esterno. Si precisa che i fattori a_1 e a_2 non sono quantità fisiche, ma semplicemente valori di interpolazione della curva di efficienza. Pertanto è decisamente fuorviante ricorrere unicamente al loro confronto diretto al fine di descrivere i vari collettori. Nel passato, entrambi i coefficienti erano uniti in un unico coefficiente a_{eff} tuttavia insufficiente. Le curve e i valori caratteristici del collettore sono determinati da istituti di collaudo accreditati che utilizzano metodi standardizzati. Questi istituti definiscono le procedure di test e assicurano la comparabilità dei collettori. Tuttora sono e sono stati contemporaneamente in uso numerosi standard nazionali ed internazionali. Pertanto è essenziale che sia specificato lo standard usato per la determinazione dei valori caratteristici del collettore poiché tali valori, se determinati secondo standard differenti, non sono necessariamente compatibili. A volte i cataloghi delle società non dedicano sufficiente attenzione a questo fatto. Esiste quindi il pericolo che si paragonino collettori usando valori caratteristici o rendimenti solari determinati in base a programmi di simulazione senza tenere conto del fatto che tali valori caratteristici non sono comparabili tra loro. Questo rischio si corre anche se si usa TRNsys in modo superficiale, ma se si fa attenzione alla modellazione matematica che c'è dietro e che fin qui è stata ripresa risulta naturale interrogarsi sui singoli coefficienti. Le efficienze del collettore, misurate nel corso del test, sono riportate in diagrammi di efficienza/differenza di temperatura come per il diagramma in Figura 26. I dati misurati sono introdotti in un modello computerizzato che calcola i valori caratteristici, a_1 e a_2 e traccia la curva caratteristica completa. I resoconti dei test secondo gli standard EN rappresentano l'efficienza in base al quoziente della differenza di temperatura e l'irraggiamento perché così ne risulta una unica curva caratteristica per tutti gli irraggiamenti.

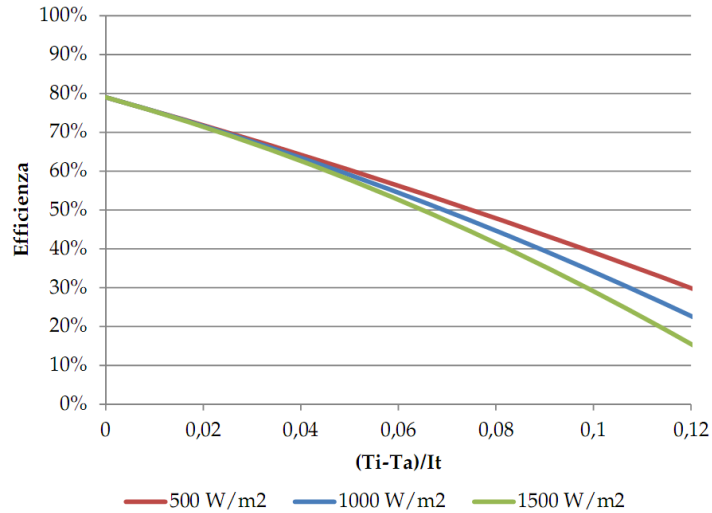


Figura 27 - Efficienza del collettore solare al variare dell'irraggiamento

Se invece si rappresenta l'efficienza in funzione direttamente della differenza di temperatura tra il collettore e l'ambiente circostante, e se si usa l'irraggiamento come parametro, si ottiene, per ogni irraggiamento, una curva caratteristica differente. Un esempio di insieme di curve caratteristiche è mostrato nella [Figura 28](#). In base ad esse si può facilmente desumere quali condizioni di irraggiamenti e quali temperature di esercizio portano ad una data efficienza. La figura mostra chiaramente che l'efficienza del collettore diminuisce con:

- il diminuire della radiazione solare;
- l'aumentare della differenza tra le temperatura tra collettore e ambiente esterno.

La descrizione di qualsiasi collettore comprende la curva caratteristica, la quale però non può sostituire la lista completa di tutti i valori caratteristiche del collettore.

In generale come si avverte chiaramente dalla [Figura 28](#) ogni collettore ha una curva di rendimento che può differenziarsi anche notevolmente. In questa figura vengono tracciate le curve per collettori solari presenti in commercio appartenenti a 3 tipologie differenti per evidenziare il concetto esposto.

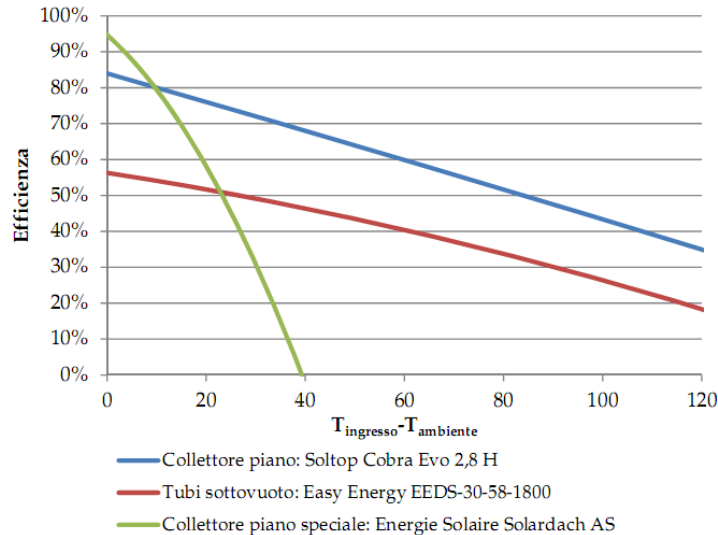


Figura 28 - Efficienza del collettore con irraggiamento di 1000 W/m² per diversi collettori

Correzione della portata.

La valutazione dell'efficienza del collettore per condizioni di portata differente da quella di test (a cui sono riferiti i parametri a_0 , a_1 e a_2 si ottiene attraverso l'impiego del coefficiente r_1 , che interessa sia la parte ottica che dispersiva del modello.

$$r_1 = \frac{F_r U'_L}{F_r U'_L |_{test}} = \frac{F_R(\tau\alpha)_n}{F_R(\tau\alpha)_n |_{test}} = \frac{\varphi(1 - e^{-\frac{1}{\varphi}})}{\varphi(1 - e^{-\frac{1}{\varphi}}) |_{test}} \quad (5.7)$$

Dove

$$\varphi = \frac{\dot{m}c_{pf}}{AF'U_L} = - \left[\ln\left(1 - \frac{AF'U_L}{\dot{m}c_{pf}}\right) \right]^{-1}$$

Il suddetto parametro, determinato alle condizioni di test, si può considerare pressoché costante alle condizioni di funzionamento, e per i collettori a liquidi è circa 1.

Correzione per disposizione in serie.

La correzione in serie di più collettori necessita di un ulteriore coefficiente correttivo denominato r_2 e così definito:

$$r_1 = \frac{1 - \left(1 - \frac{AF'U_L}{\dot{m}c_{pf}}\right)^{N_s}}{N_s \frac{AF'U_L}{\dot{m}c_{pf}}} \quad (5.8)$$

Correzione per angolazione (IAM).

I test sui collettori vengono effettuati generalmente in giornate con buone condizioni di irraggiamento e con una disposizione prossima a quella normale. Per calcolare il rendimento al variare dell'angolo di incidenza solare si usa l'IAM (Incident Angle Modifier) così definibile:

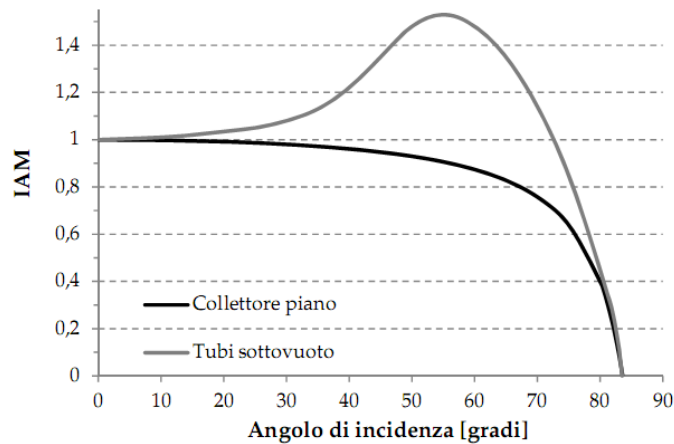


Figura 29 - Rappresentazione IAM trasversale per diverse tipologie di collettore

$$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = \frac{I_{bT} \frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} + I_{dT} \frac{(\tau\alpha)_d}{(\tau\alpha)_n} + I_{gT} \frac{(\tau\alpha)_g}{(\tau\alpha)_n}}{I_T} \quad (5.9)$$

che per collettori piani, sfruttando le simmetrie ottiche, può essere approssimato dalla seguente equazione empirica [3]:

$$\frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) - b_1 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right)^2 \quad (5.10)$$

e per i fattori d'angolo relativi alla componente diffusa (d) e riflessa al terreno (g) si possono stimare ricorrendo alla relazione precedente utilizzando però i seguenti angoli di incidenza effettivi con gli angoli espressi in gradi sessagesimali:

$$\begin{aligned} \theta_d &= 59,68 - 0,1388\beta + 0,001497\beta_2 \\ \theta_g &= 90,00 - 0,5788\beta + 0,002693\beta_2 \end{aligned} \quad (5.11)$$

Le curve di efficienza dei collettori solari, sino ad ora illustrate, sono valide nel caso di un'incidenza verticale dei raggi solari sulla copertura in vetro del collettore. La trasmissione massima di luce (fattore di trasmissione) della copertura del collettore dipende dalle proprietà del vetro e quindi dalla radiazione assorbita dal vetro così come dalla sua riflessione. Se un raggio solare

colpisce la superficie del vetro verticalmente, allora soltanto una piccola parte dell'energia è riflessa dal vetro. Più l'angolo d'incidenza rispetto al piano è basso, maggiore è la riflessione. Con un'incidenza parallela al vetro, la trasmissione tende verso lo zero e il vetro si comporta come uno specchio. Quanto detto è regolato dal fattore IAM dipendente (vedi Figura 29) dall'angolo di incidenza. Nel caso dei collettori piani l'andamento è sempre decrescente al variare dell'angolo, nel caso di tubi sottovuoto oltre che essere asimmetrica, la dipendenza dall'angolo può portare anche a valori superiori all'unità.

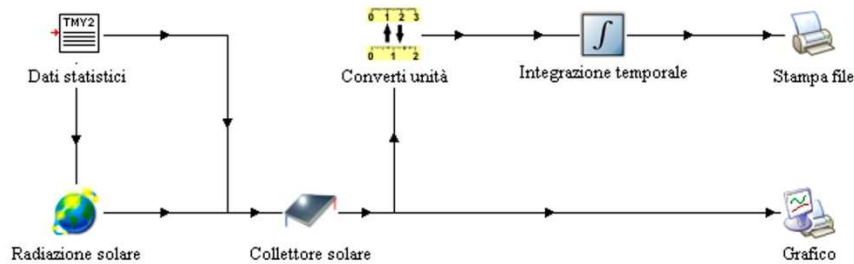


Figura 30 - Modello realizzato con TRNsys per l'analisi di un collettore solare

5.1.5 ESEMPI SVILUPPATI IN TRNsys.

Nella realizzazione del modello si parte da quanto già sviluppato al punto 4.2.1, ove individuato il sito di installazione si arrivava al calcolo della radiazione solare incidente e diffusa. Basta infatti, inserire una Type tra quelle disponibili per la simulazione dei collettori solari per introdurre nel modello il suo calcolo. Esistono diverse types che fanno riferimento a metodi di calcolo differenti. La *Type 1* considera il comportamento del componente ipotizzando una legge quadratica tra efficienza e $\Delta T/I_T$ uguale alla 5.5 e prevedendo 5 metodi per la considerazione dell'IAM:

- Optical mode 1: IAM=1 per ogni angolo di incidenza
- Optical mode 2: si possono impostare i valori b_0 e b_1 dell'equazione 5.10¹³
- Optical mode 3: i valori di $(\tau\alpha)_b/(\tau\alpha)_n$ rispetto a θ sono forniti in un file esterno in modo simmetrico per longitudinale e trasversale.
- Optical mode 4: la subroutine TAU-ALPHA è usata per determinare l'IAM per la radiazione incidente in funzione dell'angolo di incidenza.
- Optical mode 5: i valori di $(\tau\alpha)_b/(\tau\alpha)_n$ rispetto a θ sono forniti in un file esterno distintamente per la parte longitudinale e trasversale.¹⁴

L'Optical Mode 2 è sicuramente da preferire nel caso in cui si abbiano

¹³ Qualora venga fornito l'IAM per un solo valore dell'angolo (ad esempio 50°), conviene usare questa modalità imponendo b_0 e calcolando per sostituzione nella 5.10 il valore di b_1

¹⁴ Questa caratteristica di asimmetria è evidente per i tubi sottovuoto come evidenzia anche la Figura 1 Figura 29

indicazioni dell'IAM per un solo angolo (ad esempio a 50°) e si può calcolare il valore di b_0 per regressione imponendo il $b_1=1$ e non commettendo un grave errore.

La *Type 72* prevede invece la possibilità, tramite la lettura di un file esterno di considerare una legge non lineare generica tra efficienza e $\Delta T/I_T$ e altrettanti metodi per l'IAM come per la *Type 1*. La *Type 73* prevede un modello teorico basato totalmente sulle indicazioni di Hottel-Whillier. E infine la *Type 71* prevede specifiche modellazioni per i pannelli a tubi sottovuoto.

Si è utilizzato la modellazione di Figura 30 per fornire un esempio delle potenzialità dei modelli realizzabili con TRNsys. Si sono impostati i parametri di un collettore solare piano presente in commercio con inclinazione 33° e orientamento Sud. Si è quindi analizzato il funzionamento dello stesso ipotizzando di far scorrere al suo interno del liquido con temperatura di ingresso pari a quella ambiente e portata costante. Si riportano in Figura 31 i risultati in output per due giornate: 21 giugno solstizio d'estate(a) e 21 dicembre (b) solstizio d'inverno. La temperatura di ingresso è indicata in blu, la temperatura di uscita in rosso, l'energia captata dal pannello è indicata in rosa e l'energia trasformata in arancione. Il modello riesce in modo chiara a carpire il comportamento peculiare nei due diversi periodi. In estate le ore di luce sono superiori e di conseguenza anche l'irraggiamento totale diurno permettendo T maggiori che di conseguenza portano ad una efficienza minore nonostante l'energia assorbita sia 4,3 volte l'altra:

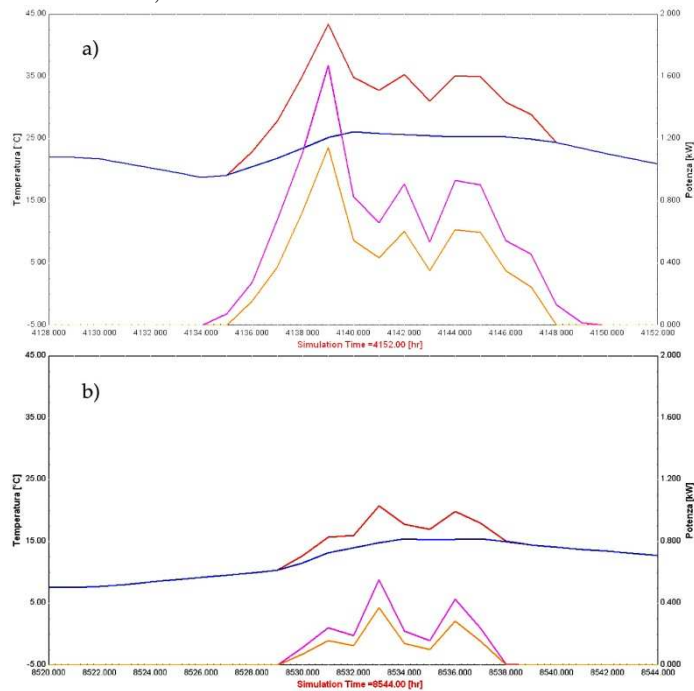


Figura 31 - Simulazione d'esempio con singolo collettore solare piano: (a) solstizio d'estate, (b) solstizio d'inverno.

	ΔT_{Max}	Energia [kWh]		
		captata	trasformata	Eff. [%]
21 dicembre	5,9	2,174	1,435	66
21 giugno	18,3	9,788	6,171	63

Si fa notare che l'energia captata e quella trasformata sono calcolate come l'integrale delle curve di potenza e sono espresse in rapporto alla superficie del collettore solare scelto.

Il modello fin qui elaborato può essere notevolmente ampliato inserendo i componenti aggiuntivi necessari per simulare pompe, serbatoi di scambio, generatori termici ausiliari, ecc. fino a simulare completamente in regime transitorio il comportamento complessivo di un impianto termico a collettori solari. In Figura 32 si riporta il modello realizzabile in TRNsys Simulation Studio.

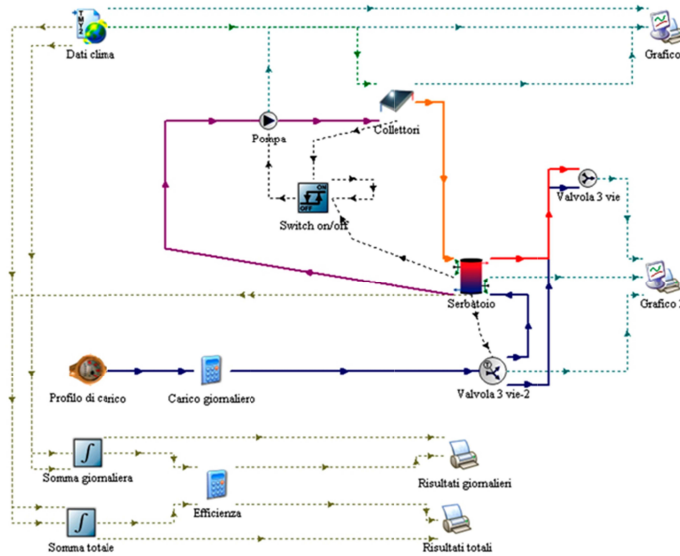


Figura 32 - Modello realizzato con TRNsys per l'analisi di un impianto termico a collettori solari

5.2 I PANNELLI FOTOVOLTAICI

5.2.1 DEFINIZIONE DELL'EFFETTO FOTOVOLTAICO

L'effetto fotovoltaico consiste nella conversione dell'energia solare in energia elettrica. Questo processo è reso possibile dalle proprietà fisiche di alcuni elementi definiti semiconduttori come il silicio. Nel 1839 il fisico francese Alexandre Edmund Becquerel (1820-1891) osservò che l'intensità della corrente tra due elettrodi di platino immersi in una soluzione conduttrice di nitrato di piombo (cella elettrolitica), contenuta in un cilindro di vetro, aumentava se si esponeva la pila così composta alla luce del Sole. Studi successivi condotti

intorno al 1876 da Smith, Adamse Day, portarono alla realizzazione della prima cella fotovoltaica costituita dalla giunzione del selenio (semiconduttore) con alcuni ossidi metallici. Nel 1954 negli USA studi presso i laboratori Bell portarono alla realizzazione delle prime celle fotovoltaiche commerciali in silicio monocristallino. In questo periodo la tecnologia fotovoltaica trovò applicazione in campo aerospaziale. Solo a partire dal 1970 con il manifestarsi delle crisi energetiche di portata mondiale, si iniziò a trasferire la tecnologia fotovoltaica anche nel settore delle costruzioni civili.



Figura 33 – Pannelli fotovoltaici

5.2.2 STRUTTURE E TIPOLOGIE DI PANNELLI FOTOVOLTAICI

.. Struttura e tipologie di cella fotovoltaica

L'elemento che sta alla base della tecnologia fotovoltaica è la cella che è costituita da un materiale semiconduttore, il silicio, di spessore estremamente ridotto (0.3 mm), che viene trattato mediante operazione di "drogaggio" che consiste nel trattare il silicio con atomi di fosforo e boro al fine di ottenere correnti elettriche stabili all'interno della cella. Allo strato di silicio vengono applicati mediante sistema serigrafico dei contatti elettrici metallici (in argento o alluminio) che sono costituiti da una superficie continua sul fronte posteriore ed una griglia sul lato anteriore della cella. La loro funzione è quella di captare il maggior flusso elettrico possibile e convogliarlo all'esterno. La cella viene poi rivestita da uno strato antiriflettente di ossido di titanio per minimizzare la componente di radiazione solare riflessa. Il parametro più importante della cella è il suo rendimento che rappresenta il rapporto tra la massima potenza $P_{max} [W_p]$ che si ottiene dalla cella e la potenza totale della radiazione incidente sulla superficie frontale. Il livello del rendimento diminuisce all'aumentare della

temperatura delle celle, poiché la temperatura ostacola il passaggio degli elettroni nel semiconduttore.

$$\eta = \frac{P_{cella}}{P_{max}}$$

Celle a silicio monocristallino

Hanno un grado di maggior purezza del materiale e garantiscono le migliori prestazioni in termini di efficienza avendo il rendimento più alto pari al 15%. Si presentano di colore blu scurissimo uniforme e hanno forma circolare o ottagonale, di dimensione dagli 8 ai 12 cm di diametro e 0,2 - 0,3 mm di spessore.

Celle a silicio policristallino

Hanno una purezza minore condizione che comporta una minor efficienza ossia il loro rendimento si aggira tra l'11 e il 14%. Si presentano di un colore blu intenso cangiante dovuto alla loro struttura policristallina. Hanno forma quadrata o ottagonale e di spessore analogo al precedente tipo.

Silicio amorfo

Si tratta della deposizione di uno strato sottilissimo di silicio cristallino (1-2 m) su superfici di altro materiale, ad esempio vetri o supporti plastici. In questo caso è improprio parlare di celle, in quanto possono essere ricoperte superfici anche consistenti in modo continuo. L'efficienza di questa tecnologia è sensibilmente più bassa, nell'ordine del 5-6,8 % ed è soggetta a un decadimento consistente (-30 %) delle proprie prestazioni nel primo mese di vita (effetto Stabler-Wronsky) che impone quindi un sovradimensionamento della superficie installata, in modo da consentire in fase di esercizio la produzione di energia elettrica preventivata in sede di progetto.

5.2.3 DALLA CELLA AL SISTEMA FOTOVOLTAICO

I moduli fotovoltaici sono costituiti da diversi strati sovrapposti:

1. lastra di vetro temprato di spessore variabile che ha una duplice funzione: di assicurare una buona trasmittanza termica (> 90%) ed una resistenza meccanica, considerato il fatto che le celle fotovoltaiche sono molto fragili e si rompono facilmente;
2. primo foglio sigillante trasparente in EVA (acetato vinile etilenico) che ha la funzione di garantire la tenuta agli agenti esterni ed un buon isolamento dielettrico;
3. celle fotovoltaiche;
4. secondo foglio sigillante in EVA per l'isolamento posteriore;
5. chiusura posteriore che può essere sia in vetro (si veda i moduli prodotti dalla Schuco International) con la funzione di favorire lo scambio termico e consentire una parziale trasparenza del modulo, o in Polivinilfluoruro (PVF) noto commercialmente come Tedlar® che

viene impiegato in fogli nell'assemblaggio dei moduli fotovoltaici per le sue particolari caratteristiche anti-umidità.

Il sandwich posto in forno di laminazione in cui, tramite riscaldamento a circa 150 °C, si realizza la sigillatura dei componenti, l'EVA diviene trasparente e si eliminano dall'interno della stratificazione l'aria e il vapore contenuti tra gli interstizi in modo da evitare possibili processi di corrosione. Realizzato il laminato il modulo è completato da cornici di alluminio, anche se le recenti realizzazioni propendono per soluzioni prive di cornice, che sono più leggere e preferite in campo architettonico. Nella parte posteriore del modulo fotovoltaico è collegata la scatola di giunzione per i collegamenti elettrici necessari per l'installazione.

I sistemi fotovoltaici possono essere di due tipi:

- sistemi isolati (stand alone);
- sistemi connessi alla rete (grid connected).

I primi devono coprire la totalità della domanda energetica dell'utenza e prevedono per questo un sistema di accumulo a batterie che garantisca l'erogazione di corrente anche nelle ore di minore illuminazione o di buio. Il sistema isolato è costituito da:

- pannelli fotovoltaici;
- regolatore di carica;
- batteria;
- inverter.

I sistemi connessi alla rete cedono ad essa l'eccedenza di energia generata nelle ore di sole e ne acquistano nelle ore in cui il generatore non è sufficiente a coprire il fabbisogno energetico dell'utenza. I sistemi connessi alla rete dispongono perciò di due contatori per valutare i flussi di energia elettrica nelle due direzioni. Nel complesso un sistema connesso è composto dagli stessi componenti descritti per un sistema isolato tranne che per le batterie di accumulo, di cui non ha bisogno dato che può erogare o assorbire potenza direttamente dalla rete elettrica dell'ente distributore.

5.2.4 INTEGRAZIONE DEI SISTEMI FOTOVOLTAICI IN ARCHITETTURA

I pannelli fotovoltaici ultimamente sono oggetto di grande interesse da parte di architetti e progettisti che ne progettano l'inserimento in vario modo all'interno di nuove realizzazioni non di edifici da riqualificare. Per uniformare il lessico usato in tale tipologia di intervento di seguito si definiscono gli interventi di integrazione dei sistemi fotovoltaici negli edifici e la loro generale suddivisione in tre categorie a seconda di quale è l'oggetto dell'intervento:

- interventi retrofit si definiscono quando il sistema fotovoltaico è integrato nella struttura di un edificio esistente. Sono interventi complessi perché non sempre sono soddisfatti tutti i requisiti che garantiscono un'ottima collocazione della superficie dell'impianto. Inoltre tali interventi spesso rendono difficile l'integrazione dell'impianto con la struttura dell'edificio esistente e quindi è

necessario intervenire impiegando telai autonomi da addossare all'edificio.

- integrazione su nuovi edifici si definisce quando il sistema fotovoltaico è integrato alla struttura di un edificio che deve essere costruito, in questo caso è possibile curare contemporaneamente gli aspetti impiantistici ed estetici del progetto.
- integrazione su elementi di arredo urbano si definisce quando il sistema fotovoltaico è integrato alla struttura di elementi che appartengono all'arredo urbano che possono essere ad esempio lampioni stradali, percorsi pedonali coperti, pensiline per il ricovero di biciclette.

5.2.5 MODELLAZIONE MATEMATICA DI UN PANNELLO FOTOVOLTAICO

Il comportamento di un pannello fotovoltaico è influenzato dalla quantità e dalla angolazione della radiazione incidente e dalla temperatura di funzionamento. Una sua modellazione matematica è stata studiata da Townsend (1989) e da Duffie e Beckman (1991). Il modello che è stato implementato in un componente TRNsys per la prima volta è quello di Eckstein (1990) poi ripreso per buona parte nella Type 94. Tale modello elettrico a 4 parametri concentrati (vedi Figura 34) si basa sull'ipotesi seguente:

$$\frac{dI}{dV} |_{V=0} = 0 \quad (5.12)$$

e genera la curva I-V (intensità di corrente/intensità di tensione) caratteristica del sistema in date condizioni di funzionamento (irraggiamento e temperatura). Da essa è possibile dedurre I e V in output dal modulo fotovoltaico e determinare il punto a massima potenza sulla curva:

$$P_{max} = I_{mp} V_{mp} \quad (5.13)$$

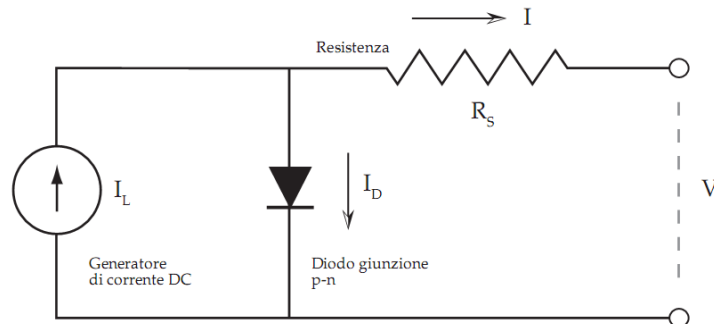


Figura 34 - Schematizzazione circuito elettrico a 4 parametri per modulo fotovoltaico.

con I_{mp} e V_{mp} i corrispondenti valori di corrente e tensione rispettivamente.

Facendo uso delle ben note leggi della teoria dei circuiti e dell'equazione del diodo ideale di Shockley:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{\eta kT}} - 1 \right) \quad (5.14)$$

$$I = I_L + I_0 \left(e^{\frac{q}{\eta kT}(V+IR_S)} - 1 \right) \quad (5.15)$$

dove q è la carica elementare pari a $1,602 \times 10^{-19}C$, T è la temperatura assoluta del modulo, k la costante di Boltzmann pari a $1,3806 \times 10^{-23}J/K$ e η il coefficiente di emissione. Il valore dell'intensità di corrente di saturazione del diodo I dipende dalla temperatura secondo la seguente relazione cubica:

$$I_0 = I_{0,rif} \left(\frac{T_c}{T_{c,rif}} \right)^3 \quad (5.16)$$

La corrente fotovoltaica prodotta è, invece, funzione lineare dell'irraggiamento solare:

$$I_L = I_{L,rif} \left(\frac{G_T}{G_{T,rif}} \right)^3 \quad (5.17)$$

con $I_{0,rif}$, $I_{L,rif}$, $T_{c,rif}$, $G_{T,rif}$ i valori assunti nelle condizioni di riferimento.

Si fa notare che l'equazione 5.15 è fortemente non lineare e richiede l'impiego di metodi numerici per la sua risoluzione. TRNsys implementa per la risoluzione di questa il metodo iterativo alla Newton-Raphson.

Per un pannello fotovoltaico prodotto dalla *Q-cell* con nome commerciale *Q.Pro 210* è stata ricavata la curva I-V caratteristica (vedi Figura 35) per la situazione di riferimento con irraggiamento e temperatura ambiente pari rispettivamente a 1000 W/m^2 e 25° C e i seguenti dati forniti dal produttore:

	$I_{sc}[A]$	$I_{mp}[A]$	$V_{oc}[V]$	$V_{mp}[V]$
Q.Pro 210	8,09	7,57	35,83	28,35

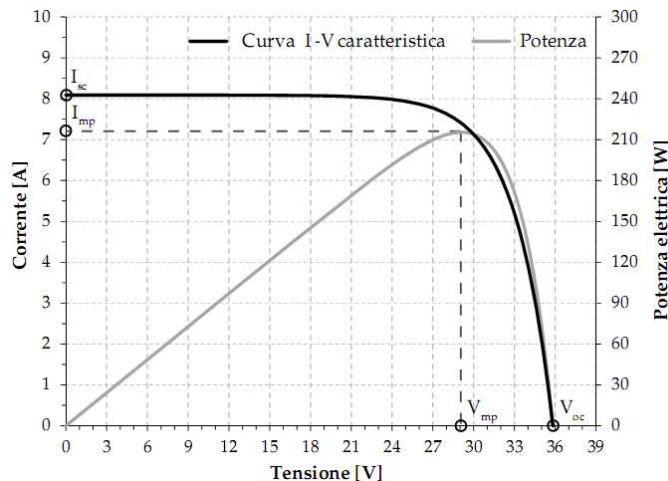


Figura 35 - Esempio Curva caratteristica I-V e relativa curva di Potenza.

CALCOLO DELLA TEMPERATURA DEL MODULO

La Type 94 usa i dati della temperatura secondo i calcoli suggeriti dalla norma NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) per calcolare la temperatura del modulo fotovoltaico T_c a ogni istante. La temperatura NOCT ($T_{c,NOCT}$) è definita come la temperatura di funzionamento del modulo con una velocità del vento di 1 m/s, nessun carico elettrico applicato e una data insolazione e temperatura ambiente che usualmente sono fissate rispettivamente a 800 W/m² e 20° C. Il calcolo si articola attraverso la determinazione della seguente costante:

$$\frac{\tau_\alpha}{U_L} = \frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}} \quad (5.18)$$

e di seguito della temperatura del modulo ad ogni istante:

$$T_c = T_a + \frac{1 - \eta_c / \tau_\alpha}{G \tau_\alpha / U_L} \quad (5.19)$$

dove η_c è il coefficiente di efficienza di conversione del modulo variabile con le condizioni dell'ambiente. $T_{c,NOCT}$, $T_{a,NOCT}$, $G_{T,NOCT}$ sono noti e indicati tra i parametri della type TRNsys (12, 13 e 14 rispettivamente). τ_α è costante oppure variabile e calcolabile in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare.

CALCOLO COEFFICIENTI MODELLO ELETTRICO

TRNsys prevede l'analisi calcolando dai dati forniti dal produttore (I_{sc} , I_{mp} , V_{oc} , V_{mp}) i valori dei parametri elettrici del modello (I_L , I_0 , R_s). I primi possono essere forniti manualmente (Type 94) o essere importati automaticamente da un file esterno (Type 180).

Gli stessi tramite le seguenti correlazioni vengono ricondotti ai parametri impiegati nel modello elettrico:

$$I_{L,rif} \approx I_{sc,rif} \quad (5.20a)$$

$$\eta = \frac{q(V_{mp,rif} - V_{oc,rif} + I_{mp,rif}R_s)}{kT_{c,rif} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,rif}}{I_{sc,rif}}\right)} \quad (5.20b)$$

$$I_{0,rif} = I_{sc,rif} e^{-\frac{qV_{oc,rif}}{\eta k T_{c,rif}}} \quad (5.20c)$$

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \frac{\eta k}{q} \left[\frac{\partial V_{sc}}{\partial T_c} \frac{T_c}{I_{sc,rif}} + \ln\left(\frac{I_{sc,rif}}{I_{0,rif}}\right) - \frac{\varepsilon q N_s}{\eta k T_{c,rif}} - 3 \right] \quad (5.20d)$$

con N_s il numero di celle fotovoltaiche di cui è costituito il modulo, ε la banda proibita del semiconduttore espressa in eV. L'equazione 5.20d di natura differenziale sfrutta la correlazioni tra tensione e temperatura e i relativi parametri forniti dal produttore. Anche in questo caso la risoluzione

dell'equazione è ottenuta con successive iterazioni considerando come limiti fisici $0 \leq R_s \leq R_s^*$ avendo indicato con R_s^* il valore che assume R_s quando $\eta = N_s$.

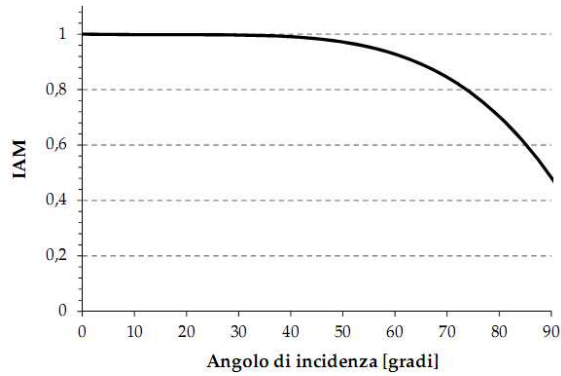


Figura 36 - Correlazione IAM pannello fotovoltaico

CORREZIONE PER ANGOLAZIONE.

Ulteriore precisazione va fatta sulla possibilità della *Type 94* di approssimare ulteriormente il risultato portando il conto le perdite dovute alla variazione dell'angolo di incidenza della radiazione solare. Il modello che si descriverà può essere infatti impiegato o no a scelta dell'utente intervenendo sul parametro trnsys del modello numero 16. La correlazione usata è quella di King (1997) riportata anche in Figura 36:

$$\frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} = 1 - b_1\theta - b_2\theta^2 + b_3\theta^3 - b_4\theta^4 \tag{5.21}$$

con θ l'angolo di incidenza espresso in gradi, $b_1= 1,098 \times 10^{-4}$, $b_2= 6,267 \times 10^{-6}$, $b_3= 6,583 \times 10^{-7}$, $b_4= 1,4272 \times 10^{-8}$.

Per la valutazione in merito alla radiazione diffusa e quella riflessa si usano le stesse correlazioni riportate per i collettori solari all'equazione 5.11.

Dai valori IAM calcolati è possibile così risalire al valore istantaneo corretto della radiazione solare usando la 5.9¹⁵.

5.2.6 ESEMPI SVILUPPATI CON IL TRNSYS

Il TRNSys implementa nella *Type 94* quanto fin qui esposto. E' possibile quindi simulare il comportamento di un impianto fotovoltaico aggiungendo a quanto già visto al punto 4.2.1 il modulo del pannello fotovoltaico come riportato in Figura 37. Tramite la *type 94* è possibile simulare in transitorio il funzionamento dell'impianto fotovoltaico tenendo in considerazione gli effetti della temperatura e dell'irraggiamento nell'intero arco dell'anno. Nel nostro test sono stati introdotti i dati per il pannello fotovoltaico commerciale indicato precedentemente della Q-cell. I parametri di output hanno natura prevalentemente elettrica come la corrente e la differenza di potenziale. E'

¹⁵ Si precisa che per il pannello fotovoltaico in luogo del simbolo "I" per indicare la radiazione si è scelto G e così evitare confusione con la grandezza intensità di corrente

possibile prevedere anche un sistema MPPT (Maximum Power Point Tracking) con posizionamento al punto di ottimo della curva di potenza.

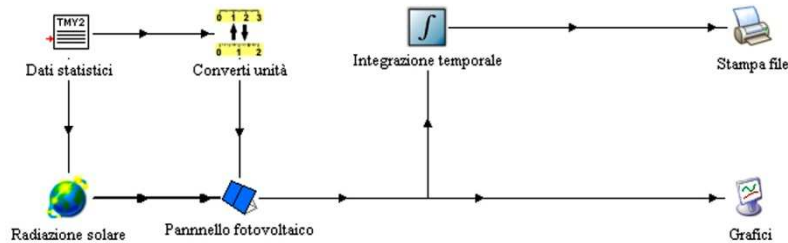


Figura 37 - Modello realizzato con TRNSys per l'analisi di un impianto fotovoltaico

In Figura 38 si è riportato l'output del semplice modello realizzato per testare il pannello in funzionamento giornaliero del pannello fotovoltaico di esempio. Come si nota nell'arco della giornata varia la potenza prodotta, l'intensità di corrente, la differenza di potenziale effettivi e massimi raggiungibili nonché parametri di stato come la temperatura del pannello. Dalle simulazioni svolte si riesce bene a comprendere come un sistema MPPT riesca a concretizzarsi un aumento della resa dell'impianto con valori di incremento variabili. Si osserva che l'incremento dei risultati è maggiore in presenza di giornate con nuvolosità sostenuta e quindi cambi continui e repentini dell'irraggiamento. Sistemi con rapidi tempi di adattamento sono dunque da favorire per la loro reattività. Nei giorni di buon irraggiamento il pannello può raggiungere anche temperature molto elevate che ne influenzano in modo sensibile il funzionamento. La forma della curva IV anche se in generale costante per ogni modulo, può presentare al variare delle tipologie di pannello fotovoltaico scelto anche notevoli differenze che in funzionamento possono portare un comportamento differente dell'intero impianto. Si fa notare come evidenziato da sperimentazione numerica in TRNSys che impianti costituiti da impianti non omogeni non presentano una facile individuazione del punto di massima potenza (MPP) che deve essere ottenuto come l'ottimo del sistema e non dei singoli pannelli.

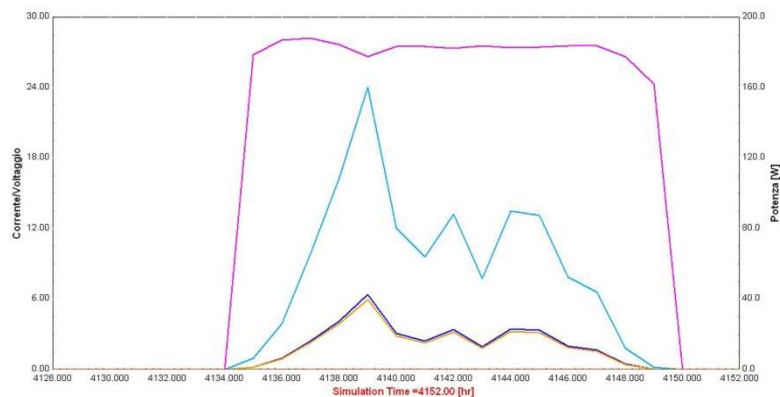


Figura 38 - Output giornaliero TRNSys funzionamento pannello fotovoltaico.

5.3 IL SOLAR COOLING

Il raffrescamento di edifici può essere affrontato in modo efficiente rifacendosi ai concetti già più volte richiamati di efficienza energetica e impiego di fonti rinnovabili. L'utilizzo di sistemi passivi va sicuramente incoraggiato e così ridurre i carichi termici richiesti agli impianti termici che potranno essere dimensionati quindi, ottimizzandone le dimensioni e la tipologie per ridurre al massimo il loro impatto economico e ambientale. I comuni impianti di raffrescamento prevedono l'impiego di macchine frigorifere a compressione che impiegano energia elettrica in cicli meccanici per produrre cicli termici capaci di sottrarre energia termica a dati fluidi termovettori. Questi sistemi sono caratterizzati da costi di installazione relativamente bassi, funzionamento regolare, ma grande rumorosità e una buona richiesta di manutenzione degli organi meccanici in movimento con possibili guasti agli stessi. Altro sistema è quello di usare macchine ad assorbimento capaci di impiegare l'energia termica come motore della loro attività. Esse infatti, sottraggono energia da una fonte ad alta temperatura e la utilizzano per sottrarre energia da un'altra fonte e così abbassare la temperatura di quest'ultima ulteriormente.

Si intuisce già una possibile integrazione con fonti rinnovabili dei due sistemi. Le macchine a compressione potrebbero essere alimentate da parte dell'energia prodotta con fotovoltaico e le macchine frigorifere ad assorbimento con l'energia termica captata dai collettori solari. Quest'ultima modalità di operare dà vita ai sistemi di solar cooling che come vedremo nel loro complesso generano un processo ad efficienza energetica superiore rispetto a quella dei sistemi fotovoltaico + macchina a compressione.

Efficienza globale

Quanto fin qui affermato è supportato da semplici calcoli sull'efficienza dei singoli componenti come la seguente relazione mostra:

$$\eta_1 = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (5.22)$$

dove per η_1 si intende l'efficienza del sistema di captamento solare (collettore solare o pannello fotovoltaico) mentre con η_2 si intende l'efficienza della macchina frigorifera. Per i pannelli fotovoltaici come già accennato si possono avere i seguenti valori di efficienza (η_1):

Celle in silicio monocristallino	0,13-0,16
Celle in silicio policristallino	0,12-0,14
Celle a film sottile	0,5-0,9
Celle ibride HIT	> 0,17

Per quello che concerne le pompe di calore si hanno valori del rendimento indicati con il termine COP indicativamente attorno al valore 3. E quindi la 5.22 fornirà come rendimento totale medio del sistema

$$\eta_{f+c} = 0,4$$

Per i sistemi di solar cooling (collettori solari + macchine ad assorbimento) abbiamo valori di efficienza diversi. I collettori a differenza dei pannelli fotovoltaici riescono meglio a sfruttare l'irraggiamento solare ed a trasformarlo in calore, i valori di efficienza di tali pannelli sono rappresentati dalla formula

5.5 che in funzioni standard di funzionamento assume valori pari a 0,7-0,8. Le macchine ad assorbimento a seconda della loro tipologia hanno dei coefficienti di efficienza COP pari a 0,7-0,9. Considerando i valori medi dei coefficienti di efficienza avremo un valore del rendimento totale del sistema:

$$\eta_{c+a} = 0,64$$

Si è mostrato come possa essere energeticamente più conveniente raffrescare con l'accoppiata collettori solari - macchina ad assorbimento. Questo è dovuto soprattutto ai maggiori rendimenti dei collettori solari rispetto ai pannelli fotovoltaici, senza considerare la possibilità di sfruttare gli stessi collettori solari anche in inverno per produzione di ACS o come integrazione degli impianti di riscaldamento. Ulteriori considerazioni da non sottovalutare sono che:

- la fonte solare è abbondante quando si necessita di raffrescamento;
- avere sistemi di captazione a maggiore efficienza (+600%) permette un migliore sfruttamento della superficie a disposizione e quindi la possibilità in presenza di scarse estensioni di ottenere comunque risultati interessanti.

5.3.1 MACCHINE FRIGORIFERE AD AS/ADSORBIMENTO

Le macchine ad as/adsorbimento, che utilizzano materiale assorbente rispettivamente in forma solida o liquida, producono acqua refrigerata da utilizzare nelle reti di distribuzione del freddo che servono l'utenza. Per entrambi i sistemi non sono ancora molte le macchine disponibili per applicazioni di piccola taglia (ossia con capacità inferiore ai 20 kW), e rari sono i sistemi con capacità inferiore ai 100 kW. L'utilizzo delle stesse rimane quindi oggi interdetto all'impiego di massa in campo residenziale ma rimane perfettamente applicabile nell'edilizia pubblica e in generale nel terziario dove le potenze installate possono raggiungere le migliaia di kW.

Macchine ad Assorbimento

Sono moltissimi al mondo i produttori che commercializzano macchine di capacità frigorifera superiore ai 100 kW. Fino a qualche anno fa solo una macchina di bassa capacità (35 kW) era disponibile sul mercato¹⁶.

Recentemente i sostanziosi sforzi di ricerca e sviluppo su nuove macchine di piccola capacità (< 25 kW) hanno già portato all'introduzione sul mercato di varie nuove macchine frigorifere di particolare interesse per le applicazioni del solar cooling nel segmento di mercato del piccolo residenziale (che in Italia rappresenta ancora la stragrande maggioranza del mercato nazionale degli impianti solari termici). Sul mercato sono disponibili fondamentalmente due tecnologie:

- Macchine a singolo effetto
- Macchine a doppio effetto

¹⁶ Questa macchina (WFC10 of Yazaki / Giappone) è stata in assoluto la più utilizzata nei primi impianti dimostrativi di solar cooling

Le più diffuse tra le macchine ad assorbimento (a singolo effetto), date le basse temperature a cui deve essere fornito il calore (tra i 80° e i 110° C) sono adatte all'utilizzo con impianti solari termici di tipo convenzionale. Questo ha come conseguenza che le tecnologie di captazione della radiazione solare più adatte possono essere collettori piani selettivi, CPC o a tubi evacuati, come nel caso della maggior parte delle installazioni realizzate ad oggi nel mondo. L'uso di macchine a doppio effetto, che presentano una maggiore efficienza (COP) nella conversione dell'energia termica di alimentazione in effetto frigorifero utile, rispetto alle prime. Queste devono essere alimentate a livelli di temperatura superiori (fino a 160°C) e vanno quindi accoppiate a tecnologie solari a media temperatura basate su sistemi a concentrazione; più adatte a località ove il livello di radiazione diretta rispetto alla totale sia particolarmente consistente (tipicamente Europa del sud, equatore, etc.). Va aggiunto che gli impianti solari a media temperatura hanno un mercato molto meno maturo dei

Le più diffuse tra le macchine ad assorbimento (a singolo effetto), date le basse temperature a cui deve essere fornito il calore (tra i 80° e i 110° C) sono adatte all'utilizzo con impianti solari termici di tipo convenzionale. Questo ha come conseguenza che le tecnologie di captazione della radiazione solare più adatte possono essere collettori piani selettivi, CPC o a tubi evacuati, come nel caso della maggior parte delle installazioni realizzate ad oggi nel mondo. L'uso di macchine a doppio effetto, che presentano una maggiore efficienza (COP) nella conversione dell'energia termica di alimentazione in effetto frigorifero utile, rispetto alle prime. Queste devono essere alimentate a livelli di temperatura superiori (fino a 160°C) e vanno quindi accoppiate a tecnologie solari a media temperatura basate su sistemi a concentrazione; più adatte a località ove il livello di radiazione diretta rispetto alla totale sia particolarmente consistente (tipicamente Europa del sud, equatore, etc.). Va aggiunto che gli impianti solari a media temperatura hanno un mercato molto meno maturo dei sistemi a bassa temperatura.



Figura 39 – Esempio di macchina ad assorbimento.

Ogni tecnologia può essere ulteriormente classificata in base all'alimentazione al generatore che può essere:

- *Macchine ad assorbimento diretto*
- *Macchine ad assorbimento indiretto a vapore*
- *Macchine ad assorbimento indiretto ad acqua calda*

a seconda della fonte di calore che cede energia al sistema come compenso per il fenomeno di sottrazione di calore alla fonte a bassa temperatura.

Macchine ad Adsorbimento

A dispetto degli alti costi di investimento, rispetto alle macchine ad assorbimento, diversi impianti pilota sono stati realizzati con tecnologia ad adsorbimento. La ragione è che queste macchine hanno temperature di attivazione del ciclo significativamente inferiori (da 60°C) e garantiscono quindi un funzionamento migliore e per un maggior numero di ore l'anno dell'impianto solare. Anche in questo caso le tecnologie di captazione della radiazione solare più adatte sono quelle a bassa temperatura: collettori piani selettivi, CPC, tubi evacuati. Normalmente la coppia di materiali usati è acqua e silica gel, alcune delle macchine che stanno per essere introdotte sul mercato sono basate sull'uso di acqua e zeolite. In media i COP di queste macchine sono più bassi di quelli delle macchine a assorbimento a singolo effetto con valori medi di circa 0,6. Anche in questo settore nel range di potenza tra i 7 e i 10 kW velocemente le aziende stanno introducendo sul mercato nuovi modelli.

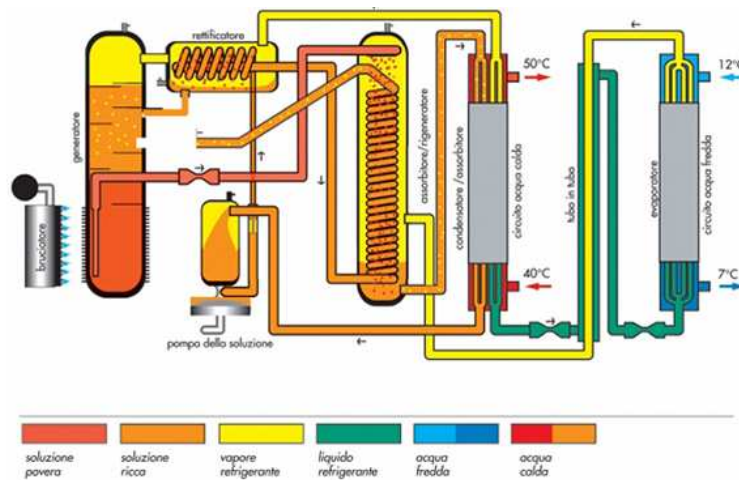


Figura 40 - Schema funzionamento macchina ad assorbimento

5.3.2 MODELLAZIONE MATEMATICA: MACCHINA FRIGORIFERA AD ASSORBIMENTO

Il principio di funzionamento di queste macchine, illustrato in modo accurato, in Figura 40, si basa sull'impiego, come fluido di lavoro, di una miscela,

generalmente binaria, ovvero costituita da due sostanze: una, più volatile, funge da refrigerante, l'altra da solvente. La soluzione diluita di refrigerante e solvente contenuta nell'assorbitore (A) viene trasferita mediante una pompa nel generatore (G) dove viene riscaldata mediante energia termica fornita direttamente dalla fiamma di un combustibile (sistemi a fiamma diretta) oppure mediante un opportuno fluido termovettore (sistemi indiretti). Nel generatore, la sostanza più volatile, ovvero il refrigerante, evapora, cosicché la fase liquida residua risulta più ricca di solvente rispetto alle condizioni iniziali (soluzione concentrata). A questo punto, il refrigerante evaporato, separato dalla soluzione concentrata, può essere avviato verso il condensatore (CO) che svolge una funzione del tutto analoga a quella che si avrebbe in un ciclo a compressione di vapore, così come la valvola di laminazione e l'evaporatore (EV) attraversati dal refrigerante dopo il processo di condensazione. Nel frattempo, la soluzione concentrata ottenuta al generatore viene ricondotta all'assorbitore, dove, grazie al suo basso contenuto di refrigerante, è in grado, per l'appunto, di assorbire il refrigerante in fase vapore proveniente dall'evaporatore, e di ricreare le condizioni di concentrazione iniziali, rendendo possibile il funzionamento ciclico e dunque continuo del sistema. Poiché il processo di assorbimento è esotermico, per garantirne il corretto svolgimento è necessario sottrarre continuamente calore a questo componente: il processo è dunque perfettamente simmetrico a quello di evaporazione, endotermico, che ha luogo al generatore. Tra l'altro, il corretto controllo della temperatura di esercizio dell'assorbitore rappresenta un problema molto delicato: se il raffreddamento non dovesse essere adeguato, infatti, questa temperatura tenderebbe a salire, fino a raggiungere il cosiddetto limite di cristallizzazione della soluzione, e la presenza di cristalli in fase solida è evidentemente incompatibile con il corretto funzionamento della macchina, potendo indurre il blocco del flusso nella pompa. In alcuni casi, questo problema rende indispensabile il ricorso al raffreddamento ad acqua di torre, invece che ad aria. Ciò ovviamente può rappresentare, soprattutto per macchine di piccola taglia, una complicazione impiantistica indesiderata, introducendo, tra l'altro, una fonte di rumore in una macchina di per sé molto silenziosa, e quindi privilegiata in alcune applicazioni particolari. Il confronto con le macchine elettriche assicura, comunque, che, per grosse potenzialità, i costi di abbattimento del rumore per gruppi ad assorbimento rimangono inferiori rispetto alle unità elettriche. Per ridurre il fabbisogno di energia termica del generatore, a parità di ogni altra condizione, e migliorare dunque l'efficienza del sistema, normalmente tra assorbitore e generatore viene inserito uno scambiatore di calore, in cui la soluzione diluita proveniente dalla pompa viene riscaldata da quella concentrata proveniente dal generatore. La richiesta di energia elettrica risulta molto contenuta, in quanto il lavoro assorbito dalla pompa è al più il 10% di quello che sarebbe necessario per un tradizionale ciclo a compressione di vapore, a parità di resa frigorifera. Il principale vettore energetico necessario al funzionamento del sistema è dunque rappresentato dall'energia termica richiesta al generatore, che, nel caso sia fornita da un fluido termovettore, piuttosto che dalla fiamma diretta di un combustibile, dovrà essere disponibile ad una temperatura sufficientemente elevata da garantire da un lato un'efficace

evaporazione del refrigerante, e dall'altro la possibilità di far condensare lo stesso alla temperatura richiesta. I valori di temperatura tipici sono intorno agli 80 - 90 °C, per cui l'alimentazione può essere effettuata con acqua calda, surriscaldata o con vapore a bassa pressione: per ogni fissato modello, la resa frigorifera sarà sempre una funzione crescente della temperatura del fluido con il quale è alimentato il generatore; il COP è invece meno sensibile al livello di temperatura dell'input termico al generatore che in genere rappresenta il più importante coefficiente di prestazione per la macchina frigorifera. Questo è così definito:

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{gen} + Q_{aux}} \quad (5.23)$$

ovvero come il rapporto tra l'energia utile ottenuta all'evaporatore in raffreddamento (Q_{evap}) e la somma dell'energia termica in ingresso (Q_{gen}) e di quella elettrica consumata per ausiliari e pompa di circolazione della soluzione (Q_{aux}). Quest'ultima viene abitualmente trascurata essendo di diversi ordini inferiore a quelle in gioco.

I parametri principali del sistema sono le quantità di energia scambiate tra i vari componenti della macchina e le temperature. L'equazione fondamentale che regola il processo è quindi la legge fondamentale della calorimetria:

$$Q = \dot{m}C\Delta T \quad (5.24)$$

il calcolo parte dai dati forniti dall'utente in un file apposito detto *Dynamic Data Subroutine File*.

In questo sono riportati i valori della frazione della capacità nominale della macchina e della frazione dell'input energetico in funzione delle temperatura di ingresso del liquido caldo (T_{Hin}), del liquido di raffreddamento (T_{Cin}), della temperatura di set-point per il liquido da raffreddare (T_{CHout}) e della:

$$f_{DL} = \frac{\dot{Q}_{CH}}{\dot{Q}_{max}} \quad (5.25)$$

ove con Q_{max} è indicata la potenza nominale della macchina e con:

$$\dot{Q}_{CH} = \dot{m}C_{CH}(T_{CHin} - T_{CHout}) \quad (5.26)$$

l'energia sottratta al liquido da refrigerare. Le altre grandezze si calcolano per differenza dall'equazione di equilibrio energetico:

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_H + \dot{Q}_{CH} + \dot{Q}_{aux} \quad (5.27)$$

6. RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA: PROGETTO IN TRANSITORIO

INDICE CAPITOLO

6.1	ITER DI PROGETTAZIONE EFFICACE	73
6.2	ANALISI PROGETTUALE	74
6.2.1	LA RACCOLTA DEI DATI	76
6.2.2	ESITI E INTERVENTI PROGETTUALI	77
6.3	ANALISI ENERGETICA	77
6.3.1	BILANCIO ENERGETICO	79
6.3.2	VALORI DI RIFERIMENTO	80
6.4	ANALISI ECONOMICA	81
6.4.1	INDICI DI ANALISI FINANZIARIA	82

La riqualificazione degli edifici esistenti è sempre più un argomento di interesse in ambito tecnico ed economico e sta diventando con il passar del tempo una vera e propria necessità. Il patrimonio edilizio sta invecchiando inesorabilmente e buona parte degli edifici esistenti sono stati progettati senza alcuna attenzione al loro impatto energetico. Efficienza energetica e impiego di risorse rinnovabili sono input progettuali relativamente recenti e quindi inattesi quasi nella totalità degli edifici costruiti più di 10/15 anni fa. A questo va aggiunto che l'Italia, in particolare, è una nazione dotata di un patrimonio edilizio dal grande valore storico ,da dover preservare intatto nel tempo, ma sicuramente responsabile di grandi consumi energetici essendo stato realizzato con scarsa attenzione tecnica al problema dei consumi . All'epoca di realizzazione di molti di questi edifici era addirittura culturalmente lontana la soddisfazione di massa del comfort termoisolometrico degli ambienti.

6.1 ITER DI PROGETTAZIONE EFFICACE

L'intervento di un progettista esperto negli interventi di riqualificazione energetica è sicuramente indispensabile, trovandosi molto spesso di fronte a un livello sicuramente alto di complessità progettuale, ove possono essere presenti vincoli di varia natura oltre che tecnico-scientifica. La riqualificazione energetica è una vera e propria sotto branca della progettazione efficiente e del risparmio energetico in edilizia, una specializzazione che necessita grande sensibilità ed esperienza. Alla base di una buona progettazione rimane il metodo, la capacità di approccio scientifico alla problematica energetica. E' indispensabile seguire un corretto iter progettuale che schematicamente si è riportato in Figura 41. Senza trascurare alcun aspetto della progettazione, un buon intervento di riqualificazione dovrebbe svilupparsi contemporaneamente su tre linee vicine e parallele tra loro ma operativamente e concettualmente separate:

- *l'analisi progettuale;*
- *l'analisi energetica;*
- *l'analisi economica.*

L'analisi progettuale è un misto di esperienza, sensibilità e creatività, requisiti fondamentali per il buon progettista. A questi si affianca un'attenta e rigorosa analisi energetica sostanziata dall'impiego di affidabili e realistiche simulazioni numeriche che supportino le intuizioni. Il tutto va poi calato nella realtà spazio-temporale attraverso un modello economico che permetta di calcolare la convenienza economica delle singole scelte progettuali con relativi costi di investimento e tempi di ritorno.

6.2 ANALISI PROGETTUALE

Il punto di partenza è l'analisi dell'esistente. Tutto parte dalla diagnosi. Trovandoci di fronte ad un'opera già costruita sarebbe un errore concettuale notevole quello di far riferimento ad una certificazione energetica per appurare lo stato energetico dell'edificio. Questa infatti, è il sunto dell'attività progettuale che inevitabilmente non è altro che una stima presunta del comportamento energetico dell'edificio. La situazione reale, a volte anche molto differenti da quella stimata, deve suggerire le possibili scelte progettuali per il caso specifico. L'approccio da adottare per l'analisi del reale è sicuramente quella della diagnosi energetica.

Questo delicato punto di partenza dell'attività progettuale parte con l'audit energetico. Questo consiste nell'analisi dei consumi e dei fabbisogni energetici per determinare i potenziali interventi di risparmio e di efficienza. Si tratta di un'analisi approfondita condotta attraverso sopralluoghi presso l'unità produttiva e l'esame di documenti forniti dal committente. Vengono raccolti i dati di consumo e costo energetico ed inoltre dati sulle utenze elettriche, termiche, frigorifere, acqua (potenza, fabbisogno/consumo orario, fattore di utilizzo, ore di lavoro, etc.). Su questa base si procede nella ricostruzione dei modelli energetici. Da tali modelli sarà possibile ricavare la ripartizione delle potenze e dei consumi per tipo di utilizzo (illuminazione, condizionamento, freddo per processo e per condizionamento, aria compressa, altri servizi, aree di processo), per cabina elettrica, per reparto, fascia oraria e stagione.

La situazione energetica, così inquadrata, viene analizzata criticamente ed in confronto con parametri medi di consumo al fine di individuare interventi migliorativi per la riduzione dei consumi e dei costi e la valutazione preliminare di fattibilità tecnico-economica.

Nel caso poi l'analisi si svolga su singole realtà le sue molteplici utilità possono servire contemporaneamente a più figure:

- ai proprietari o gestori degli immobili, per verificare le performance energetiche degli stessi;
- agli Energy Manager delle aziende, per razionalizzare i processi produttivi o i consumi interni nel terziario;
- ai progettisti per determinare quali interventi realizzare nella propria struttura.

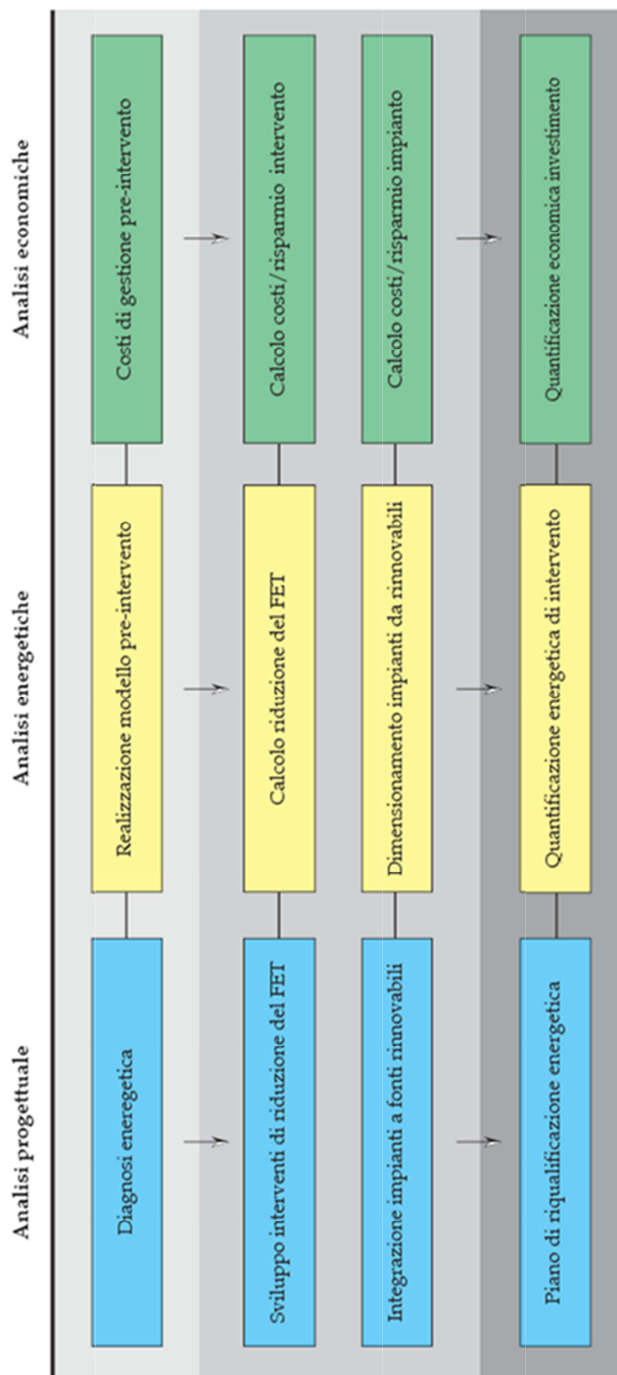


Figura 41 – Schema logico per gli interventi di riqualificazione energetica.

Le diagnosi occupano, o meglio dovrebbero occupare, un ruolo di primo piano nella definizione di obiettivi di pianificazione energetica, ove senza la conoscenza dei consumi e dell'andamento dei flussi energetici ogni ipotesi di intervento risulta rischiosa e potenzialmente dannosa. E' essenziale comprendere che non esiste una soluzione unica ai problemi energetici, ma ogni realtà deve individuare quella più indicata. Le soluzioni energeticamente efficienti applicabili possono essere molte e le scelte andrebbero effettuate considerando la situazione specifica e coinvolgendo tutte le figure coinvolte nella gestione energetica dell'immobile.

Se alcuni degli elementi indicati si possono reperire direttamente in loco, altri potrebbero presupporre uno studio approfondito a livello territoriale, che non può prescindere dall'effettuazione di diagnosi energetiche, perlomeno a campione. L'importante è non fermarsi ai luoghi comuni ed a considerazioni semplicistiche. Puntare su una tecnologia di per sé efficiente, senza tenere conto degli effetti della scelta a livello di filiera energetica, può anche rivelarsi dannoso.

Volendo scendere nel dettaglio una buona diagnosi energetica si compone di:

- *un'analisi dei dati di consumo storici;*
- *una raccolta di dati strumentali;*
- *un'analisi dei comportamenti degli occupanti correlati all'uso dell'energia;*
- *uno studio tecnico-economico-finanziario degli interventi realizzabili e delle iniziative di (in)formazione agli occupanti.*

6.2.1 LA RACCOLTA DEI DATI

La raccolta dati è la parte principale della diagnosi energetica e deve poter permettere di quantizzare:

- *dimensioni e caratteristiche delle strutture e degli impianti;*
- *stato degli impianti (età, manutenzione, etc);*
- *fattori di utilizzo degli impianti;*
- *razionalità degli impianti;*
- *consumi energetici globali e dei singoli impianti;*
- *dati sulla produzione e sull'occupazione;*
- *costo dei vettori energetici utilizzati;*
- *costo del denaro per la realtà considerata;*
- *capitale a disposizione per interventi.*

Già in una prima ricognizione della realtà allo studio si possono cominciare a raccogliere le prime informazioni utili. Un aspetto essenziale ai fini di un lavoro buono ed efficace, anche se spesso trascurato o ignorato, è quello di comprendere le attitudini della dirigenza e del personale nei confronti dell'efficienza energetica. Già nel corso della prima visita è bene cercare di capire chi in qualche modo si occupa di energia nell'azienda, direttamente (energy manager, responsabile acquisti energia, etc) e indirettamente (conduttori, manutentori, personale).

Il secondo passo è quello di identificare lo stato delle strutture e degli impianti. Che si tratti di un edificio o di un capannone industriale, la tipologia e

le condizioni dell'involucro hanno una diretta influenza sia sui consumi per la climatizzazione, sia in alcuni casi sulle scelte impiantistiche (es. sistemazione centrali e percorsi delle reti di distribuzione) o sulle abitudini degli occupanti. Per gli impianti è necessario effettuare un censimento accurato che ne riporti le caratteristiche essenziali ai fini della diagnosi. Il reperimento dei dati può avvenire in vario modo:

- *studio di documenti (bollette, planimetrie) e software associati ad un sistema di monitoraggio;*
- *misure strumentali (energia, potenza);*
- *raccolta di dati climatici;*
- *effettuazione di rilievi metrologici (dimensioni).*

Il primo punto risponde almeno alla richiesta dei consumi globali del committente¹⁷.

6.2.2 ESITI E INTERVENTI PROGETTUALI

Attraverso l'analisi dei dati raccolti si cerca di raggiungere i primi obiettivi senza alcun intervento struttura su impianti e sistemi termici razionalizzando i flussi energetici, recuperando l'energia che viene dispersa, individuando possibili interventi tecnici per efficientare impianti e consumi e riducendo per il possibile i costi di approvvigionamento delle fonti energetiche.

Una volta esaurita la possibilità di migliorare l'efficienza attraverso la regolazione degli impianti, rimangono gli interventi che prevedono una spesa. Da questo punto di vista, dopo che l'analisi dei dati raccolti ha portato all'individuazione di un pacchetto di possibili proposte, prima di passare di concludere la fase di analisi progettuale è bene verificare se gli interventi sono fisicamente e razionalmente realizzabili senza interferire con i processi o con le attività svolte nella struttura e se il committente ha o può reperire le risorse per la realizzazione degli interventi.

6.3 ANALISI ENERGETICA

Di pari passo con l'analisi progettuale deve procedere l'analisi energetica che affronta direttamente le problematiche termico-energetiche dell'intervento. La parte di modellazione e di calcolo è quella predominante. La scelta dei modelli matematici atti a quantificare il comportamento fisico di edificio e impianti deve essere fatta con attenzione. Si deve ben gestire la voglia di semplificare al massimo, perdendo a volte elementi ineludibili del fenomeno, e quella di realizzare modelli analiticamente troppo complessi di non facile gestione e a volte neanche dalla tanta efficacia risolutiva.

La fase di analisi progettuale entra in gioco direttamente come punto di partenza per la verifica del modello del reale realizzato. Il modello che si realizza

¹⁷ Nel caso elettrico per gli utenti medi e grandi è possibile ottenere anche i diagrammi di carico orari.

infatti deve avvicinarsi al massimo al comportamento reale dell'edificio. E' la diagnosi energetica che porta a verificare direttamente la correttezza del modello matematico di astrazione realizzato. A volte dalla taratura del modello si determina anche dati e parametri non calcolati direttamente ma ad essi legati indirettamente come efficienze di sistema, perdite e ponti termici, infiltrazioni, ecc.

La realizzazione di un modello in regime stazionario è il minimo che si possa fare. Molti sono i modelli che sono stati prodotti negli anni da ricercatori e scienziati per affrontare i problemi di trasmissione del calore e termodinamica che molto spesso si sono fermati ad un'analisi in regime stazionario del fenomeno senza considerare la variabile tempo. Questo approccio è stato imposto dall'eccessivo onere computazionale derivante da un'analisi (senza dubbio più realistica) in regime transitorio.

Il calcolo in regime transitorio dà, invece, risultati più affidabili, meglio esprimendo il comportamento estivo e nel dettaglio gli apporti solari, le inerzie termiche, la contemporaneità temporale tra offerta e domanda energetica. Gli stessi impianti a energie rinnovabili analizzati nel [Capitolo 5](#) possono essere valutati e inseriti nel calcolo con maggiore precisione. Come si è visto i diversi componenti che compongono ciascun impianto devono comunque essere dimensionati da un progettista ben conscio delle basi fisiche che ogni componente chiama nel suo funzionamento. Anche la quantizzazione di molti fenomeni fisici risente in modo determinante del fattore tempo e in particolare l'ambito termico-energetico delle rinnovabili essendo soggetto a fonti non costanti nel tempo.

Oggi l'impiego dei moderni sistemi di calcolo permette di superare questa limitazione e di favorire l'uso di software dedicati sempre più potenti, veloci e alla portata di tutti, capaci di fornirci dati molto precisi e affidabili dove il modello assume sempre forme e caratteristiche più complesse, i parametri in gioco aumentano e si arriva ad avere una buona simulazione della realtà. In ambito scientifico esistono software di riferimento usati ormai da anni per l'analisi di casi e problematiche dalla complessità differente. In questo campo di sicura grande affidabilità e diffusione è il software TRNsys.

Il software TRNsys può essere di grande aiuto nella determinazione della prestazione termica di un edificio, attraverso la realizzazione di un modello capace di quantificare l'incidenza energetica di ciascun intervento ipotizzato durante la fase progettuale. Il parametro di riferimento a valle del calcolo sarà dunque il fabbisogno termico dell'edificio e del sistema nel suo complesso che dal punto di vista concettuale si può ricondurre ad un'applicazione del concetto di bilancio energetico.

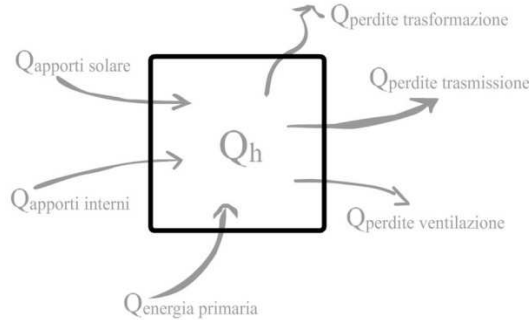


Figura 42 - Rappresentazione schematica del bilancio termico

6.3.1 BILANCIO ENERGETICO

In generale un bilancio energetico è il calcolo dei flussi energetici collegati ad un prodotto o un processo, valutabile portando in conto tutti gli apporti energetici, positivi o negativi che siano. La differenza negativa tra perdite e guadagni è il fabbisogno energetico (Q) da coprire:

$$\sum_{i=1}^n \pm q_i + Q = 0 \quad (6.1)$$

Il bilancio energetico specializzato alle sole energie termiche primarie prende il nome di *bilancio termico*. Da questo si determina il fabbisogno termico (Q_h) e, di conseguenza, il fabbisogno energetico totale aggiungendo gli altri fabbisogni energetici (Q_r).

$$Q = Q_h + Q_r \quad (6.2)$$

Per un edificio il fabbisogno energetico è il fabbisogno termico (riscaldamento invernale, il raffrescamento estivo, la produzione di acqua calda) con l'aggiunta del fabbisogno energetico necessario per la illuminazione e per altri usi elettrici.

La Figura 42 mostra il flusso d'energia primaria utilizzata per il riscaldamento di una tipica abitazione riscaldata con gas metano; sono distinte le perdite dovute al trasporto e alla trasformazione dell'energia, al rendimento dell'impianto, nonché i guadagni solari e quelli da sorgenti interne. Il calore impiegato viene poi ceduto, per trasmissione e per ventilazione all'ambiente esterno. Il fabbisogno energetico (e quindi l'efficienza energetica) viene espressa da uno o più descrittori che tengono conto di vari fattori tra cui la coibentazione, la progettazione e la posizione in relazione agli aspetti climatici, l'esposizione al sole, l'influenza delle strutture adiacenti, le caratteristiche tecniche e di installazione degli impianti, l'esistenza di sistemi di trasformazione propria di energia, il clima degli ambienti interni, ecc.

S/V	Gradi giorno					
	≤600	900	1400	2100	≥3000	
≤0,2	8,5	12,8	21,3	34	46,8	kWh/m ² anno
	2	3,6	6	9,6	12,7	kWh/m ³ anno
≥0,9	36	48	68	88	116	kWh/m ² anno
	8,2	12,8	17,3	22,5	31	kWh/m ³ anno

Tabella 4 - Valori limite dell' EP_{iL} al 1 gennaio 2010

6.3.2 VALORI DI RIFERIMENTO

Come già accennato un indice dell'efficienza energetica degli edifici è il fabbisogno energetico termico (FET) indicizzabile in relazione alla superficie (kWh/m²anno) o al volume (kWh/m³anno) necessario per il riscaldamento, per la produzione di acqua calda e per il raffrescamento estivo. Includendo, invece, il consumo energetico per illuminazione e per altri apparecchi elettrici, si ottiene il fabbisogno energetico complessivo indicizzabile in modo identico.

Le ultime normative¹⁸ in merito rinominano questa grandezza ridefinendola *Indice di prestazione energetica globale (EP_{gl})*:

$$EP_{gl} = EP_i + EP_{acs} + EP_e + EP_{ill} \quad (6.3)$$

dove:

- EP_i è l'indice di prestazione energetica per climatizzazione invernale,
- EP_{acs} è l'indice di prestazione energetica per produzione dell'ACS,
- EP_e è l'indice di prestazione energetica per climatizzazione estiva,
- EP_{ill} è l'indice di prestazione energetica per illuminazione artificiale.

La normativa prevede per l'EP_i un valore limite per gli edifici di nuova costruzione. Questo valore è come previsto dalla stessa norma¹⁹ diminuito con cadenza biennale dal 2006 fino al 2010. Attualmente in base alla conoscenza della zona climatica, dei gradi giorno per il comune di riferimento (riportati nell'allegato A della D.P.R. 412/93²⁰ e del rapporto di forma dell'edificio S/V, dove:

- S è la superficie che delimita verso l'esterno (ovvero verso ambienti non dotati di impianto di riscaldamento) il volume riscaldato V,
- V è il volume lordo delle parti di edificio riscaldate definito dalle superfici che lo delimitano,

¹⁸ Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici D.M. 26/06/09

¹⁹ D. Lgs 192 del 19 agosto 2005

²⁰ Successivamente integrata dal D.M. 6 agosto 1994, dal D.M. 16 maggio 1995 che ha abrogato il suddetto D.M. 6 agosto 1994, e dal D.M. 6 ottobre 1997

	EP _i		EP _{acs}	
Classe A+	≤	0,25	EP _{iL} ≤	9 kWh/m ² anno
Classe A	≤	0,5	EP _{iL} ≤	9 kWh/m ² anno
Classe B	≤	0,75	EP _{iL} ≤	12 kWh/m ² anno
Classe C	≤	1	EP _{iL} ≤	18 kWh/m ² anno
Classe D	≤	1,25	EP _{iL} ≤	21 kWh/m ² anno
Classe E	≤	1,75	EP _{iL} ≤	24 kWh/m ² anno
Classe F	≤	2,5	EP _{iL} ≤	30 kWh/m ² anno
Classe G	≥	2,5	EP _{iL} ≥	30 kWh/m ² anno

Tabella 5 - Scala di classificazione della prestazione energetica di EP_i e per di EP_{acs}

è possibile ricavare il valore limite di EP_i. Per valori di S/V compresi nell'intervallo 0,2 - 0,9 e, analogamente, per Gradi Giorno intermedi ai limiti delle zone climatiche riportati in Tabella 1 Tabella 4 si procede mediante interpolazione lineare. Per le località caratterizzate da un numero di Gradi Giorno superiori a 3000 i valori limite sono determinati per estrapolazione lineare, sulla base dei valori fissati per l'ultima zona climatica, con riferimento al numero di Gradi Giorno propri della località in esame.

Partendo dal valore limite precedentemente calcolato è possibile, sempre seguendo le indicazioni della normativa, ricostruire una Scala di classi energetiche espressione della prestazione energetica per la climatizzazione invernale EP_i e per l'EP_{acs} come riportato in Tabella 5.

6.4 ANALISI ECONOMICA

L'ultima parte per una corretta progettazione è l'analisi economica. Un buon progettista deve poter tenere sotto controllo ed essere capace di quantizzare economicamente ogni sua scelta e saperne valutare gli effetti anche a lungo termine. Spesso infatti scelte più economiche nell'immediato si possono tramutare a lungo termine in interventi dispendiosi e viceversa. La consapevolezza dei riflessi economici delle scelte progettuali fatte sono molto spesso il vero arbitro per le scelte dell'incaricato progettista. A volte nondimeno si lascia su esplicita richiesta del committente maggiore spazio alla componente ambientale, ammettendo maggiori costi per garantire a vantaggio della collettività scelte meno inquinanti o in generale a minore impatto ambientale. Basandosi su parametri che qui di seguito verranno esposti si potrà fare scelte oculate, in particolare:

- scegliere tra più alternative, applicabili sullo stesso sistema, quella economicamente più vantaggiosa (ad esempio selezionare, per un dato edificio, il sistema di riscaldamento o di raffrescamento)
- accettare o rifiutare un determinato progetto (ad esempio decidere se installare o meno un pannello solare o una macchina ad assorbimento);

- specificare il valore ottimale di un progetto che generi il maggior ritorno economico (ad esempio selezionare il valore ottimale di spessore per un isolante termico o il tipo di vetro da impiegare).

6.4.1 INDICI DI ANALISI FINANZIARIA

Nella quantizzazione dell'impatto economico delle scelte progettuali fatte ci viene in soccorso la *matematica finanziaria*. Prima di elencare i principali indici da utilizzare per la valutazione della convenienza economica di investimento e per la scelta tra le varie ipotesi di progetto è il caso di richiamare velocemente alcune grandezze economiche fondamentali che saranno in seguito richiamate più volte:

- **Capitale** - C è la quantità di denaro impiegata in un'operazione finanziaria riferita all'epoca iniziale;
- **Flusso di cassa** - F rappresenta una grandezza economica nelle disponibilità al tempo t ;
- **Interesse** - I è il compenso corrisposto a chi rinuncia ad una disponibilità finanziaria differendola nel tempo;
- **Sconto** - S è il compenso corrisposto per disporre al momento attuale di una capitale futuro. Formalmente identico all'interesse si differenzia da quest'ultimo per l'approccio temporale;
- **Montante** - M è la somma del capitale iniziale C e dell'interesse I . Esso rappresenta il capitale che si riscuote al termine del periodo di investimento;
- **Tasso di interesse** - i è il rapporto tra l'interesse I e il capitale iniziale C ad un dato tempo. Viene espresso spesso in percentuale e indica quanta parte della somma prestata debba essere corrisposta come interesse al termine del tempo considerato. Il tasso d'interesse è variabile e può essere funzione tra l'altro della moneta di riferimento, del rischio connesso alla solvibilità del debitore e della lunghezza del periodo di riferimento;
- **Tasso di sconto** - d è il rapporto tra lo sconto S ed il capitale C al tempo t .

Le grandezze finanziarie vengono grazie alla matematica finanziaria contestualizzate temporalmente e si riesce così a calcolare e confrontare il valore economico di un prestito, un investimento o un debito. Per valutare la bontà di un investimento si possono utilizzare diversi indici che confrontano la redditività dell'investimento con il pari investimento finanziario di riferimento. Di seguito analizzeremo gli indici principali e di conseguenza anche i più impiegati.

Tempo di ritorno dell'investimento

Il *PayBack Period (PBP)* o Tempo di ritorno dell'investimento è uno degli indicatori più brutali per la scelta di quale investimento effettuare tra vari proposti. Il metodo, infatti, viene frequentemente utilizzato dalle aziende per la sua semplicità di calcolo; esso consente di calcolare il tempo entro il quale il

capitale investito nell'acquisto di un fattore produttivo a medio-lungo ciclo di utilizzo viene recuperato attraverso i flussi finanziari netti generati.

Tra investimenti alternativi, si sceglierà quello con un "periodo di recupero" più breve, in quanto da tale momento in poi, il bene strumentale contribuirà alla formazione di utili lordi. Questo parametro ha lo svantaggio di non considerare i risparmi e gli eventuali ulteriori investimenti che hanno luogo dopo il tempo di ritorno.

Life Cycle Cost

Il *Life Cycle Cost* o *LCC* calcola il valore attuale di una serie di flussi di cassa generati in periodi futuri (che si presumono della stessa ampiezza, ad esempio, semestrali o annuali) attraverso l'utilizzo di un tasso di sconto, anche detto, tasso di attualizzazione. Attraverso il calcolo del *LCC*, oltre che stabilire la convenienza attesa di un singolo investimento, è anche possibile confrontare la convenienza tra due o più investimenti in concorrenza tra loro. Data la definizione, è chiaro che il più conveniente tra n investimenti concorrenti sarà quello con il *LCC* minore: ne consegue che ordinare la convenienza attesa di n investimenti in modo decrescente sarà uguale a ordinare pure in modo crescente i *LCC* corrispondenti per questi stessi investimenti tra loro di periodo e capitale uguale.

Net Saving

Il *Net Saving* o *NS* permette di quantificare le differenze tra due alternative progettuali. Questo è definibile come la differenza attualizzata tra risparmi e costi aggiuntivi d'investimento; Tra le varie alternative a quella base è da preferirsi quella con il *NS* più alto, in generale un valore di *NS* nullo indica che c'è convenienza nell'alternativa.

Savings to Investment

Il *Savings to Investment* o *SIR* è un altro quantificatore della bontà dell'investimento ed esprime con un rapporto quanto viene risparmiato a parità di investimento, o più brutalmente quanti € si risparmiano per ogni € investito.

Tra le due proposte è da preferirsi l'alternativa se il $SIR > 1$. Per le grandezze nella formula si faccia riferimento a quanto già detto fin qui è in particolare si faccia attenzione al segno delle grandezze economiche.

7. ANALISI DELL'EDIFICIO SEDE DELLA DIREZIONE GENERALE A.A.M.S.

INDICE CAPITOLO

7.1	EDIFICIO DI INTERVENTO	84
7.2	ANALISI PROGETTUALE	86
7.2.1	IMPIANTI TERMICI	86
7.2.2	INVOLUCRO EDILIZIO	89
7.2.3	DIAGNOSI DEI CONSUMI ENERGETICI	90
7.2.4	RIEPILOGO E CONCLUSIONI	95
7.3	ANALISI ENERGETICA	96
7.3.1	TARATURA DEL MODELLO	97
7.3.2	OUTPUT MODELLO NUMERICO TRNSYS	102

Quanto fin qui trattato in modo teorico trova applicazione in ogni buon piano di riqualificazione termico edilizia che si affronti. A maggior ragione in un progetto impegnativo la fase di progetto dovrebbe essere realizzato in modo attento e coscienzioso. In questo lavoro ci si ripropone di applicare quanto esposto fin qui ad un caso reale ove la situazione di partenza lasciano ben figurare risultati interessanti. Le dimensioni della struttura, la sua complessità intrinseca e di collocazione urbana accrescono la complessità dell'intervento rendendolo molto interessante.

7.1 EDIFICIO DI INTERVENTO

L'edificio oggetto della nostra analisi è la sede della Direzione Generale dell'AAMS (Amministrazione Autonoma dei Monopoli di Stato) incaricata a livello nazionale di regolare il comparto del gioco pubblico e di controllare la produzione, la distribuzione, la vendita e i dazi per i tabacchi lavorati.

L'edificio è sito in piazza Mastai in Roma e si compone di due corpi distinti ma collegati. L'edificio di dimensioni minori affaccia direttamente sulla piazza ed ha un valore storico non trascurabile risalendo la costruzione alla seconda metà dell'800. Oggi questa parte è nelle disponibilità della Guardia di Finanza. L'altra parte di dimensioni maggiori è la sede amministrativa dell'AAMS di costruzione più recente e risalente agli anni '60. Da qui in avanti per comodità chiameremo i due edifici, edificio storico ed edificio moderno rispettivamente.

L'edificio storico si divide in un piano interrato a quota circa -5 m da piano stradale e 4 piani fuori terra per un'altezza del solaio di terrazza di circa 22 m. Architettonicamente l'edificio è costituito da uffici con affacci sulla piazza e un lungo corridoio, per una pianta sostanzialmente rettangolare con dimensioni massime 17,1 x 74,1 m e area pari a circa 1030 m²²¹. Questo stabile ha volume

²¹ Si ricorda che sono in vigore diverse definizioni per la determinazione di questi indici e in particolare per la valutazione delle dimensioni geometriche al denominatore. Per Superficie energetica di riferimento (SER) si intende la superficie di tutti i locali riscaldati; in Austria, Svizzera e in Italia comprende anche i muri perimetrali (superficie utile lorda), mentre in Germania solo l'area

pari a 20000 m³ e un rapporto S/V pari a 0,29 con altezze di interpiano anche differenti tra piano e piano e quindi volumi differenti.

L'edificio nuovo dalla forma più particolare e dall'altezza interpiano inferiore si divide in 2 piani interrati e 7 fuori terra per una altezza complessiva di circa 24

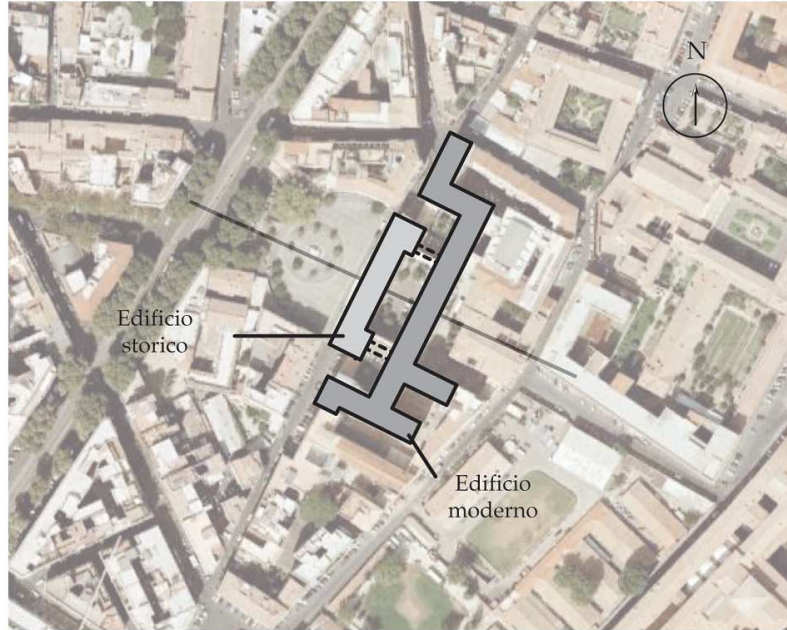


Figura 43 – Localizzazione Edificio A.A.M.S.

m. L'area della parte destinata ad uffici (escludendo quindi i magazzini e i locali tecnici) è di circa 3040 m². Questo secondo stabile ha volume di 70300 m³ e rapporto S/V pari a 0,28. I due edifici costruiti in epoche completamente differenti sono caratterizzati da caratteristiche termiche dell'involucro anch'esse notevolmente differenti. L'edificio storico ha piccole aperture realizzate nei muri maestri della muratura portante con spessori notevoli dal 1,5 m nel piano interrato fino agli 80 cm dell'ultimo piano. Si nota l'assenza di accorgimenti tecnici per isolare termicamente l'edificio. Ciononostante dati i rapporti S/V bassi si lascia ben sperare per interventi di isolamento termico sia dal punto di vista della riuscita che del costo dell'intervento. D'altro canto si ipotizza una maggiore propensione al surriscaldamento estivo a causa di grandi superfici vetrate e scarsa superficie disperdente.

L'edificio è disposto con un orientazione Nord-Ovest. Nel dettaglio l'angolo formato dalla retta ortogonale alla facciata principale dell'edificio storico su piazza Mastai e la direzione del Nord è di 66° (vedi Figura 52). Questa constatazione insieme alla valutazione della forma dell'edificio permette di

calpestable senza considerare lo spessore delle pareti perimetrali (superficie utile netta). Nel confronto tra indici energetici svizzeri e tedeschi, ad esempio, occorre perciò calcolare un aumento del 15% dei dati di provenienza svizzera.

individuare le zone investite maggiormente dalla radiazione solare nell'arco della giornata nei diversi periodi dell'anno. D'altro canto la valutazione degli apporti della radiazione solare entrante dalle superfici vetrate non è immediata essendo l'edificio circondato da altri edifici che ne limitano l'esposizione con le loro ombre.

Prima di iniziare ad esporre i calcoli e le riflessioni fatte su quest'edificio è il caso di crearsi una scala di riferimento in base all'attuale richiesta normativa per l'efficienza energetica (vedi punto 6.3.2). Per Roma la zona climatica è la D con 1415 Gradi Giorno. Per il nostro edificio con un valore medio del rapporto S/V si può calcolare e far riferimento per l'EPi alla scala di efficienza di Figura 44 e per l'EP_{acs} ai valori della Tabella 5. Questi valori saranno richiamati in seguito a mo' di confronto per sintetizzare la situazione attuale energetica dell'edificio e quella attesa dopo gli interventi rispetto all'attuale richiesta normativa per edifici di nuova costruzione.

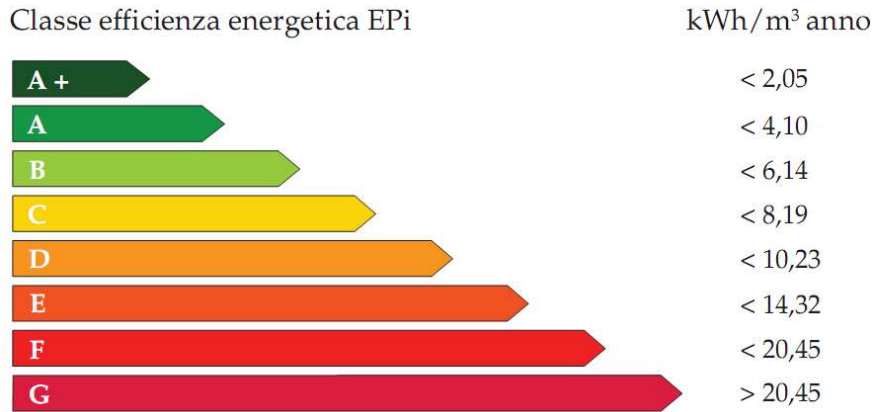


Figura 44 - Scala di efficienza energetica a Roma per il EP_i

7.2 ANALISI PROGETTUALE

Come indicato nel [Capitolo 6](#) per un intervento di riqualificazione energetica coerente e che produca il massimo risultato possibile è necessario seguire un iter progettuale completo e ben definito. Il primo passo è quello della diagnosi energetica, delicata e importantissima.

L'analisi è stata svolta cercando di interfacciarsi il possibile con i responsabili della gestione energetica dell'edificio, cercando di capire le loro volontà e i loro progetti per il futuro energetico dello stabile. Appurata la volontà di investire in efficienza energetica e rispetto per l'ambiente, si è passati all'analisi della situazione attuale attraverso la raccolta dati e la loro interpretazione in un modello che permettesse di interpretarne i valori.

7.2.1 IMPIANTI TERMICI

L'edificio come già accennato ha una lunga storia. Fin dal suo utilizzo come sede di uffici è stato interessato dall'installazione di diversi sistemi termici

dimensionalmente consistenti. Con il tempo questi sono stati più volte oggetto di rifacimenti e sostituzioni che hanno modificato il profilo impiantistico dello stabile. Tra gli interventi più importanti ci sono la sostituzione delle caldaie a gasolio con quelle a gas e l'istallazione di potenti gruppi frigo e pompe di calore per il raffrescamento estivo. In particolare, la centrale frigo è stata spostata dai locali interrati alle terrazze.

In base all'indagine svolta per questo lavoro di tesi il punto sulla situazione impiantistica è il seguente:

- *n. 1 Caldaia Biklim Pr1m 130;*
- *n. 4 Caldaie Unical Trikond 1100;*
- *n. 2 Chiller Carrier Acquaforce 30XA-602;*
- *n. 3 Sanyo SGP-E240K1GU2W della linea VRF a gas naturale;*
- *n. 2 Sanyo SGP-E190K1GU2W della linea VRF a gas naturale;*

si fa notare che la caldaia installata per la produzione dell'acqua calda sanitaria è della Biklim, società che nel frattempo è fallita, rendendo più difficoltoso il recupero del materiale informativo e il possibile futuro eventuale lavoro di manutenzione. Quest'ultima è in via di sostituzione secondo quanto recepito dal personale competente della sua gestione.

PRODUZIONE ACS

La caldaia Biklim PRIM130 offre una potenzialità di circa 156 kW ed è abbinata con un preparatore di acqua calda cilindrico verticale della capacità di 2.000 l con interna serpentina in rame.



Figura 45 - Gruppo frigorifero Carrier 30XA 602

RISCALDAMENTO

Le caldaie Unical Trikond installate per sopperire alla necessità di riscaldamento invernale offrono una potenza nominale utile (T_m 80/ T_r 60°C) di 1010 kW ciascuna per un totale disponibile all'impianto di circa 4 MW.

RAFFRESCAMENTO

I due gruppi frigoriferi della Carrier sono macchine a compressione di vapore saturo di grandi dimensioni (vedi Figura 45) con potenza frigorifera di circa 600 kW ciascuna per un totale di 1,2 MW.

POMPE DI CALORE

L'impianto è anche dotato di 5 pompe di calore della Sanyo GHP a 2 vie della linea VRF a gas. Le macchine hanno potenze rispettivamente raffreddamento, riscaldamento, produzione di acqua calda di 71/80/27,5 kW e per il modello SGP-E240K1GU2W e 56/67/17 kW per il modello SGP-E190K1GU2W per un totale di 325/374/110,5 kW.

Nello stabile sono presenti radiatori in ghisa e unità ventilconvettori (fancoil). Per la sala del consiglio ed annessi è invece presente un impianto a doppio condotto con UTA. L'aria immessa attraverso delle bocchette di immissione ha quindi valori controllati di temperatura, umidità e velocità.

Nel tempo si sono aggiunti e modificati gli impianti con scelte anche localizzate su singole aree, piani o uffici. Allo stato attuale, in base alle informazioni che si è riusciti a ottenere, il riscaldamento del secondo piano dell'edificio storico è autonomo, mentre per il raffrescamento estivo l'edificio storico è per una parte consistente autonomo con esclusione del primo piano, delle parti comuni e di alcuni uffici.

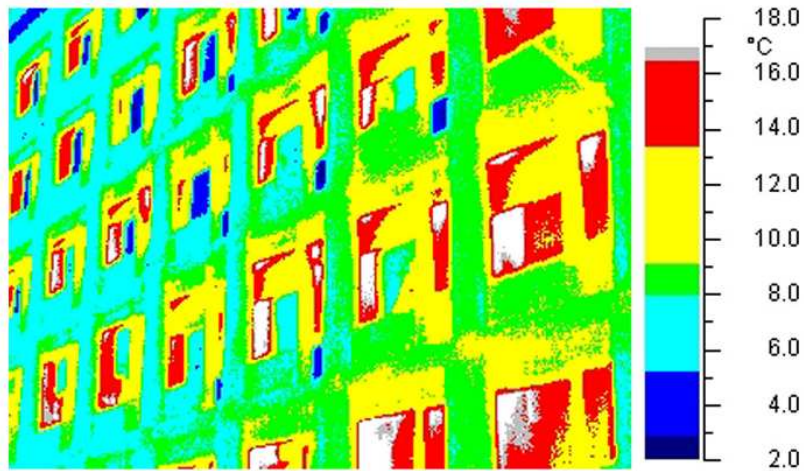


Figura 46 - Immagine della campagna termografica su edificio

Edificio nuovo	Spessore [cm]	Trasmittanza [W/m ² K]
Pareti esterne	26	1,09
Pareti interne	10	2,56
Solaio interpiano	31	1,69
Edificio Storico	Spessore [cm]	Trasmittanza [W/m ² K]
Muratura portante	80	0,93
Muratura portante	100	0,79
Pareti interne	12	2,28
Solaio interpiano	33	1,67

Tabella 6 - Caratteristiche termiche delle superfici opache edificio A.A.M.S.

7.2.2 INVOLUCRO EDILIZIO

Il complesso edilizio dell'AAMS, come già esposto precedentemente, è costituito da due stabili con caratteristiche molto differenti; prima di effettuare l'analisi energetica tramite la realizzazione di un modello matematico che ne schematizzi il comportamento è necessario ricostruire la composizione degli involucri edilizi responsabili della maggior parte delle dispersioni termiche.

Per l'analisi delle strutture si sono procurate le piante dello stabile alle quali far riferimento per risalire alle grandezze geometriche. Per la caratterizzazione delle superfici esterne e interne, invece, si è fatto affidamento a quanto affermato dai responsabili tecnici dello stabili durante apposite interviste. La validità delle quali sono state oggetto di confronto con dati sperimentali ottenuti da una campagna termografica svolta nell'ambito del Programma di Dottorato di Ricerca.

Pareti esterne ed interne.

L'edificio nuovo ha una struttura a telaio in calcestruzzo armato con interasse tra i pilastri di 4 o 7 m. Sul perimetro si è lasciato ampio spazio alle superfici vetrate con intelaiature a parate. I pilastri sul bordo sono stati ricoperti con strati di materiale isolante per evitare eccessivi ponti termici e il restante della muratura ha uno spessore di 30 cm con l'alternarsi di forati e materiale isolante di modesto spessore (polistirene espanso sinterizzato da 2 cm). Le pareti divisorie interne hanno la sola funzione di separare gli spazi interni con uno spessore di 12 cm.

L'edificio storico avendo una struttura in muratura ha le pareti che si rastremano verso l'alto con spessori compresi per i piani fuori terra tra 1 e gli 80 cm. Non si è registrata la presenza di alcuno strato isolante ma si fa notare che l'elevato spessore e la tipologia delle murature comportano in ogni caso discreti valori di trasmittanza abbinata con una notevole inerzia termica. Le pareti interne essendo della stessa tipologia di quelle esterne riducono, dal punto di vista funzionale, di molto la superficie calpestabile e dal punto di vista termico, incrementano ulteriormente l'inerzia termica dello stabile.

Superfici vetrate e serramenti

L'edificio nuovo presenta percentualmente una notevole estensione delle superfici vetrate pari circa al 33% di ogni facciata. Rappresentano buona parte

delle superfici disperdenti verso l'esterno determinandone in modo significativo il comportamento globale. Sono a una prima vista il punto debole dell'edificio. Ciò viene confermato anche dalla campagna termografica fatta (vedi Figura 46) ove a causa della scarsa qualità dei vetri impiegati (vetro semplice singolo e intelaiatura senza taglio termico) sono veicolo principale per la dispersione termica.

L'edificio storico ha la stessa tipologie di infissi con le stesse basse prestazioni ma con dimensioni e quindi estensione minore. Si fa notare che molte aperture originarie sono state chiuse per motivi architettonici e che le superfici trasparenti del piano terra sono oscurate per motivi di privacy e sicurezza.

Le dimensioni geometriche e le tipologie per i serramenti per i due stabili sono riportate in Tabella 7 - Tipologia e dimensioni dei serramenti esterni edificio A.A.M.S..

Solai di interpiano e copertura.

I due stabili hanno dei piani interrati non riscaldati che confinano termicamente con i rispettivi piano terra. I solai di interpiano sono così costituiti: pavimento di ceramica, malta cementizia, soletta mista da 26 cm e intonaco cementizio. La copertura dell'ultimo piano è anch'esso costituita da un solaio piano di spessore pari a 24 cm e in più uno strato di bitume con funzione coibente al di sotto della malta cementizia.

I solai non hanno grandi prestazioni di isolamento termico ma a parte quelli di copertura e del piano terra non evidenziano neanche particolare funzionalità delimitando ambienti a temperatura uguali.

Edificio nuovo	Dimensioni [m]	Area [m ²]
Finestra ufficio	2,2 x 1,5	3,3
Porta-finestra ufficio	1 x 2,1	2,1
Finestra corridoio	3,2 x 1,5	4,80
Edificio Storico	Dimensioni [m]	Area [m ²]
Finestra ufficio A	1,2 x 1,5	1,80
Finestra ufficio B	1,6 x 2,1	3,36

Tabella 7 - Tipologia e dimensioni dei serramenti esterni edificio A.A.M.S.

7.2.3 DIAGNOSI DEI CONSUMI ENERGETICI

Partendo dall'analisi dei dati di fornitura delle principali fonti energetiche si è risaliti attraverso un processo inverso di calcolo alla determinazione del fabbisogno energetico effettuato e non presunto. Questi valori rappresentano, infatti, i valori di energia effettivamente impiegati per il raggiungimento delle condizioni termiche richieste allo stabile nel periodo di un anno. I valori ove possibile sono stati mediati su più anni prima di essere processati, per ottenere valori statisticamente accettabili e così epurarli degli errori frutto della naturale fluttuazione climatica di un anno o periodo specifico.

Dati Gas

Si fa riferimento ai dati forniti nella Tabella 8. I valori sono stati ottenuti analizzando le fatture del fornitore del gas ed espressi m³

Fortunatamente grazie all'installazione di contatori separati è stato possibile ottenere indicazioni separate per il riscaldamento e per la produzione di acqua calda sanitaria escludendo il gas per usi specifici come le mense e la climatizzazione della Sala Belli. Da questi dati si è poi tramite la seguente formula:

$$Energia = Consumo \cdot PC \cdot \eta_{tra} \quad (7.1)$$

risalire ai valori energetici impiegati per il riscaldamento e la produzione di ACS. Il potere calorifico (PC) del gas adottato è di 34.541 kJ/m³ ovvero circa 9,6 kWh/m³

Il rendimento della trasformazione η_{tra} è quello riportato sulle schede tecniche del produttore delle varie macchine termiche con un valore empirico di correzione per tener conto di altri cali di resa dell'impianto.

Contatore	Utilizzo	Consumo [m ³]	Energia [kWh]
43073	Riscaldamento	167.557	1.543.361
5079953	Prod. ACS	3.952	36.781
33808242	Sala Belli	17.328	-
1048919	Mensa	26.373	-

Tabella 8 - Dati forniti consumo di gas edificio A.A.M.S. ed energia prodotta.

I risultati dell'applicazione di quest'ultima formula sono riportati sempre nella Tabella 8, dai quali è possibile definire in via sintetica l'indice EP_i e l'indice EP_{acs} che rappresentano, è bene ripeterlo, non i valori attesi di consumo energetico ma bensì quelli effettivi che i gestori dello stabile misurano ogni anno. E' evidente come questi possano dare una valutazione non tecnicamente perfetta e completa della situazione ma sicuramente sono capaci di dare indicazioni quanto mai concrete e reali includendo mal funzionamenti, sprechi ecc. Il valore del consumo di energia per la produzione di acqua calda sanitaria è indicizzabile così:

$$EP_{acs} = 1,35 \frac{kWh}{m^2 \cdot anno}$$

Questo valore è particolarmente basso rispetto a quelli da normativa.

La situazione dell'edificio non deve essere fraintesa pensando immediatamente a una grande efficienza del sistema. Si deve considerare, infatti, che l'edificio ha una destinazione ad uffici ed essendo dotato di una apprezzabile superficie per archivio e depositi è ben lontano dai valori di consumi per edifici di edilizia residenziali. Dal punto di vista progettuale questo lascia ben sperare per l'installazione di un impianto solare. Dati i bassi consumi totali un impianto a collettori solari risulterebbe fattibile e con una idonea copertura sui consumi di

energia per la produzione di ACS. Ben diversa è la situazione per il riscaldamento invernale. Questo è indicizzabile in questo modo:

$$EP_i = 18,3 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

Questo valore corrisponde, confrontandolo con i valori attualmente richiesti da normativa (Figura 44), ad una **classe energetica F** con valori dell' EP_i compresi tra 14,32 e 20,45 kWh/m³anno. Questo valore è il sintomo di un comportamento termico-energetico decisamente meno performante rispetto agli standard oggi attesi da edifici di nuova edificazione. Per raggiungere un livello oggi considerato minimo di efficienza energetica sarà necessario dimezzare i carichi termici verso l'esterno attraverso interventi strutturali importanti.

Dati Elettricità

Per la stima dei consumi elettrici si sono recuperati i dati delle fatture degli ultimi anni. In Tabella 9 si sono riportati i dati per gli ultimi due anni: 2009 e 2010. Si fa notare che non sono forniti dati separati per il consumo delle macchine termiche addette al raffrescamento e si dovrà pertanto, risalire ai consumi di queste attraverso l'osservazione dei dati mensili. Si sono costruite correlazioni temporali e con le temperature.

	Consumo 2009 [kWh]	Consumo 2010 [kWh]	Consumo medio [kWh]
Gennaio	234.970	272.233	259.386
Febbraio	221.522	258.700	245.895
Marzo	243.639	265.892	260.550
Aprile	218.498	221.536	225.801
Maggio	244.710	218.971	237.625
Giugno	275.385	267.479	277.216
Luglio	338.815	362.293	356.338
Agosto	299.497	317.394	314.230
Settembre	288.182	255.396	277.573
Ottobre	237.830	-	238.250
Novembre	204.759	-	215.365
Dicembre	323.015	-	241.126

Tabella 9 - Dati forniti consumo di elettricità edificio A.A.M.S.

Il raffrescamento è attivo nei mesi estivi e in questi è proporzionale all'andamento delle temperature massime con un evidente aumento dei consumi. In Figura 47 sono diagrammati i dati della Tabella 9 per mettere in evidenza quanto fin qui esposto. Per l'edificio si è stimato un consumo totale medio di energia elettrica pari a circa:

$$E_{ele_T} = 3,15 \frac{GWh}{anno}$$

che può essere indicizzato e confrontato con i valori medi [8]:

$$E_{ele_T} = 123 \frac{kWh}{m^2 \cdot anno}$$

questo valore è nella norma per i valori attesi per uffici localizzati nella stessa zona climatica. I dati sono stati successivamente mediati per i vari anni e si è sfruttato la loro correlazione con l'andamento delle temperature per valutare il consumo elettrico medio per il raffrescamento estivo in kWh elettrici/ anno. I consumi elettrici diversi da quelli per i sistemi termici possono essere così mediati:

$$E_{ill} = 240.000 \frac{kWh}{mese}$$

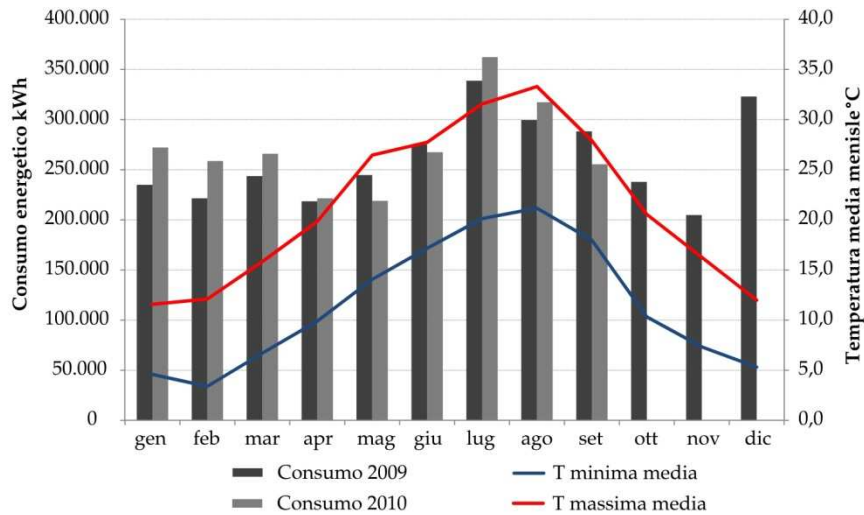


Figura 47 - Consumo elettrico mensile edificio A.A.M.S. 2009-2010 con andamento temperature medie

Si usa in modo improprio la denominazione E_{ill} che in realtà dovrebbe indicare il solo consumo per l'illuminazione artificiale ma che qui viene impiegata per indicare i consumi elettrici medi totali diversi da quelli termici. Con la stessa imprecisione di notazione si esprime il valore indicizzato:

$$EP_{ill} = 27,3 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

In base ai calcoli svolti considerando che nel periodo estivo l'illuminazione artificiale assorbe quantitativi inferiori di energia (in modo inversamente proporzionale con la disponibilità di illuminazione naturale) si sono stimati i consumi elettrici mensili per raffrescamento di Tabella 10. Si fa notare che dalla regressione sui dati elettrici si riscontra un consumo per raffrescamento in concomitanza con temperature massime medie superiori ai 27°C. Questo valore

di temperatura è incompatibile con i valori di comfort degli ambienti e questo suggerisce la correttezza delle correlazioni svolte.

Da questi dati tramite la seguente formula:

$$Energia = Consumo \cdot \eta_{tra} \quad (7.2)$$

si è calcolato il valore del fabbisogno energetico medio prodotto per il raffrescamento estivo per i mesi di impiego (vedi Figura 48). Il valore del η_{tra} può essere assunto sostanzialmente costante e uguale al COP della macchina termica.

Come fatto per il riscaldamento è possibile indicizzare il valore dell'energia per raffrescamento e ottenere:

$$EP_e = 10,1 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

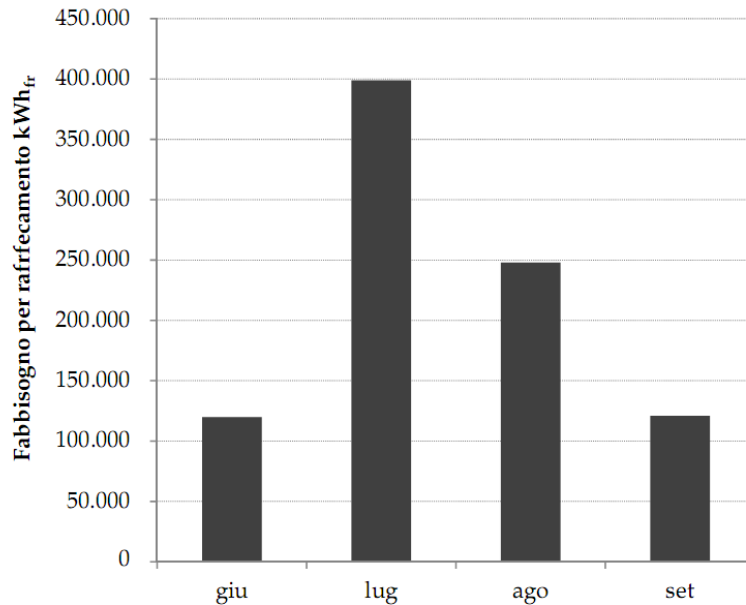


Figura 48 - Dati calcolati per il raffrescamento dell'edificio A.A.M.S.

	Consumo medio [kWh]	Energia Raffr. [kWh _{fr}]
Giugno	39.937	119.810
Luglio	132.970	398.912
Agosto	82.651	248.015
Settembre	40329	120.988

Tabella 10 - Dati calcolati per il raffrescamento dell'edificio A.A.M.S.

A questo punto dell'analisi è il caso di effettuare le prime simulazioni in TRNsys per avere un dato di prima approssimazione sull'energie disponibili per il raffrescamento estivo tramite solar cooling. Questa prima valutazione darà indicazioni sulla fattibilità del progetto e su se sarà conveniente intervenire per ridurre il fabbisogno termico con opere alle strutture. La simulazione fornisce i dati riportati in Tabella 11 per pannelli inclinati di 33°; si è poi risaliti alla superficie necessaria per una copertura teorica del fabbisogno del 100% tramite il fattore di rendimento per la trasformazione energetica. I risultati del calcolo garantiscono di poter raggiungere la copertura totale del fabbisogno per il raffrescamento con un sistema di solar cooling essendo la superficie necessaria inferiore a quella disponibile sulla copertura. Il sistema di solare attivo sarebbe in funzione anche nei periodi invernali permettendo una buona integrazione degli impianti di riscaldamento invernale e garantendo come visto la totale copertura del fabbisogno di ACS.

	Energia Solare [kWh/m ²]	Superficie collettori [m ²]
Giugno	191	1.045
Luglio	209	3.181
Agosto	201	2.056
Settembre	171	1.179

Tabella 11 - Analisi fattibilità solar-cooling con TRNsys

7.2.4 RIEPILOGO E CONCLUSIONI

Dall'analisi svolta e dal confronto degli indici calcolati si può affermare che l'edificio si colloca energeticamente nella media degli edifici del terziario con ubicazione climatica simile attivi in Italia. Ciononostante se confrontiamo questi valori con quelli richiesti dalla normativa e quelli attualmente attesi dalle nuove costruzioni, l'edificio ha una prestazione energetica che presenta interessanti margini di miglioramento. Di seguito vengono riportati i valori degli indici calcolati grazie al lavoro di diagnosi energetica:

$$EP_i = 18,3 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

$$EP_{acs} = 1,35 \frac{kWh}{m^2 \cdot anno}$$

$$EP_e = 10,1 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

$$EP_{it} = 27,3 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

Questi dati indicano che l'edificio ha importanti consumi energetici.

La maggior parte dei quali dovuti all'impiego di energia elettrica per attività non legate alle necessità di termoregolazione dell'edificio. Si suggerisce, quindi, di impegnarsi nello studio approfondito di questo aspetto immaginando che a valle di una specifica diagnosi energetica si possano evidenziare interessanti spunti per incrementare l'efficienza energetica dello stabile. Per ridurre i consumi necessari al raggiungimento del comfort termico dell'edificio si classificheranno con l'analisi energetica vari interventi in base al loro impatto sul fabbisogno energetico. Gli interventi proposti saranno di due tipi: riduzione del fabbisogno e miglioramento degli impianti con integrazione di sistemi da fonti rinnovabili.

7.3 ANALISI ENERGETICA

Partendo dalla diagnosi energetica svolta si può tarare il modello matematico per l'analisi termo-energetica dell'edificio. L'operazione computazionale sarà assistita dal software TRNsys in grado di implementare una modellazione in transitorio dei due stabili. Il software impone l'analisi dei due edifici in file separati e quindi la valutazione degli indici energetici sarà ottenuta con media pesata sui volumi dei risultati energetici ottenuti dai due file *.bui dell'applicativo TRNBuild.

Il modello dell'edificio è gestito da TRNsys Simulation Studio attraverso un file *.tpf come riportato in Figura 49 da cui si richiama con la *Type 56* i file *.bui. Si riconoscono in figura i file di input sul lato sinistro, e i file di output sul lato destro. Le type di calcolo si concentrano nella 56 disposta centralmente. Si fa notare la presenza di una type per la gestione delle schermature mobili e la presenza di alcune calcolatrici per le implementazioni di procedure automatiche di calcolo personalizzate.

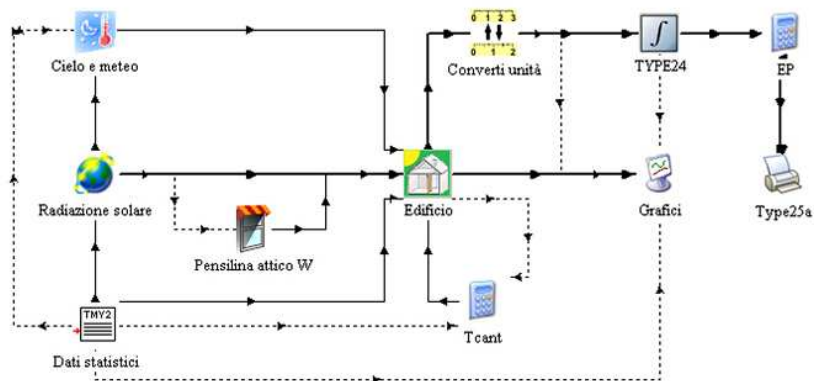


Figura 49 - Modello dell'edificio A.A.M.S. in TRNsys

In TRNbuild vengono realizzati i diversi modelli di edifici. Si individuano per ciascun edificio un numero congruo di zone termiche che per scelta, nel nostro caso si è fatto coincidere con i piani. Per ogni zona si calcolano da tavole

di progetto e con sopralluoghi integrativi le dimensioni geometriche delle superfici disperdenti e la loro disposizione e tipologia. Si crea un database per gli strati componenti le varie tipologie di elemento divisorio, sia esso interno (Internal wall), verso l'esterno (External wall), verso un'altra zona (Adjacent wall) o verso un'altra zona non del modello ma con condizioni al contorno note (Boundary wall). In Figura 50 è riportata una tipica schermata di zona di TRNbuild attraverso la quale è stato possibile gestire in modo semplificato gli input qui esposti.

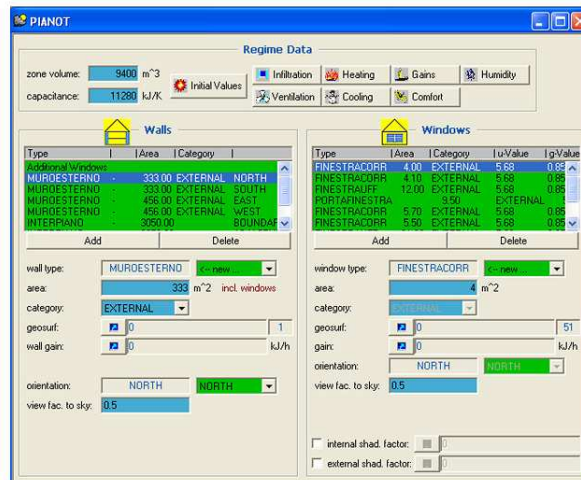


Figura 50 – Esempio di schermata di input di TRNbuild

Non verranno riportati tutti i valori di calcolo impostati per mancanza di spazio. D'altro canto di seguito verranno riportati i valori che sembrano più peculiari delle scelte fatte e che possono aggiungere qualcosa a livello cognitivo del processo logico adottato.

7.3.1 TARATURA DEL MODELLO

Una volta realizzato il modello si opera la sua taratura sui dati della diagnosi. Questa parte molto delicata necessita di una certa sensibilità del progettista e di una buona dimestichezza con il software di calcolo per poter variare i parametri tanti parametri in modo verosimile per meglio avvicinarsi ai dati ottenuti sperimentalmente in fase di diagnosi.

Richiesta termica di progetto.

In base alle informazioni ottenute nella fase di diagnosi energetica si sa che l'impianto termico dell'edificio è regolato da sistemi di controllo capaci di determinare l'accensione, lo spegnimento e la regolazione dell'attività delle macchine termiche per garantire temperature comprese tra 20° e 25° C nelle ore di apertura degli stabili alle attività lavorative. Per garantire il servizio, quindi, è previsto il funzionamento dalle 7 alle 18.30 per tutti i giorni lavorativi.

Per impostare questo comportamento in TRNbuild è stato necessario creare un calendario settimanale di funzionamento composto dai rispettivi tabulati orari giornalieri. Si precisa che mentre l'impostazione invernale di minima temperatura risulta abbastanza semplice e naturale, quella estiva di massima richiede un artificio matematico nell'impostazioni di "Schedule set point temperature control". La riga da usare è infatti la seguente:

$$T_{max} = -25 \cdot Settimana + 50$$

ove *Settimana* indica il valore booleano [0;1] del calendario orario con 1 nella condizione di funzionamento e 0 di non funzionamento.

Temperatura locali interrati.

Il problema è quello di stabilire la temperatura dei locali interrati confinanti con il piano terra dei due stabili. Si è scelto di correlare tale valore con la temperatura dell'ambiente T_a , del suolo T_s , e dei locali interni al pian terreno T_i

$$T_{li} = T_s + \frac{(T_a - T_s)}{6} + \frac{(T_i - T_s)}{3.5} \quad (7.3)$$

la T_s può essere assunta costante e pari a 15°C o può essere correlata con altre relazioni presenti in letteratura con la profondità e la temperatura esterna. I coefficienti al denominatore dei due rapporti sono empirici e funzione dello scambio termico all'interpiano del pianterreno e dell'influenza dell'ambiente esterno sul terreno circostante il piano interrato. La relazione precedente viene programmata in TRNsys grazie alla Type speciale "Equation"²²

Ombra tettoia camminatoio ultimo piano

L'ultimo piano dell'edificio nuovo si diversifica architettonicamente dagli altri perché sul lato ovest (facciata verso piazza Mastai) presenta una riduzione di una delle dimensioni degli uffici per realizzare un camminatoio di circa 1.8 m a cui ogni ufficio ha accesso da ampie porte-finestre. Per simulare questa particolarità che potrebbe influire in modo non trascurabile a causa della forte esposizione a quella quota senza altri impedimenti alla radiazione solare diretta, si fa uso della *Type 34*. Tale type permette la modellazione di schermature fisse assimilabili a tettoie opache. Il software data la posizione e la dimensione relativa della tettoia rispetto alle superfici vetrate, modifica i valori della radiazione incidente in modo diretto e diffuso. In Figura 51 viene riportato il grafico di output del TRNsys per la radiazione totale incidente sul lato ovest dell'ultimo piano in assenza della tettoia (a) e con la tettoia (b). Si può notare come l'azione di schermo abbia effetti su tutto l'arco dell'anno ma ha la massima azione nel periodo estivo in cui la radiazione diretta (rispetto quella diffusa) e l'elevazione del sole raggiungono valori più elevati.

²² Le informazioni sulle funzioni richiamabili con l'utilizzo della Equazione in TRNsys sono reperibili nel manuale a corredo del software nella sezione TRNedit al punto 7.6.8.1 Available mathematical functions

Apporti da attività interne

In prima approssimazione non avendo dati ben precisi sui livelli di affollamento della struttura e non conoscendo bene i valori termici delle macchine elettriche ed informatiche presenti si è fatto affidamento a valori standard ottenibili da norme o da letteratura. Per ogni piano si è supposto un numero di occupanti per l'edificio nuovo di 65 unità e per l'edificio vecchio di 20 unità in condizioni di lavoro fisico ad ufficio. Secondo la norma ISO 7730 i valori di potenza termica a occupante sono così stimati: potenza totale 150 W, potenza latente 75 W potenza sensibile 75 W. Per le apparecchiature presenti si è stimata la disponibilità termica offerta da un assorbimento equivalente di 7,2 kW elettrici nell'edificio nuovo e 3,5 kW in quello storico.

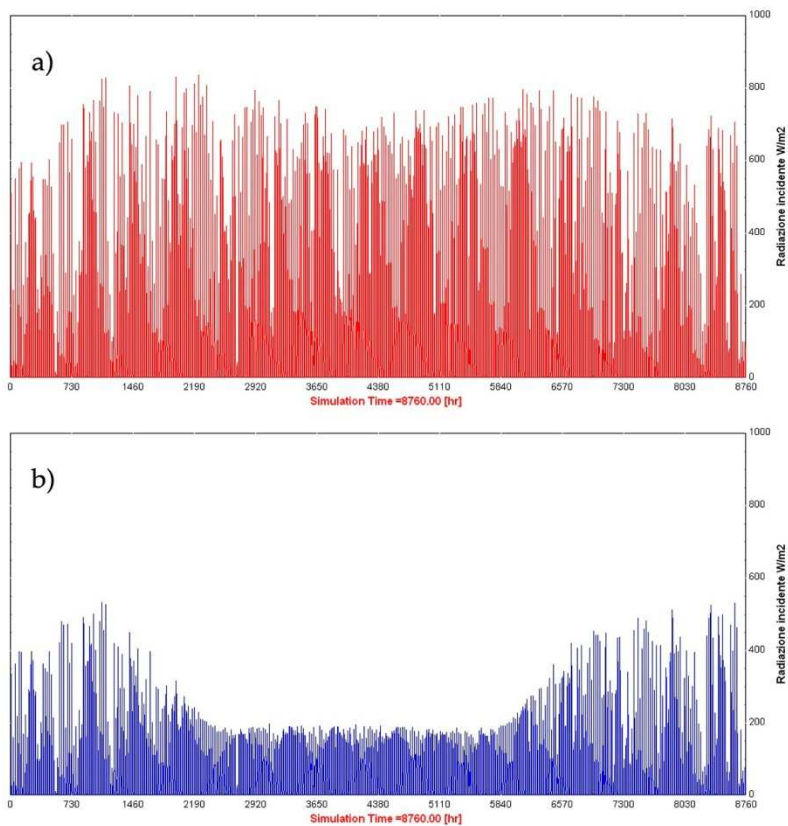


Figura 51 - Radiazione totale incidente senza tettoia (a) e con tettoia (b)

Studio delle ombre su edificio

L'edificio essendo disposto in un contesto urbano densamente abitato è investito da diverse ombre prodotte dagli edifici con esso confinanti o con un sufficiente rapporto altezza/distanza. Con il software TRNsys è possibile grazie alla *Type 68* denominata "Shading Masks" inserire in un file esterno la posizione degli spigoli degli edifici limitrofi e lasciar calcolare al software le ombre e i loro

effetti. Tale approccio di non immediato impiego è recentemente oggetto di studi a livello universitario e passa tramite l'impiego di diversi software interagenti tra cui Sketch-Up di Google per la realizzazione del modello 3D partendo dalle immagini da satellite del quartiere e la successiva analisi del modello stesso in Ecotec dell'Autodesk per il calcolo delle ombre [11]. Come approccio semplificato è possibile ricostruire tramite l'analisi degli output sulla posizione solare (vedi punto 4.2.1) un grafico che sia da base e partenza per considerazioni generali nonché per il calcolo grafico delle ombre. In Figura 52 si riporta tale grafico frutto dello studio solare svolto per l'edificio dell'AAMS. Sono riportati con una curva rossa la traiettoria solare massima (solstizio d'estate) e con la curva blu quella minima (solstizio d'inverno). E' possibile leggere sull'asse radiale l'elevazione del sole (opposto dell'angolo zenitale) e sull'asse radiale la corrispondente localizzazione azimutale. Si legge ad esempio che il sole sorge, naturalmente a Est, ma con angoli compresi tra -117° e -56° di azimuth e che raggiunge a Sud valori di elevazione compresi tra 25° e 71° .

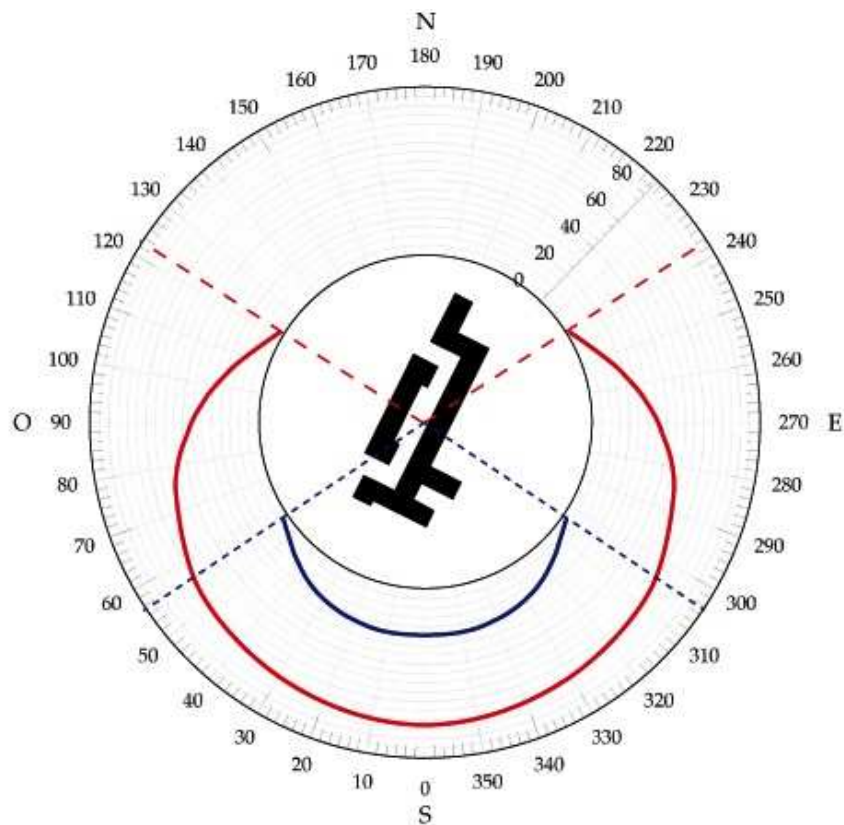


Figura 52 - Studio delle ombre e loro localizzazione

Per valutare le ombre ad ogni posizione solare è necessario tracciare un fascio di linee parallele alla linea che congiunge il centro del grafico con l'angolo azimutale scelto e leggere sul grafico la sua elevazione (α) come punto di intersezione con la relativa curva di elevazione. Unico valore ancora incognito è la lunghezza dell'ombra (l) calcolabile con la seguente semplice relazioni trigonometriche:

$$l = \frac{h}{\tan \alpha} \quad (7.4)$$

ove h indica l'altezza dell'oggetto che genera l'ombra. Applicando questo metodo si riesce a determinare che vari lucernai dell'edificio nuovo non ricevono mai la luce diretta e una quantità notevole delle superfici vetrate sono coperte dalle ombre per buona parte dell'anno. Gli edifici confinanti, i due stabili e la forma particolare dell'edificio nuovo sono spesso di impedimento per la radiazione diretta. Si è tenuto conto di quanto detto modificando alcuni coefficienti di esposizione delle singole finestre, intervenendo in modo esplicito sui parametri "External shadow factor". I coefficienti adottati tengono conto della posizione in pianta e in altezza delle diverse finestre.

Ponti termici

La discontinuità e le giunzioni negli elementi strutturali di un edificio provocano modifiche al flusso termico monodimensionale creando dei ponti termici. In generale questi si localizzano in corrispondenza di un nodo tra elementi aventi coefficienti di trasmissione diversi e più precisamente:

- *nelle zone d'angolo tra due pareti esterne;*
- *quando entro una struttura sono inseriti elementi strutturali a più alta conduttività termica;*
- *tra muro esterno e pavimento;*
- *in corrispondenza di serramenti.*

I ponti termici sono causa di due effetti importanti:

- *diminuzione della temperatura superficiale interna in corrispondenza della discontinuità;*
- *aumento del flusso termico.*

Le modalità costruttive spesso comportano inevitabili disomogeneità di comportamento termico lungo le strutture perimetrali generando ponti termici di due tipi: di forma e/o di struttura con le pareti sono soggette a flussi termici bi- e tri-dimensionali anziché mono-dimensionali analizzabili solo con sistemi di calcolo oltre che dinamici come il TRNsys anche locali come possono essere software ai volumi finiti. I ponti termici di forma si verificano, ad esempio, quando due pareti esterne formano un angolo. I ponti termici di struttura si localizzano in corrispondenza di discontinuità causate dall'inserimento di elementi aventi caratteristiche termiche diverse nella struttura perimetrale. La sovrapposizione di un ponte termico di forma ad un ponte termico di struttura (ad esempio un pilastro in posizione d'angolo) esalta l'effetto negativo. Il ponte termico si verifica ordinariamente nella zona di confine tra due materiali diversi

(ad esempio un pilastro di calcestruzzo armato in una parete di laterizio oppure nell'angolo dove si incontrano due pareti fra loro ortogonali), a titolo di correzione si aggiunge allora un flusso termico proporzionale allo sviluppo lineare del ponte termico stesso con un coefficiente di proporzionalità che dipende dalla geometria e dai materiali impiegati secondo tabellazioni che si ritrovano sui manuali e normative appositamente.

Nel modello TRNsys non è possibile calcolare direttamente i ponti termici localizzati ed è quindi obbligatorio aggiungere a posteriori la quota di flusso termico persa con questi. In questo lavoro data la presenza dei dati di diagnosi energetica si ricaverà nel range standard per un edificio simile il valore reale percentuale di perdite per ponti termici che verrà quindi assunto come dato di progetto.

I valori desunti sono vicini a quelli in linea con la tipologia di struttura e compresi tra +13% e +15%.

7.3.2 OUTPUT MODELLO NUMERICO TRNSYS

Terminata l'operazione di taratura del modello si verifica la veridicità dell'analisi diagnostica e si ricavano alcuni dati per via indiretta. Il calcolo in regime transitorio dà la possibilità di ottenere in output l'andamento delle temperature e il fabbisogno energetico per ciascuna delle zone impostate e poterne così studiare e verificare le peculiarità. Questi dati, insieme ad altri valori saranno riportati e commentati di seguito.

Temperature da calcolo

Tra i principali output dell'analisi vi è quello delle temperature che permette di intuire il comportamento delle varie zone e scoprirne peculiarità, vulnerabilità e probabili punti di intervento. Essendo state impostate le temperature di progetto per determinate fasce orarie è evidente che i grafici presenteranno un comportamento alternato tra zone a temperatura costante e zone di transizione verso la temperatura ambiente. Nelle prime sarà l'energia fornita dal sistema termico a sopperire alle perdite verso l'esterno, mentre nelle zone in transitorio sarà esclusivamente l'inerzia termica ad opporsi alle variazioni di temperatura interna. Si sottolinea che solo un metodo di calcolo in regime transitorio è in grado di evidenziare questo comportamento non trascurabile nei climi temperati e negli edifici con una dotazione termico strutturale scadente e parti ad elevata inerzia termica come nel nostro caso.

Iniziamo con l'analizzare la Figura 53 ove è riportato l'andamento annuale delle temperature del piano terra, del primo piano interrato e dell'ambiente esterno per l'edificio nuovo. Il comportamento termico del primo piano, rispecchia quanto fin qui detto, quello dell'ambiente esterno segue i dati statistici presenti nel database usato (Meteonorm) e le temperature dei locali interrati vengono calcolati secondo la relazione 7.3 adottata. A tal proposito si fa notare che i parametri scelti per quest'ultima relazione forniscono dei valori di temperatura plausibili e compresi tra 11° e 20° C e in stretta relazione con l'ambiente esterno e la temperatura del piano terra disperdente verso il piano interrato. I termici sono attivi negli orari e nei giorni prestabiliti e garantiscono le

temperature richieste. L'andamento delle temperature fanno registrare sbalzi termici notevoli nei periodi più rigidi mentre, come naturale che sia, nei mesi primaverili e autunnali la temperatura è naturalmente compresa nel range richiesto senza l'ausilio di sistemi termici ausiliari. Dall'osservazione complessiva del comportamento delle varie zone si registrano nell'arco dell'anno il valore massimo di +32°C e il valore minimo di +5°C raggiunti nei giorni con temperature esterne estreme e in assenza di condizionamento.

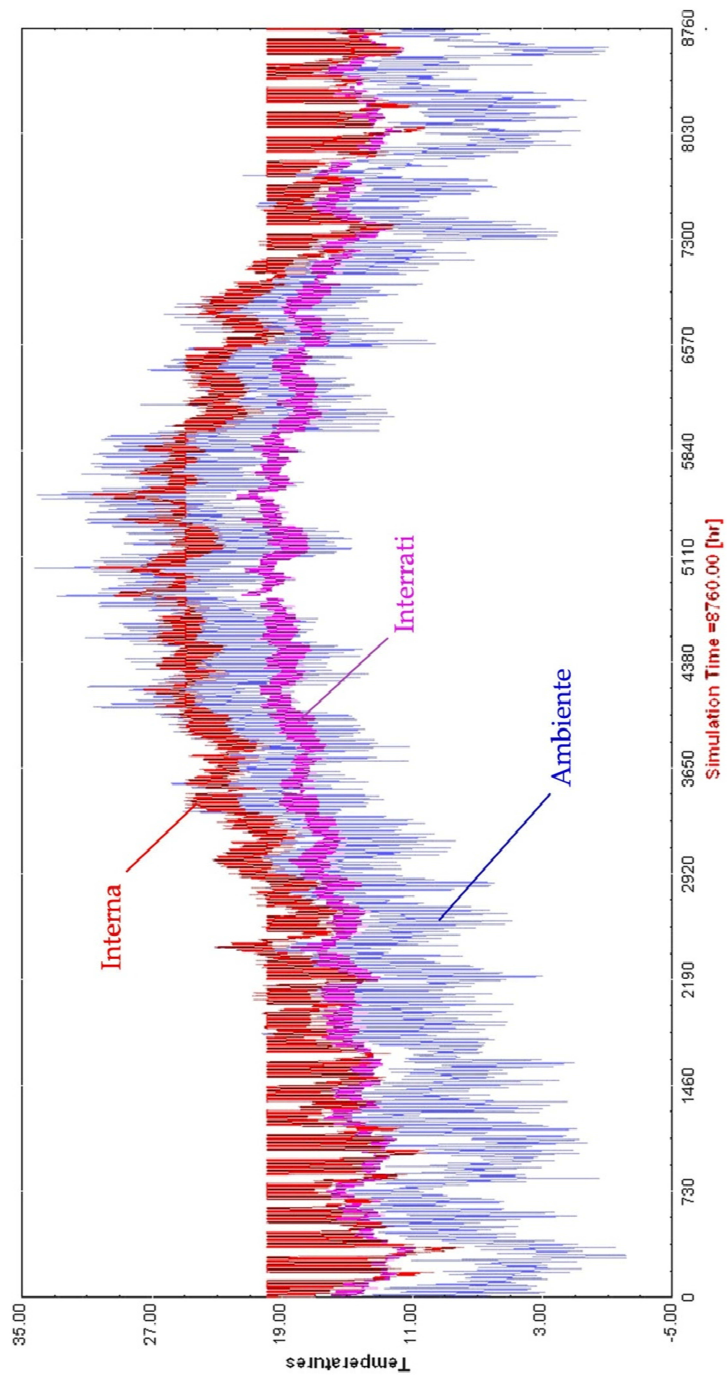


Figura 53 - Andamento temperature Piano terra-Piano interrato per l'edificio nuovo nell'arco di un anno

Scendendo maggiormente nel dettaglio e analizzando l'output composto di Figura 54 si può apprezzare il comportamento delle diverse zone in settimane dell'anno particolarmente esemplificative. Il comportamento invernale del primo riquadro(a) mostra come il piano terra e quello rialzato richiedano maggiore energia portandosi naturalmente a temperature più basse. I piani intermedi presentano un comportamento simile. Tutti i piani presentano, comunque, livelli bassi di inerzia termica con un rapido abbassamento delle temperature in assenza di riscaldamento. Si apprezza, inoltre la raffinatezza del calcolo in transitorio per la variabilità della potenza termica richiesta che ha un massimo all'avvio per giustificare la quota di energia che viene assorbito dalle masse strutturali nella fase di transitorio termico e una riduzione a metà giornata ove gli apporti esterni (termico + solare) sono massimi. Il comportamento primaverile (b) evidenzia come non sia necessario alcun intervento termico ausiliario essendo in questo caso l'andamento della temperatura naturale nell'edificio compresa in quella di comfort. Nel periodo estivo (c) le temperature ambiente sono superiori a quelle ammesse all'interno e quindi è necessario l'intervento del raffrescamento artificiale. Si fa notare come il piano rialzato a causa del maggiore rapporto superficie vetrata/volume e dell'assenza di ombre di altre edifici assume temperature e quindi consumi maggiori.

Energie e potenze da calcolo

L'analisi termo-energetica svolta con TRNsys ci permette di studiare l'andamento della potenza termica richiesta. L'integrale nel tempo della potenza corrisponde all'energia e rappresenta il valore di sintesi per un dato periodo.

In Figura 55 è riportato l'andamento delle potenze per l'intero anno solare sia per l'edificio nuovo che per l'edificio storico. Si nota subito, essendo state espresse con la stessa scala, che le potenze, e di conseguenza i consumi, richiesti dall'edificio storico sono in valore assoluto ben inferiori a quelli del nuovo stabile. Ciò significa che a livello globale gli impianti svolgono la loro maggiore attività a servizio del nuovo edificio avendo questo un volume maggiore ma, come mostreremo, essendo anche meno efficiente. Si nota inoltre che a causa dell'elevata inerzia termica dell'immobile storico e dalla più bassa percentuale di superfici trasparenti questo riesca ad avere oltre che un'efficienza globale maggiore anche consumi più bassi nelle stagioni a clima più mite. I dati riportati in Tabella 12 confermano quanto detto ed evidenziano che il fabbisogno dell'edificio storico rappresenta il 19% del totale per riscaldamento e il 12% per raffrescamento.

Altra analisi interessante è stata svolta su i dati delle potenza estrapolati con cadenza oraria e ordinati in ordine crescente. L'operazione genera il grafico di Figura 56. In questo grafico si nota come i picchi di potenza sono corrispondentemente vicini a quelli degli impianti disponibili, riconfermando la buona taratura del modello numerico.

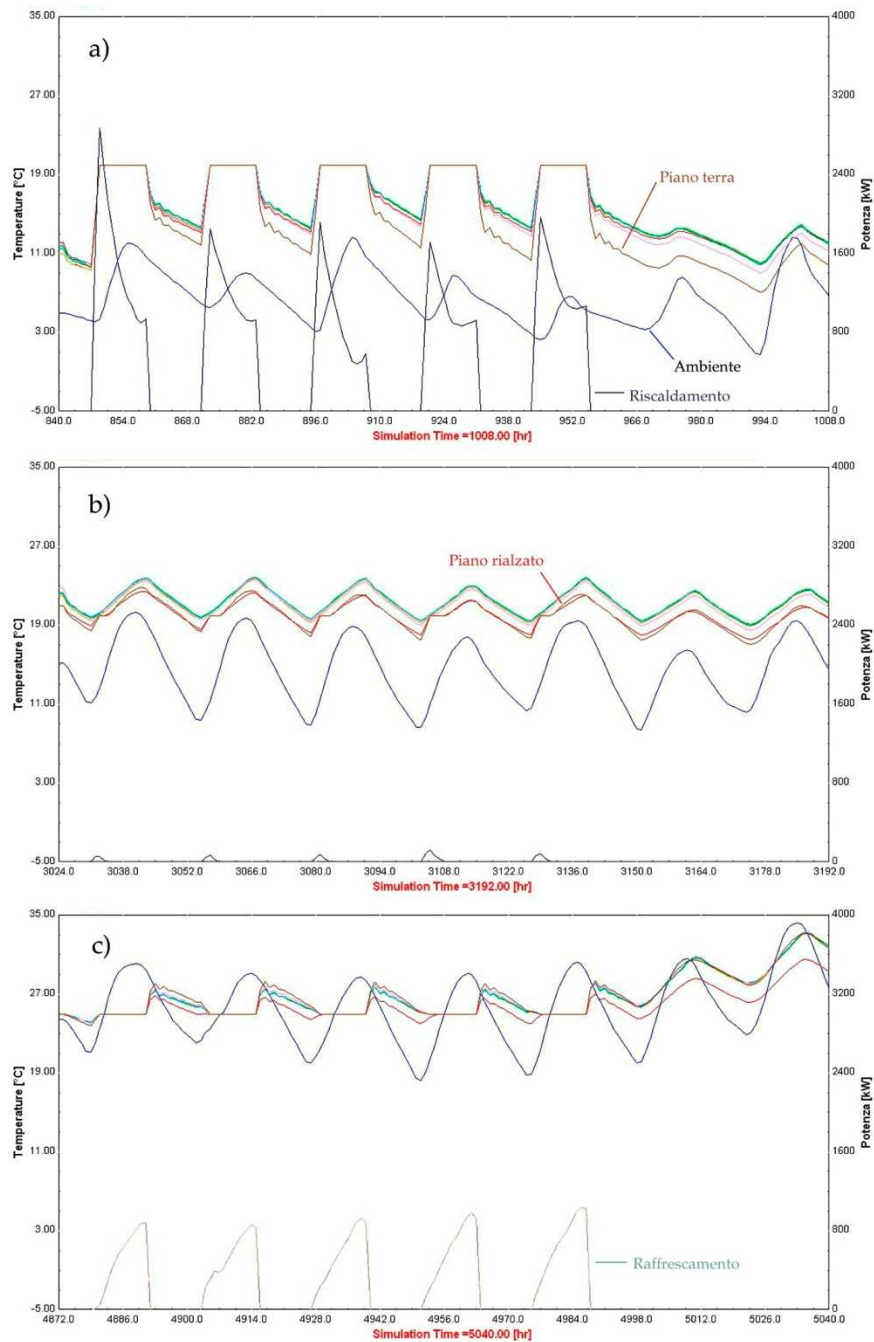


Figura 54 - Andamento temperature e richiesta energetica in settimane: a) invernale, b) primaverile, c) estiva.

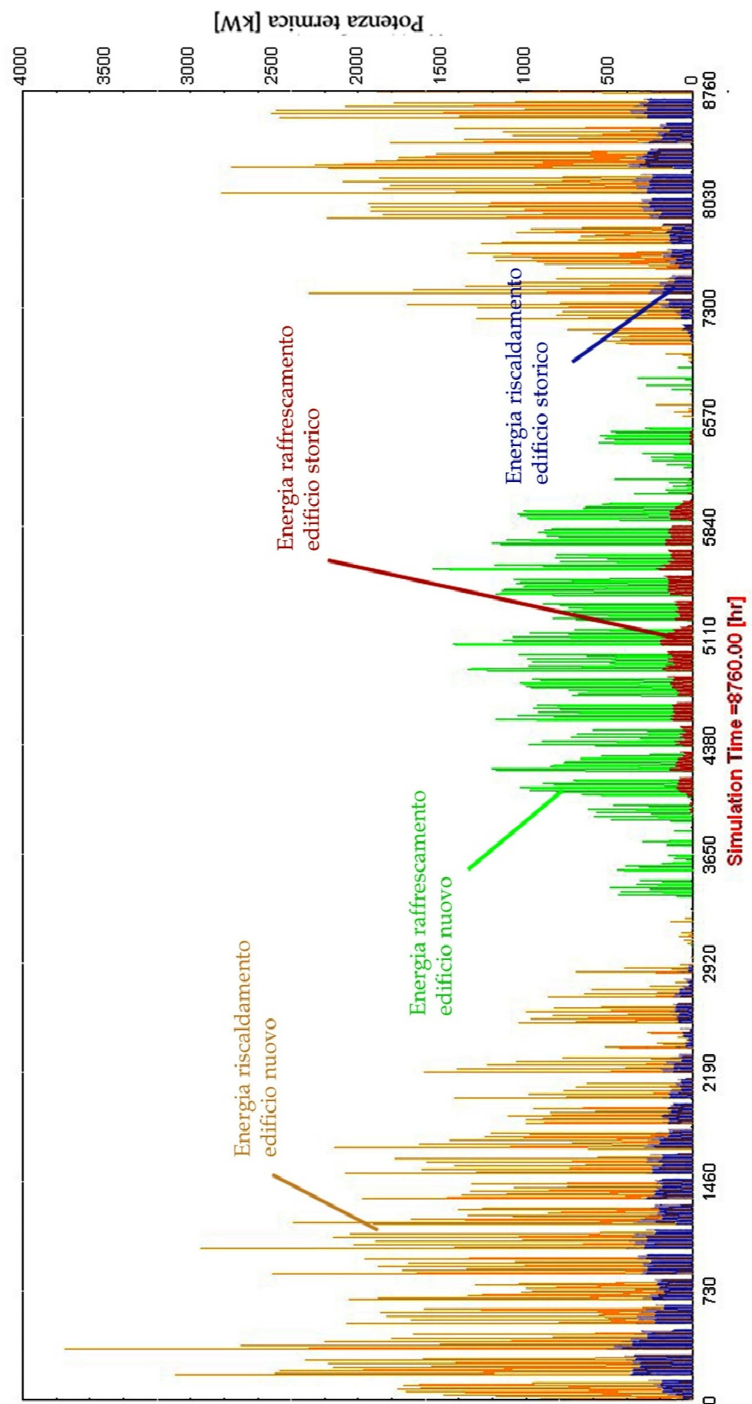


Figura 55 - Andamento richiesta di potenza termica nell'arco di un anno.

	Ed. nuovo	Ed. storico	Globale
Riscaldamento [kWh/anno]	1.238.500	290.730	1.529.230
Raffrescamento [kWh/anno]	572.700	82.950	655.650
EPi [kWh/m ³ anno]	19,4	15,3	18,4
EPe [kWh/m ³ anno]	9,0	4,5	8,2

Tabella 12 - Fabbisogno calcolato con modello TRNsys edificio A.A.M.S.

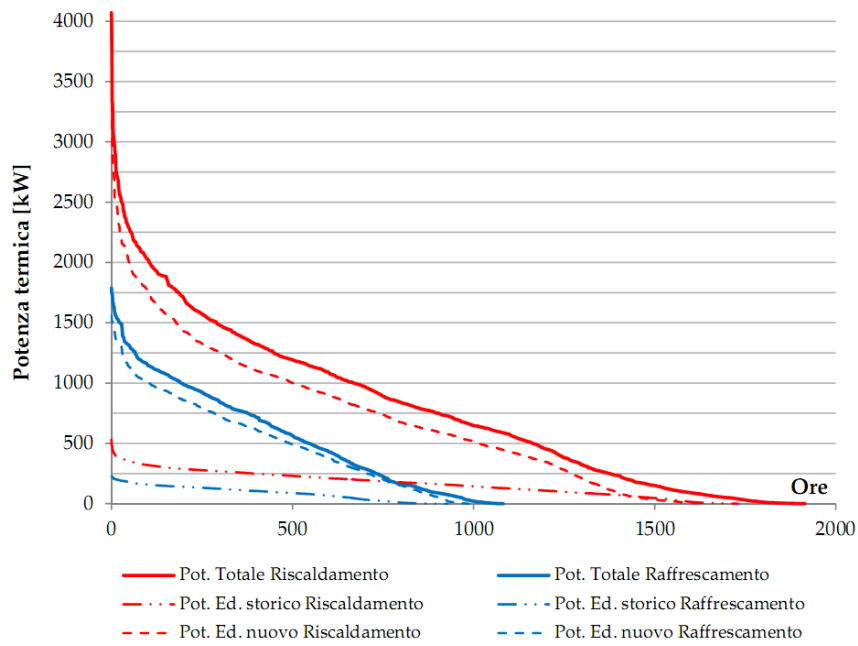


Figura 56 - Grafico delle potenze in ordine decrescente.

Il grafico risulta particolarmente interessante perché permette di apprezzare la sensibile differenza tra l'edificio nuovo e quello storico. Il primo, infatti, ha una richiesta energetica molto meno costante rispetto al nuovo stabile; ciò lo penalizza impiantisticamente poiché comporta un dimensionamento delle macchine termiche con potenze massimali alte e comunque lontane dalle medie di impiego. Si sono poi calcolate le potenze medie che risultano per il riscaldamento:

- *Edificio nuovo = 748 kW*
- *Edificio storico = 168 kW*

e per il raffrescamento:

- *Edificio nuovo = 527 kW*
- *Edificio storico = 89 kW*

Per effettuare un raffronto con i classici indici energetici globali si sono effettuate le medie pesate sui volumi e riportati i risultati nella Tabella 12. I valori sono da essere confrontati con quelli già calcolati al [7.2.3](#) con la diagnosi energetica e le cui lievi discordanze risultano perfettamente accettabili.

8. RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DELL'EDIFICIO SEDE DELLA DIREZIONE GENERALE A.A.M.S.

INDICE CAPITOLO

8.1	ANALISI DEI SINGOLI INTERVENTI.....	110
8.1.1	EDIFICIO STORICO.....	110
8.1.2	EDIFICIO NUOVO	113
8.2	INTERAZIONE DEGLI INTERVENTI.....	114
8.2.1	VENTILAZIONE FORZATA NOTTURNA	117
8.3	INTEGRAZIONE CON SISTEMI A FONTI RINNOVABILI.....	119
8.3.1	IMPIANTO A COLLETTORI SOLARI.....	121
8.3.2	DATI ENERGETICI COPERTURA IMPIANTO.....	126
8.3.3	SVILUPPI CON SOLARE A CONCENTRAZIONE.....	127

Una volta realizzato il modello è relativamente semplice ripercorrere il calcolo variando i parametri di progetto e così testare l'esito energetico delle proposte progettuali. Tra i vari interventi la prima scelta spetta comunque al progettista che con la sua esperienza e di pari accordo con il committente effettua una preselezione sugli interventi fattibili e realmente efficaci. Il calcolo fornirà poi la quantizzazione numerica di quanto intuitivamente previsto. Si analizzano prima alcuni interventi sull'edificio storico e poi sull'edificio nuovo.

8.1 ANALISI DEI SINGOLI INTERVENTI

8.1.1 EDIFICIO STORICO

Partendo dal dato mostrato nel capitolo precedente per cui lo stabile storico concorre in misura minore ai consumi totali si sono volute comunque proporre delle indicazioni di intervento. Si è ipotizzato di modificare l'involucro esterno disponendo del materiale isolante per modificare la trasmittanza delle superfici opache e di sostituire le superfici vetrate con vetri a maggiore efficienza energetica.

Variazione trasmittanza superfici opache

Si sono effettuate delle modifiche al modello per considerare la disposizione di materiale isolante di diverso spessore sulle pareti perimetrali e sui solai di delimitazione diretta con gli ambienti non riscaldati (copertura e piano terra). Il materiale isolante considerato è caratterizzato da una capacità termica di 700 J/kg K, una conduttività termica di 0,18 kJ/h m K e una densità di 80 kg/m³

Si sono proposti 6 diversi interventi sulle strutture; ognuno poi confrontato con la situazione di calcolo all'attuale per valutarne gli effetti. I risultati sono riportati in Tabella 13 e in Figura 58. Come si nota i risultati sono differenti al variare della disposizione dell'isolante. Essendo i solai, le chiusure termicamente meno efficiente, influenzano sensibilmente il comportamento globale. Anche se qui non se ne riportano i risultati, sono state svolte altre simulazioni con cui si è

valutato il posizionamento relativo dell'isolante rispetto alla parete e la messa in opera di isolamento anche per i solai di interpiano. Per quest'ultimo caso si è registrata una riduzione dei fabbisogni inferiore a quella che si ottiene per le delimitazioni verso l'esterno e comunque relativamente decrescente al migliorare delle prestazioni delle superfici disperdenti verso l'esterno.

Con le proposte fatte si riesce a ridurre il fabbisogno totale fino a portarlo al 76% di quello attuale²³.

Si consideri che già un minimo intervento con spessori di isolante di 2 cm porta ad una riduzione del fabbisogno al 86% dell'attuale. Inoltre, come osservato anche in altri studi lo spessore di isolante non è legato linearmente con il fabbisogno totale ma il vantaggio decresce progressivamente questo impone di effettuare la scelta a valle di correlazioni di tipo economico sull'investimento globale.

Isolamento	EPi	EPe	EPi+EPe	
2 cm perimetrale	13,45	4,40	17,85	90%
6 cm solai	13,00	4,60	17,6	89%
2 cm perimetrale + 2 cm solai	12,65	4,30	16,95	86%
2 cm perimetrale + 6 cm solai	12,20	4,20	16,40	83%
4 cm perimetrali + 6 cm solai	11,50	4,00	15,50	78%
6 cm perimetrali + 6 cm solai	11,20	3,70	14,90	76%
Vetri				
Vetro doppio	14,1	4,4	18,5	93%
Vetro doppio Krypton	13,8	4,1	17,9	90%

Tabella 13 - Effetti interventi di riqualificazione - edificio storico

Variatione tipologia superfici trasparenti

Si valutano gli effetti della sostituzione dei vetri delle superfici trasparenti. I vetri variano tra i seguenti individuati dai rispettivi parametri:

	Spessori	U-value	G-value	T-sol	R _f -sol
Vetro singolo	4	5,68	0,855	0,83	0,075
Vetro doppio	4/16/4	2,83	0,755	0,693	0,126
Vetro Krypton	4/16/4	0,81	0,632	0,462	0,237

ove *U-value* indica la trasmittanza e *G-value* il valore di assorbimento solare, determinando il primo, le perdite verso l'esterno e il secondo gli apporti solari.

I risultati sono riportati in Tabella 13 e in Figura 58. Si vede come la scelta di modificare i vetri potrebbe essere economicamente poco vantaggiosa. L'intervento infatti ha spesso un costo elevato rispetto ai benefici limitati che porta. Con i vetri delle tipologie scelte il calcolo mostra nonostante incrementi di prestazione specifica dei serramenti di alto livello un massimo della riduzione del fabbisogno ottenibile pari al 90%. Ciò può essere spiegato con la scarsa estensione delle superfici vetrate e una loro non totale esposizione a causa delle ombre generate dagli edifici circostanti.

²³ I valori del fabbisogno attuale sono riportati in Tabella 12

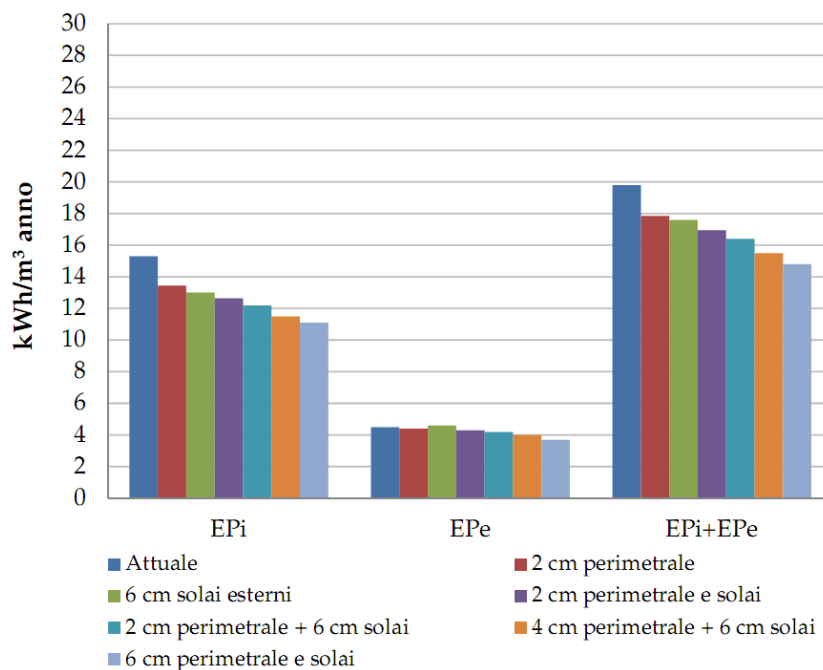


Figura 57 - Riduzione fabbisogno energetico per interventi di isolamento edificio storico

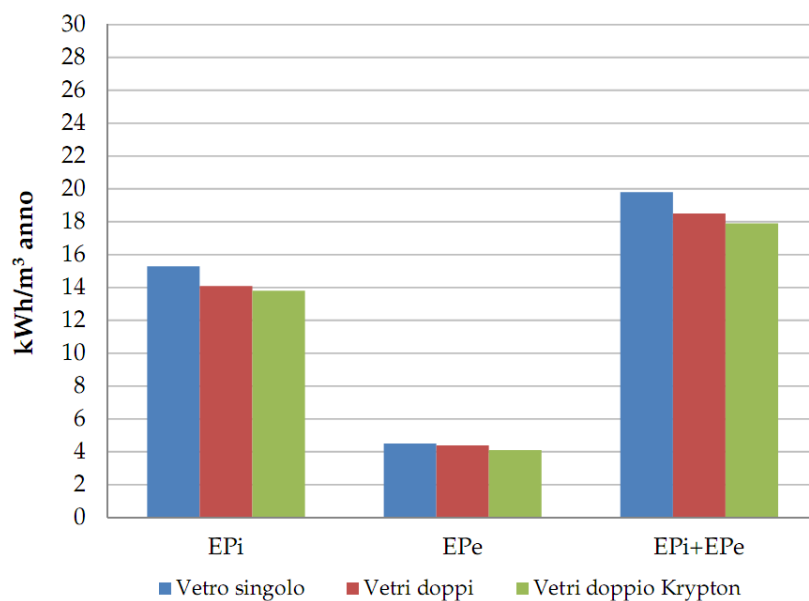


Figura 58 - Riduzione fabbisogno energetico per sostituzione vetri - edificio storico

8.1.2 EDIFICIO NUOVO

La stessa filosofia di intervento viene adottata nel caso dell'edificio nuovo. Questo è totalmente differente dal precedente per tipologia ed epoca costruttiva, dimensioni, percentuale di superfici trasparenti, ecc. In questo stabile, come si è dedotto dalla fase diagnostica, le superfici vetrate e i ricambi d'aria incontrollati hanno un ruolo significativo. Dato la scarsa attenzione riposta in fase di realizzazione alle problematiche di natura energetica, si affronterà in ogni caso la problematica in modo globale proponendo come per l'edificio storico interventi similari.

Variatione trasmittanza superfici opache

Come per il caso precedente si è studiato la messa in opera di uno strato di isolante in grado di migliorare la trasmittanza delle superfici opache. La sua disposizione è stata prevista per quelle superfici che confinano con i locali interrati. I risultati riportati in Tabella 14 e in Figura 59 confermano quanto intuitivamente già anticipato e cioè che il peso delle superfici vetrate in questo edificio è sicuramente determinante e l'intervento sulle superfici opache porta a dei miglioramenti ma comunque limitati dall'inefficienza delle ampie finestrate. Le soluzioni ricercate per spessori di isolante da 2 a 8 cm. La massima riduzione del fabbisogno energetico termico è pari al 85% con, anche in questo caso, una diminuzione dell'efficacia dell'intervento al crescere dello spessore di isolante.

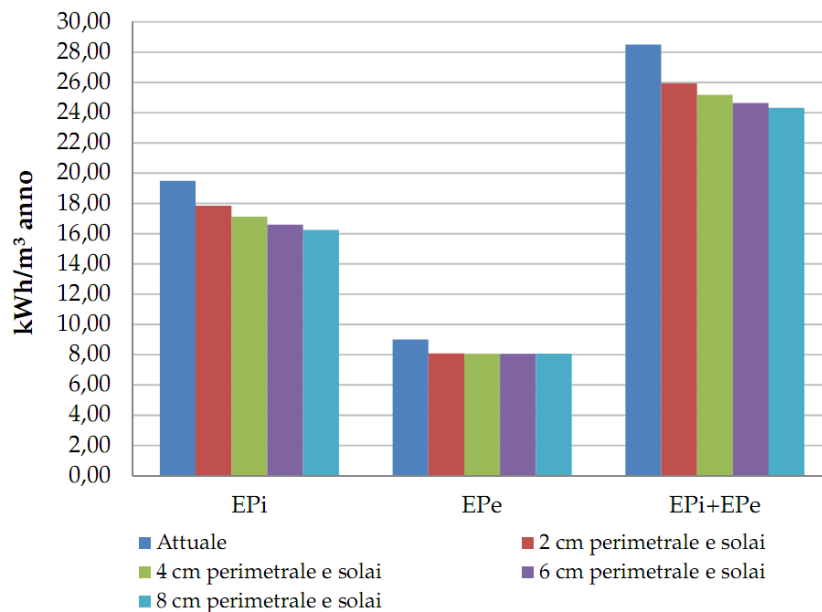


Figura 59 - Riduzione fabbisogno energetico per isolamento - edificio nuovo

Variatione tipologia superfici trasparenti

Ipotizzando la sostituzione con gli stessi vetri già oggetto delle simulazioni di riqualificazione per l'edificio storico si è svolto il calcolo anche per l'edificio nuovo. Si è evidenziato come riportato in Figura 60 e in Tabella 14 che la

sostituzione dei vetri in questo caso genera riduzioni del fabbisogno energetico più sostanziose con valori pari al 73% e al 81% rispettivamente per i doppi vetri standard e per quelli con Krypton di caratteristiche come riportato precedentemente. Altro aspetto interessante è che con la sostituzione dei vetri si ha un incremento del fabbisogno estivo. Ciò conferma la possibilità di pensare ad un sistema di ventilazione forzata notturna che possa abbassare le temperature sfruttando la naturale escursione termica tra giorno e notte.

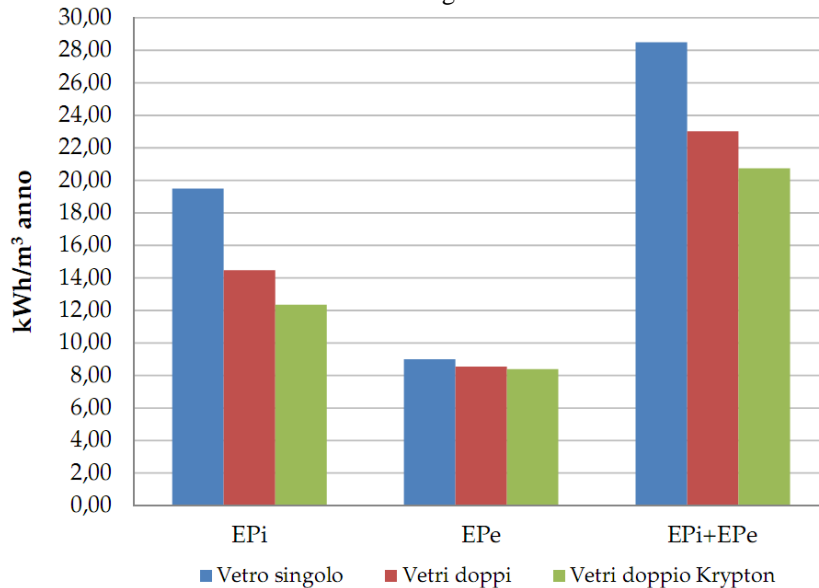


Figura 60 - Riduzione fabbisogno energetico per sostituzione vetri - edificio nuovo

Isolamento	EPi	EPe	EPi+EPe	
2 cm perimetrale e solai	17,84	8,09	25,93	91%
4 cm perimetrale e solai	17,12	8,06	25,18	88%
6 cm perimetrale e solai	16,60	8,05	24,65	86%
8 cm perimetrale e solai	16,25	8,07	24,32	85%
Vetri				
Vetro doppio	14,47	8,55	23,02	81%
Vetro doppio Krypton	12,35	8,41	20,76	73%

Tabella 14 - Effetti interventi di riqualificazione - edificio nuovo

8.2 INTERAZIONE DEGLI INTERVENTI

Trattandosi di un modello dinamico di analisi il proporsi di alcuni fattori non contemporaneamente ad altri può tradursi in una non linearità della soluzione. Questo comporta la necessità di dover effettuare il calcolo energetico sull'intero

progetto di riqualificazione con tutti gli interventi agenti contemporaneamente e valutarne gli effetti. Trattandosi di un modello complesso le differenze di trasmittanza tra le pareti e le superfici vetrate potrebbero indurre una non corretta distribuzione dei flussi termico-energetici tra le varie zone e tra ciascuna zona e l'esterno.

Si assumerà che gli interventi adottati siano efficientemente realizzati ad opera d'arte e permettano di raggiungere gli obiettivi tecnici prefissati tra cui la riduzione delle infiltrazioni grazie a serramenti più efficienti e la riduzione dei ponti termici grazie ad una attenta e continua posa in opera dell'isolamento.

Per l'edificio nuovo si progetta di disporre uno strato di 4 cm di isolante sulle pareti perimetrali e di 6 cm ai solai di copertura e del pian terreno, di sostituire il vetro singolo di tutte le finestre con vetri doppi standard.

	Ed. nuovo	Ed. storico	Globale
Riscaldamento [kWh/anno]	608.000	243.100	851.100
Raffrescamento [kWh/anno]	550.200	75.800	626.000
EPi [kWh/m ³ anno]	9,5	12,8	10,3
EPe [kWh/m ³ anno]	8,6	4,0	7,5

Tabella 15 - Fabbisogno ricalcolato con modello TRNsys edificio A.A.M.S. post-interventi alle strutture

In seguito a questi lavori il calcolo evidenzia (si veda Figura 61) quasi un dimezzamento dei consumi invernali per il riscaldamento ma alcun vantaggio del consumo per il raffrescamento estivo. Questo comportamento può essere interpretato attraverso l'osservazione dei dati più specificatamente tecnico dinamici del calcolo: il rapporto tra dispersioni termiche e apporti solari. Il fabbricato con gli interventi proposti riduce la sua caratteristica di dispersione verso l'esterno, d'altro canto non diminuendo gli apporti estivi diventa parimenti più difficile per lo stesso smaltire i carichi da solare passivo a cui la struttura è soggetta per sua natura architettonica. Con il calcolo è possibile quantificare il nuovo fabbisogno energetico in:

$$EP_{iN} = 9,5 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

$$EP_{eN} = 8,6 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

si fa notare che un calcolo in regime stazionario avrebbe evidenziato solo il primo risultato dell'intervento, quello invernale, senza verificare il comportamento estivo dell'edificio alla luce delle sue peculiari caratteristiche.

Per l'edificio storico si pensa di intervenire con una disposizione dell'isolamento quanto meno invasiva possibile applicandolo dall'interno sull'attuale intonaco uno strato di 4 cm per la muratura portante perimetrale e di 6 cm per i solai confinanti con zone non climatizzate. La sostituzione dei vetri non comporta effetti tanto positivi da giustificare l'intervento nell'immediato e si suggerisce quindi di rimandare lo stesso a future operazioni di miglioria energetica del fabbricato magari anche alla luce degli esiti della prima trince di lavori.

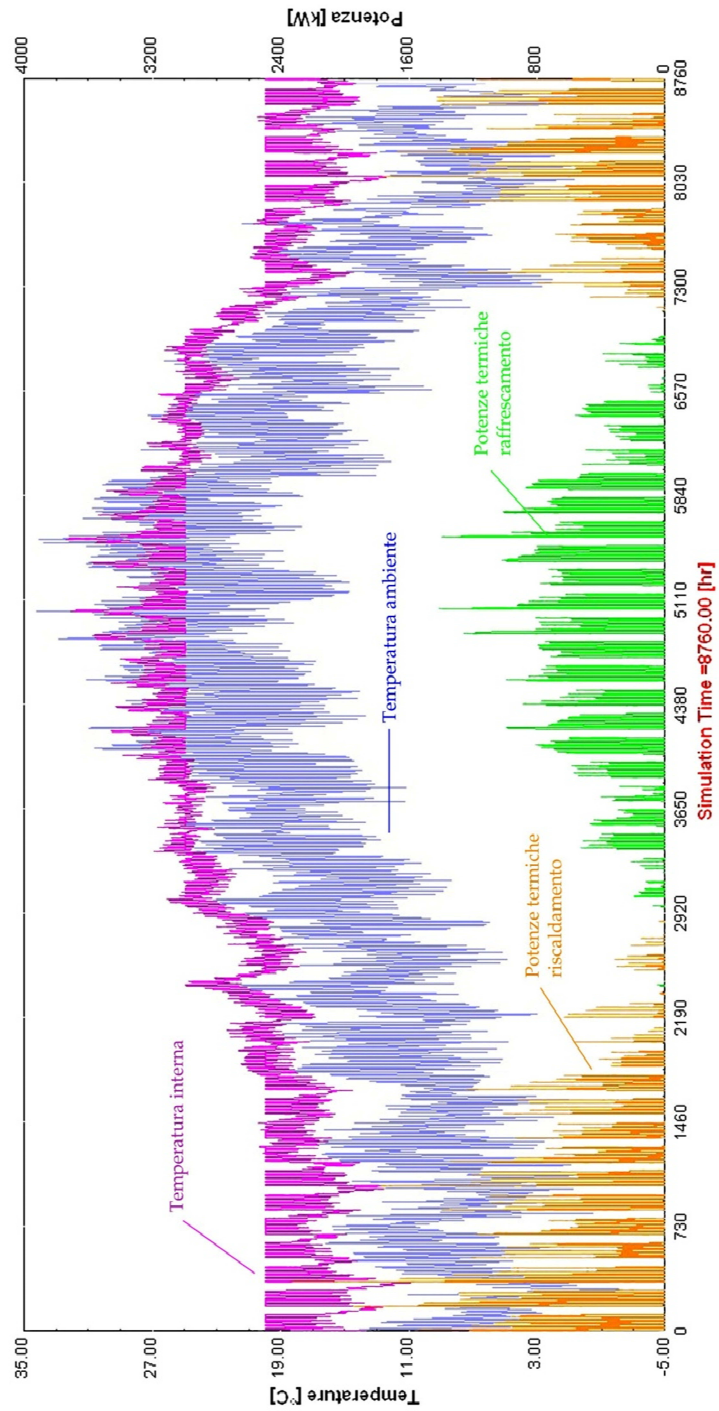


Figura 61 - Temperature e potenze edificio nuovo con interventi sulle strutture.

Considerando il piccolo handicap dell'impossibilità di disporre in modo continuo a cappotto l'isolamento per l'edificio storico si hanno fabbisogni energetici globali per l'intero complesso (edificio nuovo + storico) pari a quelli rappresentati in Tabella 15 da confrontare con quelli richiesti attualmente dai due stabili come indicato precedentemente in Tabella 12.

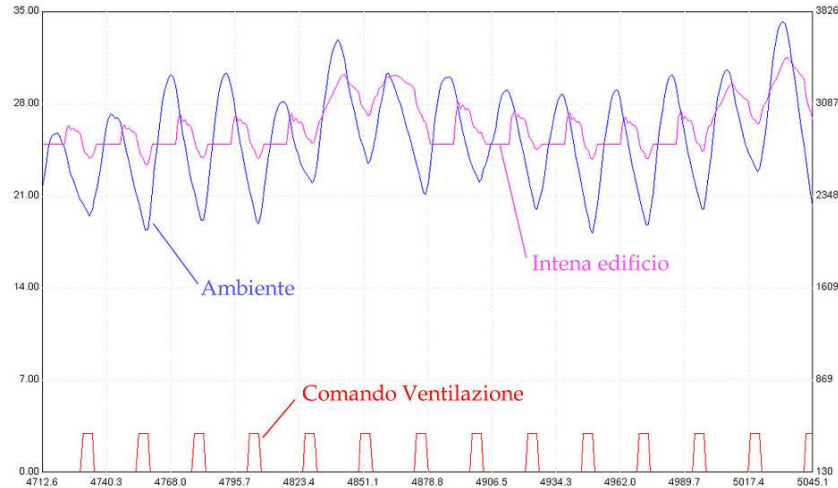


Figura 62 - Temperature con ventilazione notturna.

8.2.1 VENTILAZIONE FORZATA NOTTURNA

Per ridurre il fabbisogno termico estivo dell'edificio nuovo si propone di realizzare un impianto concettualmente semplice ma dalla grande efficacia come evidenziato dal modello di calcolo dinamico implementato in TRNsys. Si è notato infatti che le temperature raggiunte dall'ambiente nella notte sono relativamente basse rispetto a quelle degli interni che, data la maggior efficienza dell'involucro, disperdono difficilmente gli apporti solari dovuti alla radiazione solare incidente sulle ampie vetrate. Il sistema prevede un sistema di ventilazione sul perimetro, capace di notevoli scambi in volume durante la notte per disperdere il calore accumulato nelle ore serali in cui gli ambienti interni non più raffrescati vedono un naturale innalzamento delle temperature. Il sistema previsto, per essere efficace deve essere regolato da un sistema automatico di accensione e spegnimento di facile realizzazione e gestione. Si è ipotizzato, infatti, che il sistema si attivi automaticamente al contemporaneo verificarsi delle seguenti condizioni:

- *Controllo orario di funzionamento notturno (1-6.30).*
- *Temperatura esterna inferiore a quella interna.*
- *Temperatura interna compresa tra (23° e 19°C)*

la prima caratteristica assicura il funzionamento nelle ore notturne precedenti l'avvio degli impianti termici, la seconda verifica che il processo apporti raffrescamento all'interno e non il viceversa, il sistema si accerta che siamo in

condizioni estive con temperature che di notte nello stabile superano i 23°C e si ferma quando si sono raggiunte temperature interne di 19°C per non sprecare energia inutile. Il sistema come descritto prevede per il funzionamento un termometro interno, uno esterno e un timer.

Nel calcolo si è ricostruito il sistema così come descritto e si è impostato un valore di scambio pari a 3 ricambi/h. Il sistema porta come osservato dal calcolo ad un:

$$EP_{eN} = 6,1 \frac{kWh}{m^3 \cdot anno}$$

con una riduzione del fabbisogno energetico per raffrescamento di circa il 30% che in energia termica equivale a una riduzione 160.000 kWh/anno.

Il sistema di ventilazione ipotizzato può essere riprogettato e meglio definito nei suoi parametri principali ripercorrendo il calcolo in transitorio e verificandone gli effetti sul fabbisogno estivo. Il sistema può sfruttare la ventilazione naturale o quella forzata, facendo uso di un sistema di ventilazione forzata il numero di ventole per ciascun piano da installare può essere così calcolato:

$$N_v = \frac{V \cdot n}{3600 \cdot v_p \cdot \pi r^2} \quad (8.1)$$

ove V è il volume in m^3 , n sono i ricambi/h, r il raggio delle ventole installate in m e v_p la velocità dell'aria alle ventole in m/s. Il numero di ore di funzionamento del sistema è ottenibile come output del TRNsys e stimato per il sistema come impostato pari a circa 500 h. L'effetto della ventilazione notturna è chiaramente apprezzabile osservando un estratto degli output TRNsys riportato in Figura 62. Quando le condizioni di funzionamento sono rispettate il sistema avvia la ventilazione con scambio in volume stabilito, l'effetto sulla temperatura è un evidente avvicinarsi della temperatura dell'ambiente a quella che è la temperatura esterna naturalmente sotto i livelli di start per l'impianto di raffrescamento. La grande differenza si ha nei mesi con temperature ambienti più basse, quindi tarda primavera e inizio autunno.

Come già fatto per la fase di diagnosi si è realizzato il grafico delle potenze per evidenziare anche sotto questo aspetto i miglioramenti ottenuti (vedi Figura 63). L'impianto necessità di potenze installate pari quasi alla metà nel periodo invernale con evidenti risparmi nella dotazione e nella manutenzione dell'impianto termico. La potenza massima richiesta scende a circa 2 MW per il riscaldamento e 1,2 MW per il raffrescamento. Le potenze medie richieste sono attorno ai 600 kW e i 500 kW rispettivamente.

Si evidenziano a termine dell'analisi i risultati del calcolo dei fabbisogni energetici termici totali per l'intero complesso con gli interventi fin qui esposti:

- *Riscaldamento = 849.300 kWh/anno*
- *Raffrescamento = 465.450 kWh/anno*

si ricorda che i valori sono di energia termica e non devono essere confusi con i valori di altre forme di energie (ad esempio elettrica) a cui possono essere comunque ricondotti ripercorrendo a ritroso il procedimento già seguito al 7.2.3.

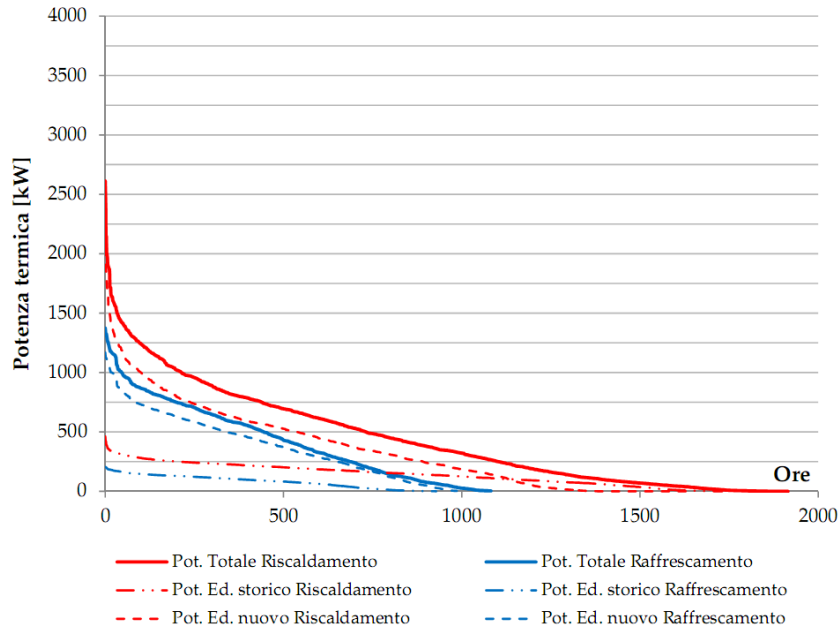


Figura 63 - Grafico delle potenze in ordine decrescente.

8.3 INTEGRAZIONE CON SISTEMI A FONTI RINNOVABILI

Tra i vari sistemi e risorse cosiddette rinnovabili, sicuramente la più consona al nostro caso è l'energia solare. Questa fonte infatti, è facilmente disponibile e sfruttabile grazie all'ampia terrazza piana (circa 3000 m²) presente a copertura dell'edificio nuovo. Rimane quindi da stabilire quale tecnologia di solare attivo scegliere per la captazione e trasformazione. I sistemi più collaudati sono quelli a collettori solari piani o a pannelli fotovoltaici. La scelta più azzeccata sembra quella del solare termico con l'accoppiamento ad una macchina ad assorbimento per sfruttare al massimo i collettori. In questo modo sarà possibile integrare energeticamente gli impianti termici sia nel riscaldamento che nel raffrescamento, riducendo i costi di ammortamento degli stessi.

Il calcolo di questi impianti non è cosa immediata e la loro progettazione esecutiva richiede un lavoro tecnico accurato che esula dalle finalità di questo lavoro. Si è invece preferito qui analizzare i possibili vantaggi ottenibili dalla disponibilità di un'analisi dinamica come quella svolta e di capire le potenzialità di implementazione di un modello più complesso che contemporaneamente analizzi il complesso struttura-impianto in modo dinamico.

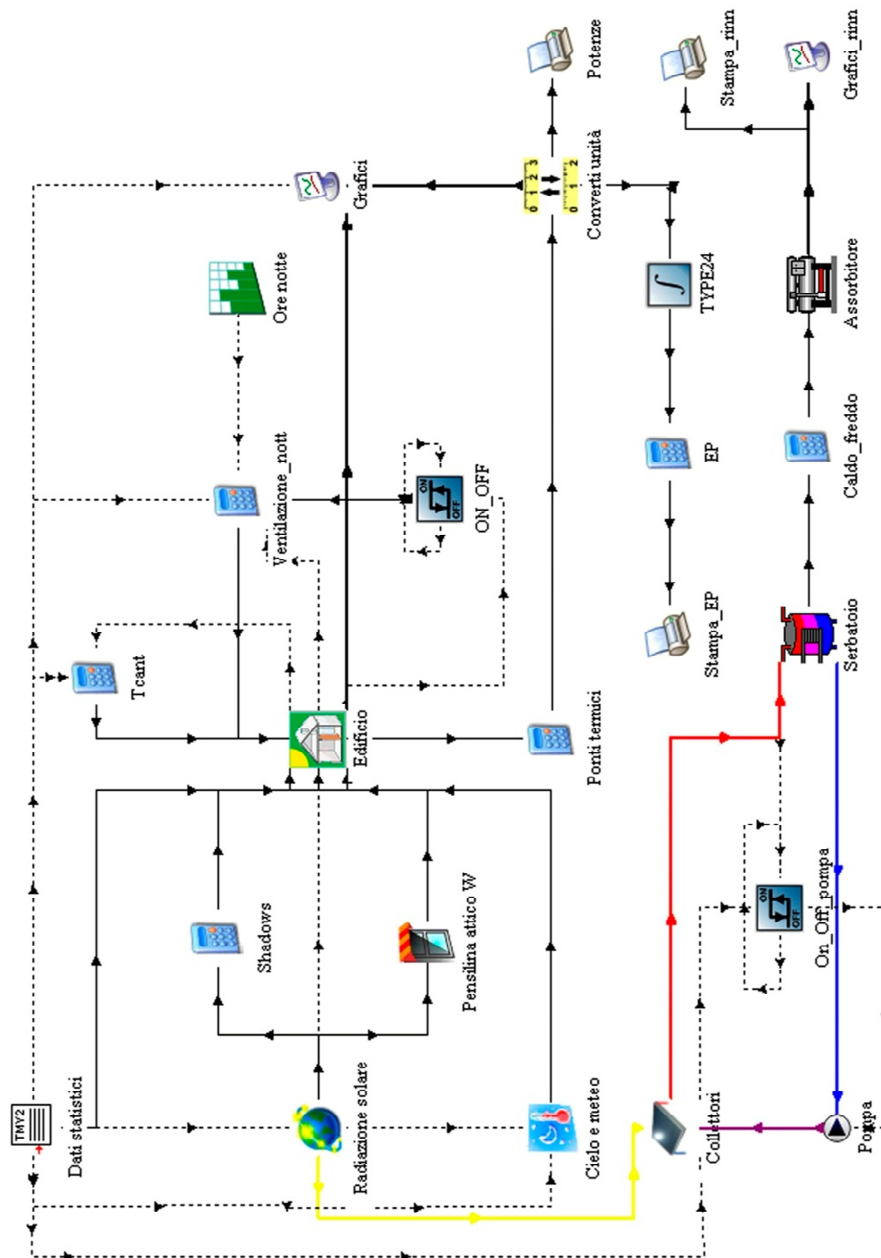


Figura 64 - Modello realizzabile in TRNSys per l'analisi dell'edificio e dell'impianto rinnovabile

Facendo uso del software TRNsys è infatti possibile assemblare un modello unico che inglobi la prima parte di questo lavoro con la seconda per realizzare un modello di complessità maggiore che al passo veda l'interazione tra disponibilità e richiesta energetica permettendo di valutare in modo reale la copertura del sistema da fonti rinnovabili. Un esempio di ciò è il modello riportato in Figura 64 ove alla parte di analisi dell'edificio con la *Type 56* viene aggiunta una parte complementare simile a quella realizzata nella prima parte di questo lavoro che ha la inattività di svolgere in parallelo il calcolo dinamico dell'impianto a fonti rinnovabili. E' il caso di precisare prima di esporre i risultati ottenuti dal calcolo che quest'ultimi sono funzione delle macchine installate e delle caratteristiche tecniche dell'intero impianto. Solo a livello di progetto definitivo è possibile quindi, ottenere una verifica perfettamente coerente con il progetto. A questo stadio del lavoro finalizzato alla ricerca più che alla realizzazione vera e propria sono stati ipotizzati componenti standard con caratteristiche tecniche dedotte da cataloghi delle case produttrici, senza estremizzare la scelta dei componenti per ottimizzare l'impianto stesso, ma concentrandosi sull'interazione con la struttura. Questo si traduce in una verosimiglianza dei dati ma in una loro incertezza superiore a quella che il modello di calcolo permette.

8.3.1 IMPIANTO A COLLETTORI SOLARI

L'impianto che si è scelto di testare è costituito da un campo di collettori solari piani alloggiati sulla copertura dell'edificio nuovo. Essi sono disposti parallelamente con angolo azimutale pari a di 24° Sud e angolo di tilt di 35°. La seguente disposizione anche se non energeticamente ottimale è stata scelta per questioni di efficienza di installazione. Ogni pannello ha un area captante di 2,257 m² e curva di efficienza (vedi Figura 65) con i seguenti parametri:

- $a_0 = 0,8$
- $a_1 = 2,02 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $a_2 = 0,0046 \text{ W/ m}^2\text{K}^2$

Il sistema è praticamente costituito da file di collettori collegati in parallelo e in serie per garantire il rispetto delle condizioni di progetto imposte dalla casa produttrice per le temperature massime del liquido termovettore circolante nell'impianto solare e le portate in circolo. Lo scambio avviene in un serbatoio di raccolta e stoccaggio termico. Nel periodo invernale il calore immagazzinato nel serbatoio sarà direttamente impiegato per lo scambio termico mentre d'estate sarà il motore dello scambio inverso di raffreddamento nella macchina ad assorbimento.

Il progetto procede per step di verifica consecutivi attraverso i quali si determinano i parametri di calcolo per la verifica finale. In prima approssimazione, senza conoscere le caratteristiche specifiche della macchina ad assorbimento da installare si considera un rendimento medio standard costante che possa facilitare il predimensionamento e la scelta dell'estensione del campo

di collettori da installare. Si determina così il rapporto tra il fabbisogno termico totale e la quantità di energia ottenibile dalla fonte solare. In Figura 66 viene riportato l'output rielaborato in Excel per la quantità di pannelli solari di predimensionamento pari a 400 collettori per un'estensione totale di 900 m²

Questa fase risulta molto delicata e determinante per il successivo sviluppo del calcolo. La scelta infatti deve essere fatta considerando non solo i valori integrali dell'energia scambiate ma anche e soprattutto la contemporaneità e la rispettiva proporzionalità tra domanda e offerta energetica. L'energia solare esprimendosi come calore non è stoccabile temporalmente per lassi di tempo tali da permettere una copertura del 100% senza sovradimensionare l'impianto in modo consistente tanto da renderlo oltre che antieconomico anche difficilmente gestibile nei periodi di inutilizzo. Si fa notare che il salto presente tra le circa 3000 e 7000 ore è dovuto al passaggio tra riscaldamento e raffreddamento e quindi all'intervento della macchina ad assorbimento che come ben noto riduce la resa del processo energetico.

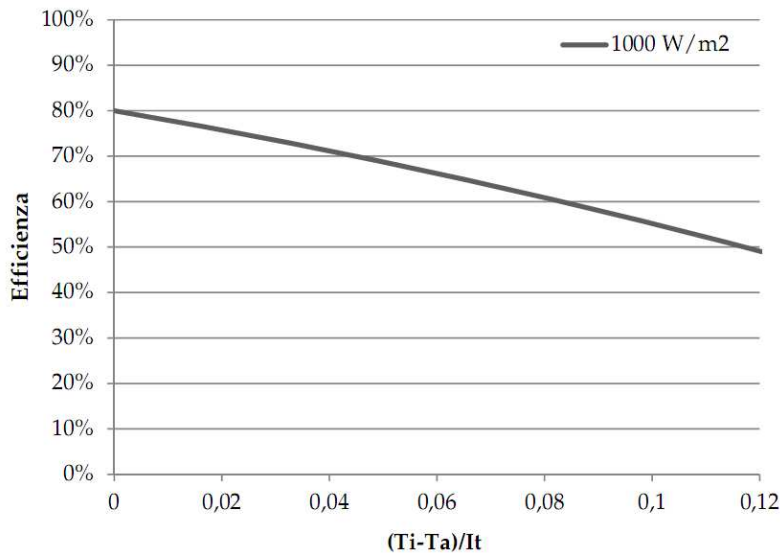


Figura 65 - Curva di efficienza dei collettori solari di calcolo

Tramite il calcolo in transitorio svolto con TRNsys è stato possibile determinare la radiazione solare incidente per pannello che è risultata pari a 4021 kWh/anno. Questa energia è trasformata in calore dai collettori con una media per pannello di 3024 kWh/anno con un'efficienza di circa il 75%. Il dato è interessante e conferma la scelta di pannelli collettori a buon rendimento.

Altro aspetto fondamentale da sottolineare è il lavoro fatto precedentemente nella scelta degli interventi di qualificazione da adottare: la ricerca della proporzionalità nella domanda energetica è propedeutica ad un dimensionamento equilibrato del sistema. L'energia richiesta per il raffreddamento dovrebbe essere

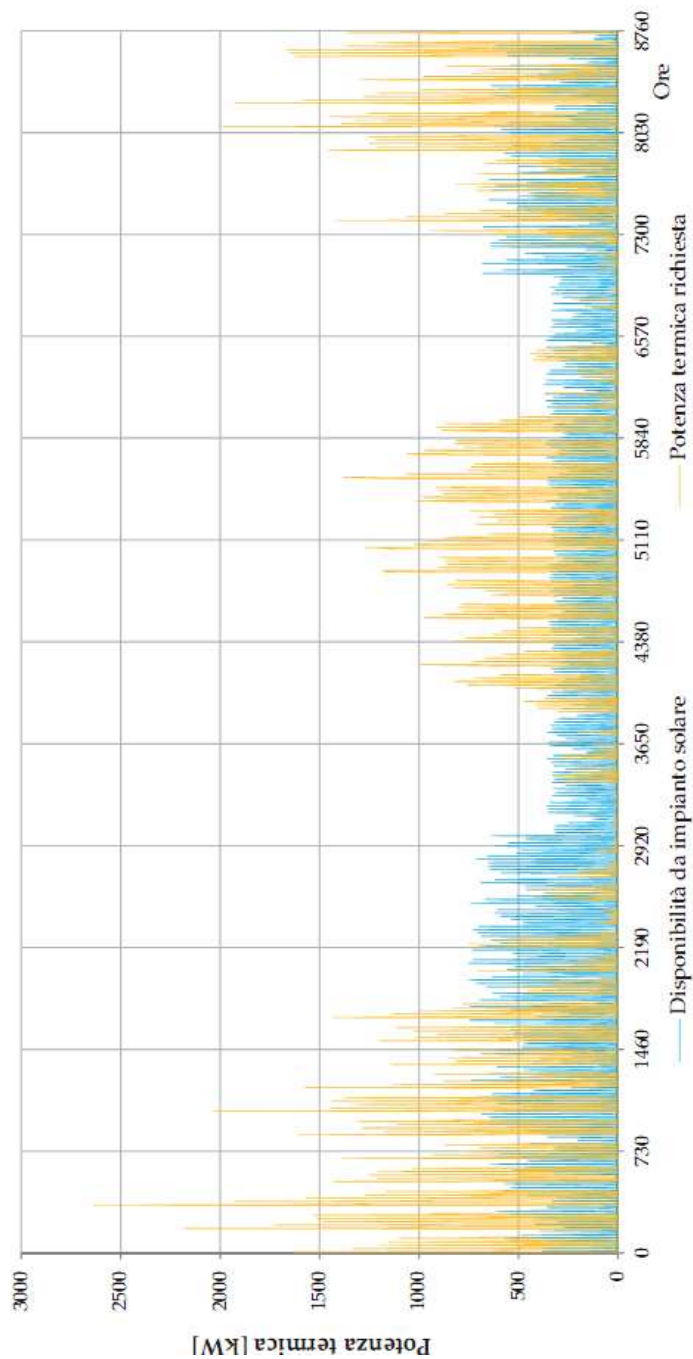


Figura 66 - Output di calcolo TRNsys del calcolo di integrazione dinamica con solar cooling per edificio AAMS

di poco inferiore (circa -20%) di quella richiesta per il riscaldamento. Lo stato prima dell'intervento di riqualificazione di questo edificio non lasciava margini per interventi equilibrati in assenza delle scelte di intervento alle strutture.

Nella Figura 67 e nella Figura 68 si evidenzia rispettivamente il comportamento di interazione per una caratteristica settimana invernale e una estiva. L'elemento più importante da notare è che un buon dimensionamento dell'impianto di solar cooling dovrebbe essere caratterizzato in inverno da valori di copertura nell'arco della giornata non eccedenti di molto la domanda minima per evitare stoccaggi termici eccessivi. D'estate, invece, come si apprezza dalla figura, il sistema in calcolo in transitorio permette di evidenziare in modo netto l'espressione in fase di domanda e offerta essendo la seconda curva quasi proporzionalmente contenuta nella prima. La disponibilità di questi dati fanno anche riflettere sul fatto che mentre nel periodo invernale le potenze massime richieste alle macchine termiche vengono ridotte dalla presenza dell'impianto di solar cooling, nel periodo estivo essendoci una corrispondenza dei picchi le potenze da installarsi hanno una interessante riduzione passando dai 1,4 MW a 1 MW con una riduzione di circa il 25%.

Già con questi dati è possibile determinare con sufficiente approssimazione la macchina ad assorbimento da installare e con la quale effettuare tutte le verifiche fino al progetto esecutivo. La caratteristica fondamentale è la potenza frigorifera massima che nel nostro caso è di circa 360 kW_{fr}.

La scelta potrebbe, consultando il catalogo della SANYO (vedi Figura 69), cadere sulla LE-13 con potenza nominale di 387 kW_{fr} simile a quella di Figura 39.

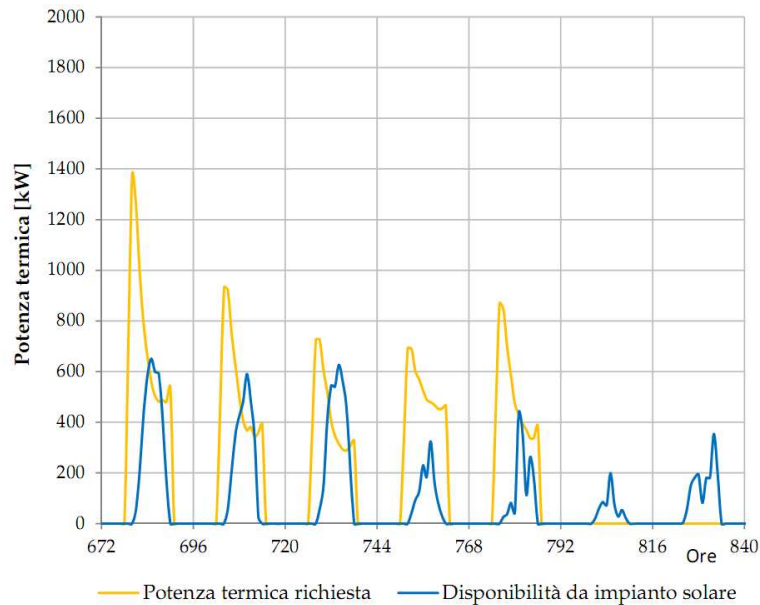


Figura 67 - Fabbisogno termico e disponibilità da solare per integrazione al riscaldamento invernale

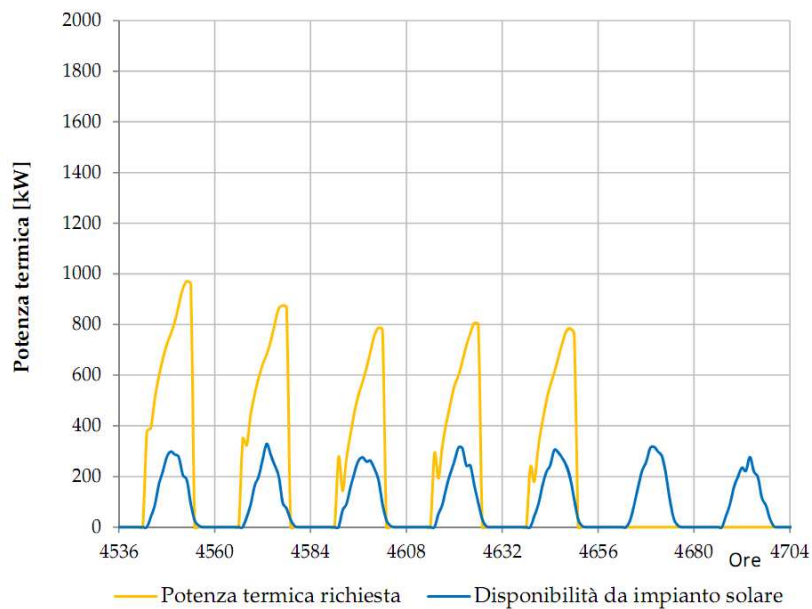


Figura 68 - Fabbisogno termico e disponibilità da macchina ad assorbimento per il raffrescamento estivo

	Attuale	Riqua.	Sol. termico
Riscaldamento [kWh/anno]	1.529.230	851.100	574.295
Raffrescamento [kWh/anno]	655.650	626.000	483.593
EPi [kWh/m ³ anno]	18,4	10,3	6,9
EPe [kWh/m ³ anno]	8,2	7,5	5,8

Tabella 16 - Fabbisogno ricalcolato con modello TRNsys edificio A.A.M.S. post-interventi alle strutture e con integrazione da solare termico

Model (TSA-LE-*)	Unit	LE-01	LE-02	LE-03	LE-11	LE-12	LE-13	LE-14		
Refrigeration	(USRT)	30	40	50	75	90	110	135		
Capacity	kW	105	141	176	264	316	387	475		
Chilled water system		13 → 8°C (Fouling factor = 0.088m²C / kW (0.0001m²h°C / kcal) · Max. working pressure 784kPa (8 kgf / cm²G))								
Flow rate	m³/h	18.1	24.2	30.2	45.4	54.4	66.5	81.6		
Pressure drop	(mH₂O)	7.2	9.2	7.3	7.0	7.6	4.5	4.9		
Pressure drop	kPa	71	90	72	69	74	44	48		
Connection (JIS)	inch	2-1/2	2-1/2		3		4			
Holding water volume	m³	0.06	0.07	0.08	0.11	0.13	0.15	0.17		
Cooling water system		31 → 37°C (Fouling factor = 0.088m²C / kW (0.0001m²h°C / kcal) · Max. working pressure 784kPa (8 kgf / cm²G))								
Flow rate	m³/h	36.5	48.6	60.8	91.1	109	134	164		
Pressure drop	(mH₂O)	5.2	5.8	10.1	8.9	9.5	5.2	6.4		
Pressure drop	kPa	51	57	99	87	93	51	63		
Connection (JIS)	inch	3			5					
Holding water volume	m³	0.14	0.17	0.20	0.34	0.37	0.43	0.47		
Hot water system		88 → 83°C (Fouling factor = 0.088m²C / kW (0.0001m²h°C / kcal) · Max. working pressure 784kPa (8 kgf / cm²G))								
Flow rate	kgf/s	7.11	9.47	11.8	17.8	21.3	26.0	31.9		
Pressure drop	(mH₂O)	4.6	5.6	1.9	1.5	1.7	4.0	4.6		
Pressure drop	kPa	45	55	19	15	17	39	45		
Connection (JIS)	inch	2-1/2		4						
Holding water volume	m³	0.04	0.05	0.06	0.09	0.10	0.12	0.13		
3 way valve pressure drop		(mH₂O)								
		3.9	3.3	5.2	5.8	8.3	3.7	5.5		
	kPa	38	32	51	57	81	36	54		
Connection (JIS)	inch	2	2-1/2		3		4			
Overall dimensions										
Length (L)	mm	2,210		2,710			3,720			
Width (W)	mm	1,110			1,295					
Height (H)	mm	1,980		2,225						
Tube removal	mm	1,900		2,400			3,400			
Weights										
Operating LE/NE	kgf	2,300	2,400	2,800	3,900	4,100	5,100	5,400		
Shipping weight	kgf	2,000	2,100	2,500	3,400	3,500	4,400	4,600		
LE-21	LE-22	LE-23	LE-24	LE-31	LE-32	LE-41	LE-42	LE-51	LE-52	LE-53
155	190	210	240	270	300	335	375	420	470	525
545	633	738	844	949	1,055	1,178	1,319	1,477	1,653	1,846
13 → 8°C (Fouling factor = 0.088m²C / kW (0.0001m²h°C / kcal) · Max. working pressure 784kPa (8 kgf / cm²G))										
93.7	109	127	145	163	181	203	227	254	284	318
4.3	4.7	9.2	9.6	9.5	10.0	9.8	9.7	7.8	3.7	4.9
42	46	90	94	93	98	96	95	76	36	48
5		6			8					
0.22	0.24	0.27	0.30	0.33	0.35	0.45	0.48	0.65	0.71	0.76
31 → 37°C (Fouling factor = 0.088m²C / kW (0.0001m²h°C / kcal) · Max. working pressure 784kPa (8 kgf / cm²G))										
188	219	255	292	328	365	407	456	510	571	638
5.4	6.1	11.1	12.1	9.1	9.5	10.0	11.0	7.0	9.3	12.1
53	60	109	119	89	93	98	108	69	91	119
6		8			10					
0.60	0.65	0.71	0.79	0.99	1.06	1.25	1.35	2.02	2.18	2.31
88 → 83°C (Fouling factor = 0.088m²C / kW (0.0001m²h°C / kcal) · Max. working pressure 784kPa (8 kgf / cm²G))										
36.7	42.5	49.7	56.7	63.9	71.1	79.2	88.9	99.4	111	124
4.1	4.4	2.0	2.2	1.8	2.0	1.6	1.7	1.8	2.3	3.0
40	43	20	22	18	20	16	17	18	23	29
5		6			8					
0.17	0.18	0.20	0.22	0.27	0.29	0.34	0.36	0.44	0.48	0.51
3.3	4.4	6.0	7.9	6.0	7.4	9.2	11.6	4.6	5.8	7.2
36	43	59	77	59	73	90	114	45	47	71
5		6			8					
3,920		4,850		4,980		5,060		5,200	5,740	6,240
1,445		1,515		1,615		1,950		2,330		
2,395		2,645		2,905		3,230		3,400		
3,400		4,500		4,600		5,200		5,700		
6,500	6,900	8,000	8,500	10,300	10,800	12,500	13,000	17,700	19,200	20,600
5,500	5,800	6,800	7,100	8,700	9,100	10,400	10,800	14,600	15,900	17,100

Figura 69 - Estratto tecnico catalogo SANYO macchine ad assorbimento in corrente di acqua calda

8.3.2 DATI ENERGETICI COPERTURA IMPIANTO

Il sistema così proposto fornisce una costante integrazione nell'intero arco dell'anno al sistema di regolazione termica interno. A ciò si aggiunge che la disponibilità di calore nei serbatoi permetterebbe la totale eliminazione del

sistema di ACS essendo il calore disponibile abbondantemente in esubero nei confronti delle necessità energetiche per questo impiego.

Dall'analisi dei dati ottenuti dal calcolo dinamico è possibile determinare che il sistema di integrazione, a meno di piccoli ritocchi dovuti al maggiore approfondimento del calcolo in seguito ad un'evoluzione del progetto realizzativo, collabora per i seguenti valori:

- *Riscaldamento* = 276.805 kWh/anno
- *Raffrescamento* = 187.407 kWh/anno

In Tabella 16 vengono poi riportati gli indici di riferimento globali per lo stabile seguenti all'intervento di integrazione da fonti rinnovabili. L'energia da quest'ultime ricavate sono considerate come detrazioni al fabbisogno essendo apporti gratuiti per l'edificio. Come si nota dai dati in tabella si ottiene una riduzione complessiva dallo stato attuale dopo gli interventi di riqualificazione strutturale e di integrazione con sistemi termici solari attivi pari a:

- *Riscaldamento* = -62,5%
- *Raffrescamento* = -26,5%

tali valori in un'analisi economica potranno essere usati ammettendo che la spesa energetica sia legata linearmente ai consumi di energia per il calcolo del risparmio in bolletta da calcolo.

8.3.3 SVILUPPI CON SOLARE A CONCENTRAZIONE

Si segnala la possibilità di realizzare un mini impianto a concentrazione parabolica lineare di identica fattura rispetto a quello proposto con collettori solari piani. Con questa tipologia di impianto e gli attuali captatori di facile gestione e costi di installazione accessibili, sarebbe possibile ottenere risultati sicuramente migliori rispetto a quelli di una tecnologia tradizionale. Questo è termodinamicamente confermato dalla disponibilità di una risorsa a temperatura superiore capace di scambi con ΔT più elevati e di una conseguente maggiore resa energetica. Inoltre va aggiunto che la disponibilità di una fonte a temperatura superiore permetterebbe una più naturale interazione con gli attuali sistemi di riscaldamento a radiatori.

9. RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA: ANALISI DEI FABBISOGNI PER L'ILLUMINAZIONE DELL'EDIFICIO

INDICE CAPITOLO

9.1 STUDIO ILLUMINOTECNICO DEGLI AMBIENTI CONFINATI NELLA DIREZIONE GENERALE DELL'AAMS. **ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.**

9.1.1 CONSUMI ELETTRICI PER ILLUMINAZIONE DELL'EDIFICIO A.A.M.S. **ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.**

9.1.2 STUDIO ILLUMINOTECNICO DELL'AMBIENTE UFFICIO: STATO DI FATTO **ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.**

9.1.3 STUDIO ILLUMINOTECNICO DELL'AMBIENTE UFFICIO: STATO DI PROGETTO. **ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.**

9.1.4 VALUTAZIONE ENERGETICA. **ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.**

9.1.5 VALUTAZIONE ECONOMICA. **ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.**

L'attenzione ai consumi elettrici dovuti ai sistemi di illuminazione degli edifici è stata posta a livello internazionale con la Direttiva Europea 2002/91/CE inerente le prestazioni energetiche degli edifici. Nella Direttiva è precisato che la valutazione dei consumi energetici degli edifici deve essere condotta considerando il fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale degli ambienti, il fabbisogno energetico per il riscaldamento dell'acqua per gli usi igienico-sanitari, il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva degli ambienti e (limitatamente agli edifici pubblici o ad uso pubblico) il fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale. Per la valutazione di questi fabbisogni sono state prodotte a livello europeo normative tecniche specifiche adottate poi in Italia (Tabella 17).

Numero	Titolo	Data
UNI EN ISO 13790	Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento	Giugno 2008
UNI/TS 11300-1	Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale	Maggio 2008
UNI/TS 11300-2	(...) Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria	Maggio 2008
UNI/TS 11300-3	(...) Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva	Marzo 2010
UNI/TS 11300-4	(...) Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria	Maggio 2012
UNI EN 15193	Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione	Marzo 2008

Tabella 17 - Elenco sintetico delle principali norme tecniche inerenti le prestazioni energetiche degli edifici

In particolare per quanto riguarda il fabbisogno energetico dovuto all'illuminazione artificiale degli ambienti interni di lavoro occorre fare riferimento alla Norma europea EN 15193 (in Italia UNI EN 15193, marzo 2008), con la quale è stato introdotto l'indice di efficienza energetica del sistema di illuminazione, LENI (*Lighting Energy Numeric Indicator*). La valutazione dell'indice LENI può essere condotta, per edifici esistenti o di nuova costruzione, secondo varie metodologie:

- misurazioni degli effettivi consumi elettrici(per esempio attraverso la lettura, con modalità opportunamente specificate, dei contatori al servizio del sistema elettrico di alimentazione dell'utenza considerata) per periodi temporali di volta in volta precisati;
- metodo di calcolo di tipo rapido (*quick method*) per periodi temporali annuali, basato essenzialmente sull'uso di tabelle e valori standard di riferimento dei principali parametri considerati;
- metodo di calcolo di tipo completo (*comprehensive method*) per periodi temporali annuali o per periodi temporali significativi più brevi (per esempio mensili, giornalieri, orari), basato sul calcolo analitico e dettagliato dei vari parametri considerati.

Nella UNI EN 15193 i due metodi di calcolo dell'indice LENI sono descritti compiutamente per varie destinazione d'uso degli edifici, in particolare: scuole, uffici, ospedali, alberghi, ristoranti, impianti sportivi, edifici commerciali, edifici artigianali e industriali; nel seguito si farà riferimento in particolare alle prime tre destinazioni d'uso. E' utile osservare che nella definizione dei vari parametri utilizzati per il calcolo dell'indice LENI sono considerati i seguenti aspetti: modalità di utilizzo e gestione dei sistemi di illuminazione artificiale; disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti; consumi dovuti ai sistemi di illuminazione di emergenza. Sono inoltre considerati, almeno in parte, aspetti relativi alla qualità del progetto illuminotecnico inerenti i requisiti minimi indicati nella UNI EN 12464-1 sull'illuminazione artificiale degli ambienti interni di lavoro.

Fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale

Per il calcolo dell'indice LENI si può procedere nel modo seguente. Il fabbisogno di energia necessaria al sistema di illuminazione, W (kWh/anno), può essere calcolato con la relazione (UNI EN 15193):

$$W = W_L + W_P \tag{9.1}$$

con:

- W_L fabbisogno energetico necessario agli apparecchi di illuminazione per garantire le condizioni di illuminazione fissate in sede progettuale, per esempio in relazione ai valori medi di illuminamento indicati nella UNI EN 12464-1;
- W_P fabbisogno di energia necessario all'alimentazione dei dispositivi di illuminazione di emergenza e dei vari sistemi di controllo dell'illuminazione eventualmente presenti.

La relazione (9.1) può essere riferita ad ambienti (o zone) dell'edificio oppure a tutto l'edificio ed a qualsiasi periodo temporale. I fabbisogni W_L e W_P sono calcolati con le relazioni (UNI EN 15193):

$$W_L = \frac{P_N F_C F_0 (t_D F_D + t_N)}{1000} \quad (9.2)$$

$$W_P = \frac{P_{PC} (t_Y - t_0) + P_{em} t_{em}}{1000} \quad (9.3)$$

Il significato dei parametri introdotti nelle relazioni (9.2) e (9.3), le relative unità di misura e i valori standard di riferimento assunti convenzionalmente, sono precisati nelle Tabelle 18-19-20. I valori delle potenze elettriche P_N , P_{PC} e P_{em} sono ottenuti dal calcolo illuminotecnico. In particolare con riferimento ai consumi relativi all'illuminazione di emergenza degli edifici esistenti, nei casi in cui questi non sono noti o facilmente determinabili, il fabbisogno energetico specifico viene stimato nella UNI EN 15193 pari a 6 kWh/m²anno, (di cui 1 kWh/m²anno per l'illuminazione di emergenza e 5 kWh/m²anno per i sistemi di controllo automatico ove presenti).

Simbolo	Unità di misura	Significato	Valori di riferimento
P_N	W	(total installed lighting power) potenza elettrica complessivamente installata per l'illuminazione dell'edificio (o dell'ambiente) in esame	v. Tab. 6
P_{PC}	W	(total installed parasitic power of the controls) potenza elettrica necessaria all'alimentazione dei vari sistemi di controllo (emergenza, standby, ...) eventualmente presenti	v. i criteri progettuali precisati in [9]
P_{em}	W	(total installed charging power of the emergency lighting luminaires) potenza elettrica necessaria alla ricarica delle batterie dei dispositivi di illuminazione di emergenza eventualmente presenti	v. i criteri progettuali precisati in [9]
t_D	h	(daylight time usage) tempo di accensione del sistema di illuminazione durante le ore diurne nel periodo di calcolo considerato	v. Tab. 3
t_S	h	(non-daylight time usage) tempo di accensione del sistema di illuminazione durante le ore serali e notturne nel periodo di calcolo considerato	
t_0	h	(annual operating time) tempo di accensione del sistema di illuminazione in un anno	
t_Y	h	(standard year time) numero di ore di lavoro presenti in un anno	$t_Y=8760$ h
t_{em}	h	(emergency lighting charge time) tempo necessario alla ricarica delle batterie dei dispositivi di illuminazione di emergenza eventualmente presenti	v. i criteri progettuali precisati in [9]
F_C	adim.	(constant illuminance factor) coefficiente di correzione per valutare l'effetto della presenza di eventuali sistemi di controllo per mantenere livelli di illuminamento costanti nel tempo (sistemi CTE)	$F_C=1$ (senza sistemi CTE) $F_C=0.9$ (con sistemi CTE)
F_0	adim.	(occupancy dependance factor) coefficiente di correzione per valutare l'effetto della presenza di persone all'interno dell'edificio (o dell'ambiente) in esame	v. Tab. 4
F_D	adim.	(daylight dependance factor) coefficiente di correzione per valutare il contributo dell'illuminazione naturale nell'edificio (o nell'ambiente) in esame	

Tabella 18 - Significato dei parametri introdotti nelle relazioni (9.2) e (9.3)

Tempi di accensione		Scuole	Uffici	Ospedali
t_D (h)	tempo di accensione ore diurne	1800	2250	3000
t_S (h)	tempo di accensione ore serali e notturne	200	250	2000
t_0 (h)	tempo di accensione complessivo	2000	2500	5000

Tabella 19 - Esempi di valori standard dei tempi t_0 , t_D e t_N riferiti ad un periodo annuale

Più complessa risulta la valutazione dei coefficienti F_C , F_O e F_D ; in questo caso con il metodo rapido si possono utilizzare i valori standard di riferimento riportati nelle tabelle precedenti. Per il calcolo dell'indice LENI con il metodo completo occorre invece procedere come segue.

Il coefficiente F_C può essere espresso in funzione del coefficiente di manutenzione, MF (*Maintenance Factor*) secondo la relazione:

$$F_C = (1 + MF) / 2 \quad (9.4)$$

L'introduzione del coefficiente di manutenzione (MF) permette di considerare che, per mantenere in un dato ambiente l'illuminamento medio (E_m) precisato nella normativa tecnica (Tabella 24), l'illuminamento iniziale dovrà risultare maggiorato di un fattore $1/MF$ ($0 < MF \leq 1$). Ciò per considerare il decadimento del flusso luminoso delle lampade, l'invecchiamento degli apparecchi e degli ambienti (in particolare legato all'impolveramento delle superfici esposte).

	Tipo di controllo	Scuole	Uffici	Ospedali
F_O	Manuale	1		
	Automatico (negli uffici e nelle scuole si intende un carico elettrico collegato non inferiore al 60% del totale, negli ospedali si intende che soltanto alcuni comandi siano automatici)	0.9		0.8
F_D	Manuale	1		
	Regolazione delle fotocellule con rilevamento della luce diurna	0.8	0.9	0.8

Tabella 20 - Esempi di valori standard dei coefficienti F_O ed F_D

$0 \leq F_A < 0.2$	$0.2 \leq F_A \leq 0.9$	$0.9 \leq F_A \leq 1$			
(a) $F_O = 1 - 0.5 F_A (1 - F_{OC})$	(b) $F_O = 0.2 + F_{OC} - F_A$	(c) $E_O = (F_A - 1) (7 - 10 F_{OC})$			
Valori di riferimento per il coefficiente F_{OC}					
Sistemi senza rilevamento automatico di presenza		Sistemi con rilevamento automatico di presenza			
Accensione e spegnimento manuale		Accensione e spegnimento manuale (con segnale di spegnimento generale automatico)			
1		0.95			
Accensione e regolazione automatica	Accensione e spegnimento automatico	Accensione manuale, regolazione e spegnimento automatico		Accensione manuale e spegnimento automatico	
		0.95		0.80	
Valori di riferimento per il coefficiente F_A (per l'intero edificio e per alcuni ambienti tipo)					
Scuole		Uffici		Ospedali	
0.2				0	
Aula	0.25	Ufficio (1 pers.)	0.4	Corsia/letto	0
Sala lettura	0.4	Ufficio (2-6 pers.)	0.3	Esami/trattamento	0.4
Corridoio	0.6	Corridoio	0.4	Corridoio	0
Palestra	0.3	Ingresso	0	Ingresso	0
Mensa	0.2	Conferenze	0.5	Sala operatoria	0
Magazzino	0.4	Bagno	0.9	Laboratorio	0.2

Tabella 21 - Relazioni per il calcolo del coefficiente F_O

Il coefficiente F_O introduce ulteriore complessità al problema di determinare i fabbisogni energetici relativi all'illuminazione degli ambienti. In particolare nella UNI EN 15193 è precisato un metodo di calcolo per "fornire un apprezzamento rudimentale" di tale coefficiente in funzione del tipo di sistema di controllo dell'illuminazione (attraverso il coefficiente F_{OC} , Tabella 21) e del livello di assenza degli occupanti dall'ambiente considerato (attraverso il coefficiente F_A , Tabella 21). In altre parole l'introduzione del coefficiente F_O ha permesso di richiamare l'attenzione su aspetti legati alla Building Automation, negli ultimi anni di più frequente applicazione in particolare negli edifici pubblici o ad uso pubblico. Il coefficiente F_O assume valori compresi nell'intervallo: $0 \leq F_O \leq 1$. Si considera: $F_O=1$, nei casi in cui è presente un sistema di accensione/spengimento delle lampade centralizzato (manuale o automatico) oppure quando la superficie in pianta dell'ambiente, illuminata da un gruppo di lampade controllate da un singolo dispositivo di accensione, sia maggiore di 30 m^2 (ad eccezione delle sale riunioni). In tutti gli altri casi risulterà: $0 \leq F_O < 1$ e il coefficiente F_O potrà essere calcolato con le relazioni riportate in Tab. 5. Nelle relazioni di Tabella 21 il coefficiente F_{OC} (*Occupancy Dependent Lighting Control System Factor*) tiene conto del tipo di accensione, spegnimento e regolazione del sistema di illuminazione, il coefficiente F_A (*absence factor*) tiene conto della effettiva presenza degli occupanti durante il periodo temporale di riferimento ed è espresso in relazione alla destinazione d'uso dell'edificio (o dell'ambiente) considerato.

Il coefficiente F_D permette di esprimere il risparmio energetico conseguente alla disponibilità di luce naturale nell'edificio (o ambiente) considerato, quindi al minore utilizzo di illuminazione artificiale per mantenere i requisiti di illuminamento medio richiesto. La valutazione dettagliata del coefficiente F_D , in relazione alla profondità di penetrazione della luce nell'ambiente, alla presenza di ostruzioni o schermature esterne e agli eventuali sistemi di controllo. Si noti che in assenza di luce naturale si può assumere: $F_D=1$.

Indice prestazionale relativo al fabbisogno per illuminazione

Indicato con W il fabbisogno di energia per illuminazione calcolato con la relazione (9.1), l'indice LENI ($\text{kWh/m}^2\text{anno}$) è definito come (UNI EN 15193):

$$LENI = \frac{W}{A} \quad (9.5)$$

dove A (m^2) è la superficie utile dell'edificio (o dell'ambiente) in esame, esclusi ovviamente gli spazi non illuminati (e quelli non abitabili). Si noti che per congruità con i fabbisogni energetici per la climatizzazione degli edifici può risultare opportuno, per edifici non residenziali, esprimere l'indice LENI per unità di volume lordo climatizzato.

La determinazione dell'indice LENI con il metodo rapido si esegue utilizzando valori di riferimento relativi ad ambienti con caratteristiche analoghe a quello in esame (Tabella 22). In particolare in Tabella 22 sono precisati: la destinazione d'uso dell'ambiente (o più in generale dell'edificio), la potenza

elettrica specifica (P), la classe di qualità dell'illuminazione (Tabella 24), la presenza/assenza di sistemi CTE, la presenza/assenza di sistemi automatici per l'accensione e lo spegnimento degli apparecchi di illuminazione.

Destinazione d'uso	P (W/m ²)	Classe di qualità	Indice LENI (kWh/m ² anno)			
			Assenza di sistemi CTE		Presenza di sistemi CTE	
			Accensione/spegnimento			
			Manuale	Automatica	Manuale	Automatica
Scuole	15	*	34.9	27.0	31.9	24.8
	20	**	44.9	34.4	40.9	31.4
	25	***	54.9	41.8	49.9	38.1
Uffici	15	*	42.1	35.3	38.3	32.2
	20	**	54.6	45.5	49.6	41.4
	25	***	67.1	55.8	60.8	50.6
Ospedali	15	*	70.6	55.9	63.9	50.7
	25	**	115.6	91.1	104.4	82.3
	35	***	160.6	126.3	144.9	114

Tabella 22 - Valori indicativi dell'indice LENI con il metodo rapido per alcune destinazioni d'uso

Prestazioni illuminotecniche

Le prestazioni illuminotecniche che devono essere garantite negli ambienti interni di lavoro sono precisate nella edizione di Luglio 2011 della UNI EN 12464-1. Questa recente versione della Norma ha sostituito la precedente di Ottobre 2004 introducendo significative integrazioni e modifiche inerenti l'illuminazione artificiale degli ambienti di lavoro. Nella UNI EN 12464-1 vengono definiti i requisiti illuminotecnici essenziali affinché in un ambiente (interno) di lavoro con data destinazione d'uso i compiti visivi, previsti in relazione alle attività lavorative svolte, siano condotti nel rispetto della salute e della sicurezza del lavoratore con particolare attenzione ai livelli di comfort visivo ed alle esigenze della prestazione visiva.

In Tabella 23 sono riportati i valori di riferimento dei requisiti illuminotecnici minimi richiesti nel caso di alcune destinazioni d'uso significative: uffici, scuole, ospedali. A titolo esemplificativo, per un ufficio con superficie utile pari ad 80 m², l'illuminamento medio mantenuto relativo a compiti visivi di lettura e scrittura ($E_m=500$ lx) può essere soddisfatto utilizzando un sistema di illuminazione caratterizzato da una potenza elettrica installata $P_N=1344$ W ed una potenza specifica $P=16.8$ W/m².

Tipo di ambiente		E_m (lx)	U_0	UGRL	R_a	
Corridoi e zone di circolazione all'interno di edifici, in genere ¹		100	0.40	28	40	
Scale all'interno di edifici, in genere ²		100	0.40	25	40	
Sale di attesa, in genere		100	0.40	22	80	
Bagni (toilets, WC, ...), in genere ³		200	0.40	25	80	
Uffici	Lettura, scrittura, ... ⁴	500	0.60	19	80	
	Disegno tecnico	750	0.70	16	80	
	Postazioni CAD ⁴	500	0.60	19	80	
	Sale conferenze / sale riunioni ⁵	500	0.60	19	80	
	Reception	300	0.60	22	80	
	Archivi	200	0.40	25	80	
Scuole	Zone di ingresso	200	0.40	22	80	
	Corridoi (zone di circolazione)	100	0.40	25	80	
	Scale	150	0.40	25	80	
	Aule scolastiche (in genere)	300	0.60	19	80	
	Aule comuni per studenti	200	0.40	22	80	
	Aule comuni per insegnanti	300	0.60	19	80	
	Palestre ⁶	300	0.60	22	80	
Ospedali	Sale di attesa	200	0.40	22	80	
	Corridoi ⁷	di giorno	100	0.40	22	80
		di notte	50	0.40	22	80
		pulizia	100	0.40	22	80
		per usi diversi	200	0.60	22	80
	Sale per il personale	300	0.60	19	80	
	Illuminazione generale	Reparto maternità	100	0.40	19	80
		Ambulatori ⁸	500	0.60	19	90
	Illuminazione notturna (terapia intensiva)	20	-	19	90	

Tabella 23 - Valori minimi di illuminamento medio mantenuto (E_m) relativi ad alcuni tipi di ambienti di lavoro, raccomandati nella UNI EN 12464-1. Per completezza sono riportati: i valori minimi dell'uniformità di illuminamento (U_0), i valori massimi dell'indice di abbagliamento (UGRL), i valori massimi dell'indice di resa cromatica (R_a) delle lampade.

Note alla Tabella 23

L'illuminamento si intende al piano del pavimento; l'illuminazione in prossimità degli ingressi e delle uscite deve prevedere una zona di transizione per evitare improvvisi cambiamenti dovuti al passaggio dall'interno all'esterno (sia di giorno che di notte); la resa cromatica e l'indice UGR devono comunque risultare analoghi a quelli delle zone adiacenti.

- 1- E' richiesto di incrementare il contrasto sui gradini.
- 2- Requisiti da realizzare in ogni singolo bagno se incluso in uno spazio più grande.
- 3- 4-Per il lavoro al videoterminale (*DSE, Display Screen Equipment*) si rimanda ad una specifica sezione della UNI EN 12464-1.
- 4- L'illuminazione dovrebbe essere regolabile.
- 5- Occorre soddisfare i pertinenti requisiti illuminotecnici raccomandati nella UNI EN 12193 per gli impianti sportivi.
- 6- L'illuminamento si intende al piano del pavimento fatta eccezione nel caso di usi diversi per i quali si intende sul compito visivo ovvero relativo alla specifica attività.
- 7- Sono compresi per esempio: gli ambulatori per esami generali, gli ambulatori oculistici, gli ambulatori otorino, gli ambulatori dentistici, i

laboratori e le farmacie; nei primi due casi le lampade devono avere temperatura di colore compresa tra 4000 e 5000 K.

Risulta interessante osservare che le classi di qualità dell'illuminazione indicate nella UNI EN 15193 (Tabella 22) sono strettamente collegate ai requisiti illuminotecnici precisati nella UNI EN 12464-1, tale legame è meglio evidenziato in Tabella 24. Più in dettaglio: alla classe di qualità dell'illuminazione "inferiore", indicata con il simbolo (*), corrisponde un soddisfacimento "di base" dei requisiti illuminotecnici della UNI EN 12464-1 alla classe di qualità dell'illuminazione "intermedia", indicata con il simbolo (**), corrisponde un soddisfacimento "buono" dei requisiti illuminotecnici della UNI EN 12464-1; alla classe di qualità dell'illuminazione "superiore", indicata con il simbolo (***), corrisponde un soddisfacimento "completo" dei requisiti illuminotecnici della UNI EN 12464-1.

Tipo di criterio	Classe di qualità		
	(*)	(**)	(***)
Illuminamento medio mantenuto sui compiti visivi orizzontali (E_m)	■	■	■
Controllo appropriato dell'abbagliamento molesto (UGR)	■	■	■
Prevenzione di sfarfallamento ed effetti stroboscopici	○	○	○
Controllo appropriato di riflessioni velanti e abbagliamento riflesso		○	○
Resa migliorata del colore (Ra)		■	■
Prevenzione delle ombre dure o delle luci troppo diffuse per fornire un buon modellato		○	○
Corretta distribuzione della luminanza nel locale		○	○
Attenzione speciale alla comunicazione visiva con adeguato illuminamento dei volti			○
Attenzione speciale alle questioni legate alla salute			○

Tabella 24 - Classe di qualità del progetto illuminotecnico. Il quadrato nero è riferito al soddisfacimento dei requisiti indicati in Tabella 23, il cerchio bianco è riferito agli altri requisiti indicati nei paragrafi della UNI EN 12464-1

9.1 STUDIO ILLUMINOTECNICO DEGLI AMBIENTI CONFINATI NELLA DIREZIONE GENERALE DELL'AAMS.

9.1.1 CONSUMI ELETTRICI PER ILLUMINAZIONE DELL'EDIFICIO A.A.M.S.

Nella Tabella 9 e Figura 70 sono riportati i consumi elettrici relativi al biennio 2009-10.

Da questi dati si può estrapolare, noti il numero, la tipologia dei corpi illuminanti degli ambienti e il relativo tempo di utilizzo, il valore di incidenza dell' impianto di illuminazione (Tabella 25).

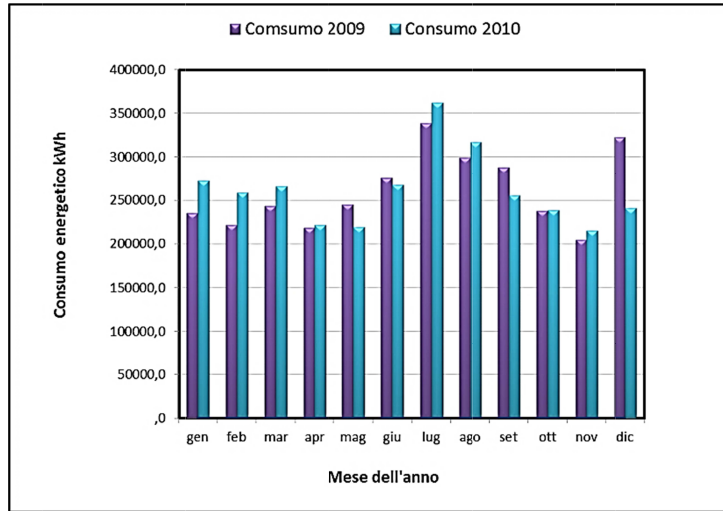


Figura 70 - Consumi elettrici relativi al biennio 2009-10

CONSUMI TOTALI ELETTRICITA' 2009	<u>3.130.822</u>	CONSUMI TOTALI ELETTRICITA' 2010	<u>3.134.635</u>
INCIDENZA ILLUMINAZIONE SUL CONSUMO TOTALE	<u>45,7 %</u>	INCIDENZA ILLUMINAZIONE SUL CONSUMO TOTALE	<u>45,7 %</u>

Tabella 25 - Incidenza consumi illuminazione sul consumo totale d'electricità

9.1.2 STUDIO ILLUMINOTECNICO DELL'AMBIENTE UFFICIO: STATO DI FATTO

L'edificio in esame ha come destinazione d'uso "uffici" per cui si vuole effettuare uno studio illuminotecnico dell'ambiente "ufficio tipo" in modo da poter valutare tutti i parametri illuminotecnici e quelli energetici introdotti nella parte introduttiva del capitolo. Lo studio verrà effettuato per il solo Edificio Nuovo con la possibilità di estendere i risultati anche all'Edificio Storico.

L'Edificio Nuovo possiede 361 uffici che presentano nella maggior parte dei casi una pianta rettangolare e caratteristiche che possono essere riassunte ed individuate in Tabella 26 in Figura 71e in Figura 72.

Superficie	Rho [%]	da ([m] [m])	in direzione ([m] [m])	Lunghezza [m]
Pavimento	56	/	/	/
Soffitto	70	/	/	/
Parete 1	50	(0.000 0.000)	(3.980 0.000)	3.980
Parete 2	50	(3.980 0.000)	(3.980 6.950)	6.950
Parete 3	50	(3.980 6.950)	(0.000 6.950)	3.980
Parete 4	50	(0.000 6.950)	(0.000 0.000)	6.950

Tabella 26 – Dati geometrici e coefficienti di riflessione delle pareti

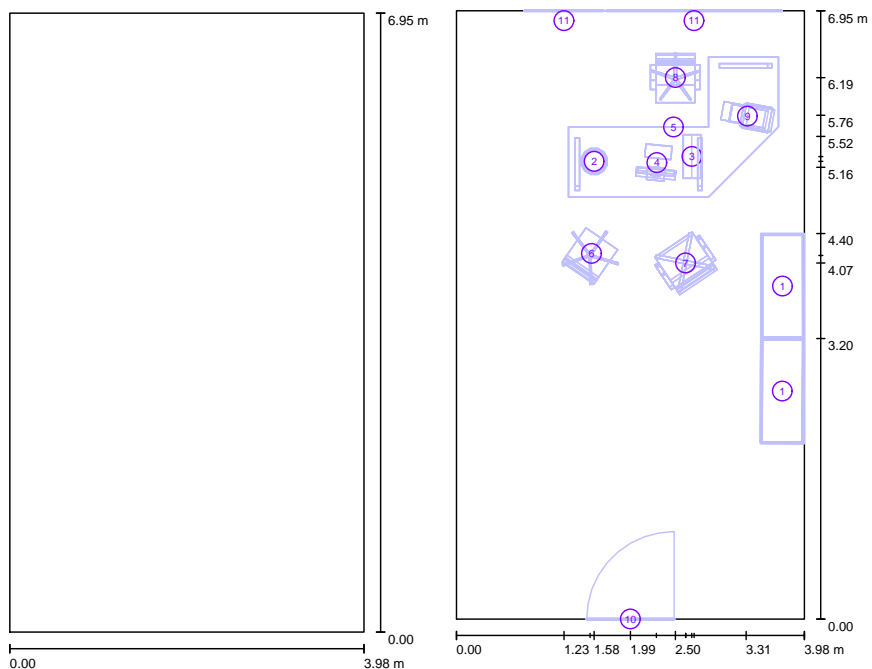


Figura 71 – Caratteristiche del Locale Ufficio



Figura 72 – Rendering 3D del Locale Ufficio

Fattore di Luce Diurna.

La prima verifica effettuata riguarda il Fattore di Luce Diurna, D , in grado di descrivere le prestazioni luminose dell'involucro edilizio, la quale non dipende

dal livello di illuminamento esterno, ma solo dalle relazioni geometriche tra punto considerato all'interno dell'ambiente e volta celeste. Tale grandezza è definita come:

“il rapporto tra l'illuminamento, E, che si realizza su di una superficie orizzontale posta all'interno dell'ambiente considerato grazie alla luce proveniente dalla volta celeste (non si considera la radiazione diretta proveniente dal sole), e quello che contemporaneamente si ha su di una superficie orizzontale posta all'esterno senza alcuna ostruzione, E₀”.(Figura 73)

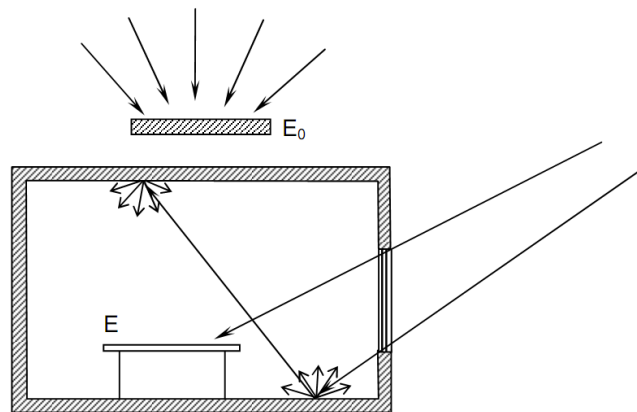


Figura 73 – Definizione del Fattore di luce diurna, D.

In base a tale definizione il fattore di luce diurna può essere calcolato con la relazione seguente:

$$D = \frac{E}{E_0} \quad (9.6)$$

Da un semplice esame dei diversi fenomeni coinvolti si evidenzia come esso risulta funzione delle seguenti grandezze:

- area delle aperture finestrate;
- coefficiente di trasmissione nel visibile del materiale trasparente che costituisce le finestre;
- area dei diversi elementi che costituiscono l'involucro e che sono presenti all'interno del locale (pareti, pavimenti, soffitti, arredi, ecc.);
- coefficiente di riflessione nel visibile delle superfici dei vari elementi presenti all'interno del locale;
- presenza di ostruzioni di qualsiasi genere, esterne od interne, che limitino la vista della volta celeste;
- stato di manutenzione delle superfici vetrate e delle superfici interne.

Si deve ricordare inoltre come il valore del fattore di luce diurna varia da punto a punto all'interno di un ambiente. Si introduce allora il **fattore medio di**

luce diurna, D_m . dove per medio si intende mediato su più punti di misura. Tale parametro consente di valutare la capacità delle aperture trasparenti e dell'involucro di uno spazio chiuso di garantire condizioni di illuminazione naturale confortevoli e un accettabile sfruttamento della luce naturale. Per raggiungere questi obiettivi esso deve essere superiore ad un certo valore, fissato come valore di soglia al di sotto del quale non sono verificate le condizioni di illuminazione naturali sufficienti alle specifiche esigenze di benessere fisico e psicologico. Uno schema di valutazione indicativo è il seguente:

- $D_m < 0,3\%$ insufficiente
- $0,3\% < D_m < 2\%$ discreto
- $2\% < D_m < 4\%$ buono
- $4\% < D_m$ ottimo

Per valutare il fattore medio di luce diurna nel caso dell'ambiente confinato prima definito ci si avvale del software DIALux per simulare la scena di luce naturale. I risultati di tale simulazione sono riportati in Figura 74, in Figura 75 e in Figura 76



Figura 74 - Simulazione in DIALux della scena di luce naturale: Rendering.

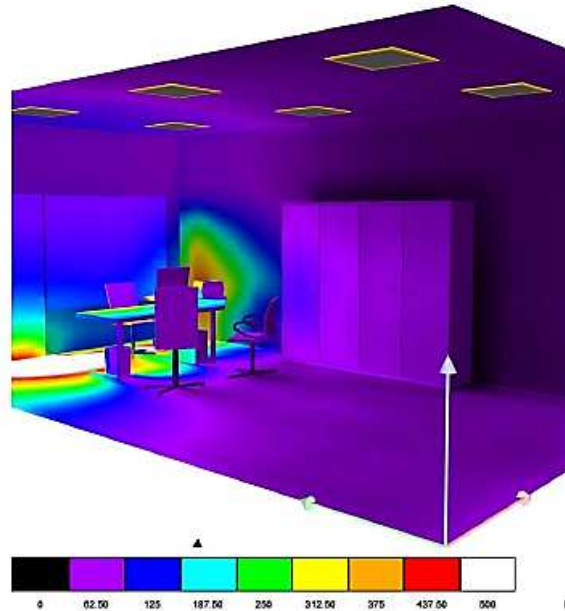
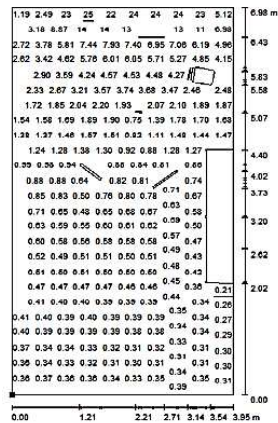


Figura 75 – Simulazione in DIALux della scena di luce naturale: Rendering colori falsati.

Luca NATURALE / Fattore di luce diurna superficie di calcolo / Grafica dei valori (D)



Impossibile visualizzare tutti i valori calcolati.

Posizione della superficie nel locale:
Punto contrassegnato:
(0.015 m, -0.015 m, 0.850 m)

Retina: 128 x 128 Punti

D_m [%]
2.35

D_{min} [%]
0.21

D_{max} [%]
25

D_{min} / D_m
0.091

D_{min} / D_{max}
0.008

Illuminazione orizzontale all'aperto E_p : 8880 lx

Figura 76 - Simulazione in DIALux della scena di luce naturale: grafica dei valori D.

Si nota che il valore D_m per l'ambiente è 2,35% che implica un buon livello di illuminazione naturale.

Caratteristiche dei corpi illuminanti: stato di fatto.

Una volta valutato il livello di illuminazione naturale si passa allo studio dell'illuminazione artificiale nello stato di fatto.

Si riportano di seguito le caratteristiche delle lampade dei corpi illuminanti esistenti e la loro di disposizione:



Corpo Illuminante da incasso: 4 Lampade a Fluorescenza da 18W

Caratteristiche Lampada:

- Alimentazione : 230V AC
- Attacco : 2 pin / G13 roteabili di 90°
- Potenza : 18 W
- Flusso luminoso : 1.350 Lumen
- Angolo di illuminazione : 120°
- Gradazioni di colore : WW 2.700-3.000K / NW 4.000-4.500K / CW 6.000-6.500K
- Durata vita media: 5.000 h

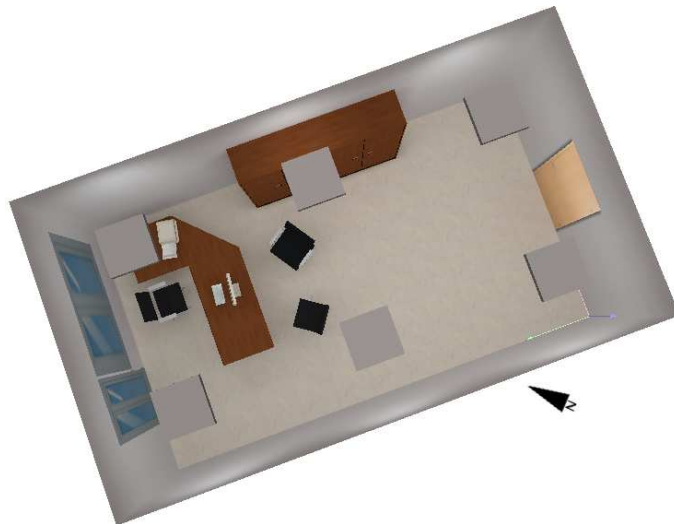
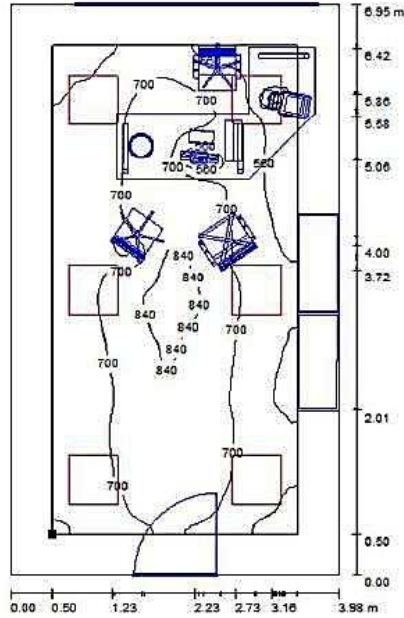


Figura 77 – Disposizione corpi illuminati allo stato di fatto.

Attraverso la simulazione in DIALux si ottengono i risultati riportati in Figura 78 e in Figura 79:



Ufficio FLUO / Luce ARTIFICIALE / Risultati illuminotecnici

Flusso luminoso sferico: 20454 lm
 Potenza totale: 432.0 W
 Zona margine: 0.500 m

Superficie	Illuminamenti medi [lx]			Coefficiente di riflessione [%]	Luminanza medio [cd/m ²]
	diretto	indiretto	totale		
Superficie utile	520	151	671	/	/
Superficie di calcolo FLUO	456	158	614	/	/
Pavimento	291	148	438	56	78
Soffitto	0.00	183	183	70	41
Parete 1	112	199	311	78	77
Parete 2	84	132	216	50	34
Parete 3	100	155	255	78	63
Parete 4	139	181	320	78	80

Regolarità sulla superficie utile
 $E_{min} / E_{m} = 0.320$ (1:3)
 $E_{min} / E_{max} = 0.244$ (1:4)

Potenza allacciata specifica: $15.62 \text{ W/m}^2 = 2.33 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Base: 27.66 m^2)

Figura 78 - Simulazione in DIALux della scena di luce artificiale allo stato di fatto: risultati illuminotecnici.

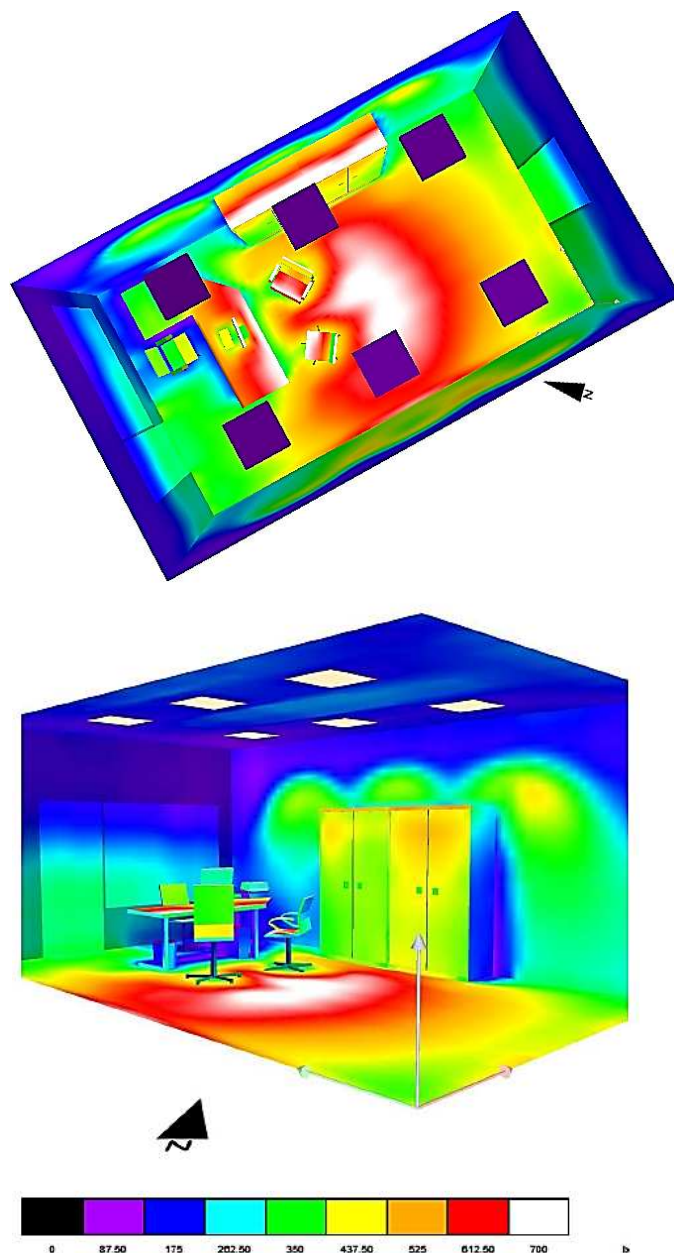


Figura 79 - Simulazione in DIALux della scena di luce artificiale allo stato di fatto: Rendering colori sfalsati.

I risultati ottenuti mostrano che il livello di illuminamento sul piano di lavoro supera abbondantemente quello limite imposto dalla UNI EN 12464-1 (500 lux),

ma nell'ambiente è presente un certo grado di disuniformità di illuminazione (grado di uniformità U_0 inferiore a 0,6).

9.1.3 STUDIO ILLUMINOTECNICO DELL'AMBIENTE UFFICIO: STATO DI PROGETTO.

Si propone a questo punto uno studio illuminotecnico basato su corpi illuminanti a tecnologia LED in modo da effettuare una comparazione di prestazioni illuminotecniche con quelli a fluorescenza attualmente in uso.

Caratteristiche dei corpi illuminanti: stato di progetto.

Si riportano di seguito le caratteristiche delle lampade dei corpi illuminanti a tecnologia LED proposti e la loro di disposizione:



Corpo Illuminante da incasso: 4 lampade LED 12W

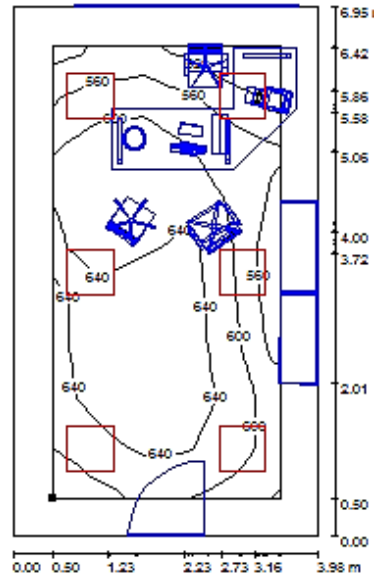
Caratteristiche Lampada:

- Alimentazione: 230V AC
- Attacco: 2 pin / G13 roteabili di 90°
- Potenza: 12W
- Flusso luminoso: 1.000 Lumen
- Angolo di illuminazione: 120°
- Gradazioni di colore: WW 2.700-3.000K / NW 4.000-4.500K / CW 6.000-6.500K
- Durata vita media: 50.000 h



Figura 80 - Disposizione corpi illuminati allo stato di progetto.

Attraverso la simulazione in DIALux si ottengono i risultati riportati in Figura 81e in Figura 82:



Ufficio LED Incasso 4x12W / Luce ARTIFICIALE / Risultati illuminotecnici

Flusso luminoso sferico: 23998 lm
 Potenza totale: 288.0 W
 Zona margine: 0.500 m

Superficie	Illuminamenti medi [lx]			Coefficiente di riflessione [%]	Luminanza medio [cd/m²]
	diretto	indiretto	totale		
Superficie utile	397	211	608	/	/
Superficie di calcolo LED	357	219	576	/	/
Pavimento	215	188	403	56	72
Soffitto	0.00	234	234	70	52
Parete 1	121	255	376	78	93
Parete 2	145	161	307	78	76
Parete 3	104	209	313	78	78
Parete 4	203	221	424	78	105

Regolarità sulla superficie utile
 $E_{min} / E_{m} = 0.807$ (1:1)
 $E_{min} / E_{max} = 0.721$ (1:1)

Potenza allacciata specifica: $10.41 \text{ W/m}^2 = 1.71 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Base: 27.66 m^2)

Figura 81 - Simulazione in DIALux della scena di luce artificiale allo stato di progetto: risultati illuminotecnici.

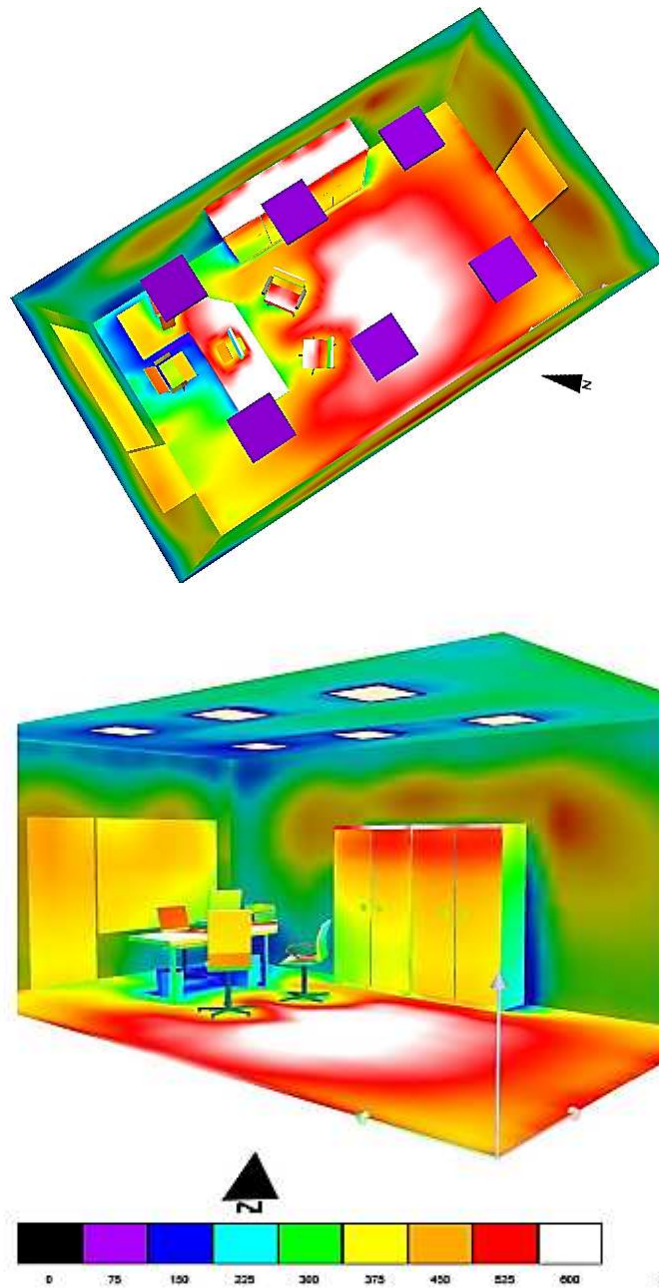


Figura 82 - Simulazione in DIALux della scena di luce artificiale allo stato di progetto: Rendering colori sfalsati.

I risultati ottenuti mostrano che il livello di illuminamento sul piano di lavoro supera quello limite imposto dalla UNI EN 12464-1 (500 lux), ma in questo caso nell'ambiente è presente un grado di uniformità U_0 superiore a 0,6.

Si può quindi affermare che, nel caso in esame, a parità di numero di corpi illuminanti, le lampade a tecnologia LED da 12W permettono livelli di illuminamento simili a quelli prodotti da lampade a fluorescenza da 18W con la sostanziale differenza che il grado di uniformità di illuminamento dell'ambiente è nettamente superiore; a questa peculiarità si aggiunge ovviamente quella del consumo energetico inferiore e quella di durata di vita media dieci volte superiore.

9.1.4 VALUTAZIONE ENERGETICA.

Si può quindi effettuare una valutazione energetica delle due tecnologie a confronto valutando gli indici:

- **LENI** (*Lighting Energy Numeric Indicator*):

$$LENI = \frac{W}{A} \left[\frac{kWh}{m^2 anno} \right]$$

- **EP_{ill}** (*Lighting Energy Performance*):

$$EP_{ill} = LENI \cdot \frac{S}{V} \cdot 2,17 \left[\frac{kWh}{m^3 anno} \right]$$

con S/V fattore di forma dell'edificio/ambiente in studio.

I risultati ottenuti per l'ambiente in studio sono riportati in [Figura 83](#) e in [Figura 84](#).

Data la proporzionalità diretta tra indice LENI e indice EP_{ill} si deduce che quest'ultimo si è ridotto del 30% con l'utilizzo della tecnologia LED.

Le considerazioni fatte possono essere estese a questo punto a tutto l'Edificio oggetto degli interventi di riqualificazione energetica.

Valutazione Energetica / Riepilogo

Valutazione energetica secondo la seguente norma: EN 15193

Risultati

Energia totale Illuminazione: 864.50 kWh/a
 LENI: 31.25 kWh/(a · m²)

Superficie totale: 27.66 m²

Risultati mensili

Mese	[kWh]	Illuminazione [kWh/m ²]	[kWh]	Compto visivo [kWh/m ²]	[kWh]	Parassitario [kWh/m ²]	
Gen	73.56	2.66	73.56	2.66	0.00	0.00	
Feb	72.31	2.61	72.31	2.61	0.00	0.00	
Mar	71.59	2.59	71.59	2.59	0.00	0.00	
Apr	71.23	2.58	71.23	2.58	0.00	0.00	
Mag	71.15	2.57	71.15	2.57	0.00	0.00	
Giu	71.15	2.57	71.15	2.57	0.00	0.00	
Lug	71.15	2.57	71.15	2.57	0.00	0.00	
Ago	71.32	2.58	71.32	2.58	0.00	0.00	
Set	71.59	2.59	71.59	2.59	0.00	0.00	
Ott	72.31	2.61	72.31	2.61	0.00	0.00	
Nov	73.21	2.65	73.21	2.65	0.00	0.00	
Dic	74.01	2.68	74.01	2.68	0.00	0.00	

Progetto corrispondente: Valutazione energetica
 Elenco dei locali oggetto della valutazione energetica:
 - Ufficio FLUO (Valutazione energetica) (1 x)

Figura 83 – Valutazione energetica: lampade a fluorescenza.

Valutazione energetica / Riepilogo

Valutazione energetica secondo la seguente norma: EN 15193
 Località: Rome, Grado di longitudine: 12.50°, Grado di latitudine: 41.90°

Risultati

Energia totale Illuminazione: 597.52 kWh/a
 LENI: 21.60 kWh/(a · m²)

Energia totale Compto visivo: 597.52 kWh/a

Superficie totale: 27.66 m²

Risultati mensili

Mese	[kWh]	Illuminazione [kWh/m ²]	[kWh]	Compto visivo [kWh/m ²]	[kWh]	Parassitario [kWh/m ²]	
Gen	50.89	1.84	50.89	1.84	0.00	0.00	
Feb	50.17	1.81	50.17	1.81	0.00	0.00	
Mar	49.58	1.79	49.58	1.79	0.00	0.00	
Apr	49.25	1.78	49.25	1.78	0.00	0.00	
Mag	49.08	1.77	49.08	1.77	0.00	0.00	
Giu	49.16	1.76	49.16	1.76	0.00	0.00	
Lug	48.99	1.77	48.99	1.77	0.00	0.00	
Ago	49.20	1.78	49.20	1.78	0.00	0.00	
Set	49.58	1.79	49.58	1.79	0.00	0.00	
Ott	50.00	1.81	50.00	1.81	0.00	0.00	
Nov	50.59	1.83	50.59	1.83	0.00	0.00	
Dic	51.10	1.85	51.10	1.85	0.00	0.00	

Elenco delle zone interessate:
 • UFFICIO LED

Figura 84 - Valutazione energetica: lampade LED.

9.1.5 VALUTAZIONE ECONOMICA.

Assieme alle valutazioni illuminotecniche ed energetiche, la valutazione economica occupa un posto di notevole importanza. A tal riguardo l'uso della tecnologia LED può avere risvolti economici considerevoli in relazione alle notevoli dimensioni dell'Edificio oggetto di studio.

Si parte con alcune considerazioni preliminari:

- la tecnologia LED permette un minore consumo

- la tecnologia LED permette bassi costi di manutenzione vista la durata di vita media molto superiore a quella a fluorescenza
- la tecnologia LED è comunque più costosa rispetto a quella a fluorescenza.

Una analisi economica efficace deve essere in grado, al di là dei puri concetti di matematica finanziaria, di poter correlare questi aspetti in maniera corretta; si cercherà in questa sezione di unire questi aspetti per capire l'effettiva bontà dell'investimento.

Appurato lo stato di fatto dell'impianto di illuminazione si propongono due casistiche di intervento:

1. totale sostituzione dei corpi illuminanti a fluorescenza con corpi illuminanti a tecnologia LED
2. sostituzione solo dei tubi a fluorescenza con tubi a tecnologia LED lasciando inalterato il corpo illuminante.

Prima di affrontare i due casi proposti è opportuno fare delle considerazioni sia sul mercato dell'energia elettrica sia sul mercato delle lampade LED.

Nella trattazione economica di seguito proposta verrà utilizzata per quanto concerne i costi dell'energia elettrica, la tariffa di maggior tutela per utenti non domestici, con potenza disponibile maggiore di 16,5 kW (Figura 85):

CLIENTI NON DOMESTICI								
- Servizi di vendita: energia e dispacciamento (PED), commercializzazione vendita (PCV), componenti di perequazione (PPE) e di dispacciamento (DI)								
- Servizi di rete: distribuzione, trasporto (TRASE), misura (MIS)								
- Oneri generali: componenti A (A2, A3, A4, A5, As), UC (UC3, UC4, UC6, UC7) e MCT								
A) Utenze con potenza disponibile fino a 16,5 kW								
- per potenze impegnate superiori a 6 kW								
Quota energia (€/kWh)	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri generali *	TOTALE		
	fascia F1	fascia F2	fascia F3			fascia F1	fascia F2	fascia F3
luglio 2012	0,11203	0,11065	0,08611	0,00619	0,052705	0,170925	0,169545	0,145005
agosto 2012	0,10040	0,11082	0,08804			0,159295	0,169715	0,146935
settembre 2012	0,10538	0,11208	0,08968			0,164275	0,170975	0,148575
Quota fissa (€/anno)	40,38800			28,08310	116,96920	185,44030		
Quota potenza (€/kW/anno)				33,13890		33,13890		
B) Utenze con potenza disponibile superiore a 16,5 kW								
Quota energia (€/kWh)	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri generali *	TOTALE		
	fascia F1	fascia F2	fascia F3			fascia F1	fascia F2	fascia F3
luglio 2012	0,11203	0,11065	0,08611	0,00616	0,052705	0,170895	0,169515	0,144975
agosto 2012	0,10040	0,11082	0,08804			0,159265	0,169685	0,146905
settembre 2012	0,10538	0,11208	0,08968			0,164245	0,170945	0,148545
Quota fissa (€/anno)	40,38800			27,55860	116,96920	184,91580		
Quota potenza (€/kW/anno)				31,47360		31,47360		

* Valori per consumi mensili nei limiti di 4 GWh

Figura 85 – Servizi di vendita energia elettrica (fonte GSE).

Per quanto concerne invece il costo di mercato dei corpi illuminanti LED e dei tubi LED si considerano i seguenti costi:

- costo del corpo illuminante (IVA esclusa) come da caratteristiche al 9.1.3: € 131,6²⁴
- costo del singolo tubo LED 12 W T8 60 cm (IVA esclusa): € 30,0²⁵
- costo del singolo tubo a fluorescenza 18W T8 60 cm (IVA esclusa): € 6,00²⁶

CASO 1:totale sostituzione

Tenuto conto del costo dell'investimento per l'acquisto dei corpi illuminanti per tutti gli uffici dell'Edificio Nuovo (circa 2166 corpi illuminanti), dei risparmi nelle fatture elettriche e dei risparmi in manutenzione dovuti a tempi di sostituzione dei tubi a LED notevolmente più lunghi, si ottiene un piano di ammortamento caratterizzato dal flusso di cassa di Figura 86:

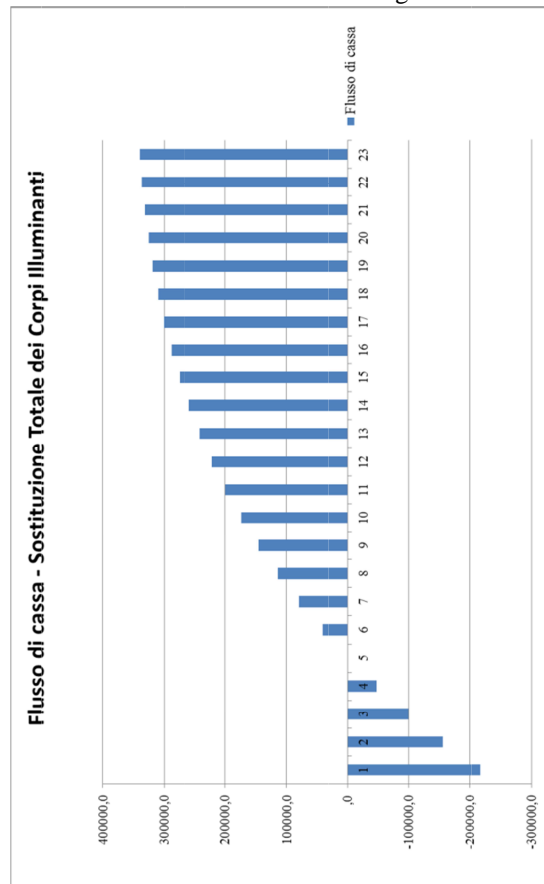


Figura 86 – Flusso di cassa – Caso di totale sostituzione corpi illuminanti

²⁴ LISCOOP – Sale Point & Showroom - Via Teresa Gnoli , 39 – 00135 - Rome, Italy.

²⁵ Led-illumina di F. & F. REC S.r.l. - Viale Parini 39, I - 23880 - Casatenovo (LC), Italy.

²⁶ OSRAM S.p.a. - Viale dell'Innovazione - 320126 – Milan, Italy

Come si può notare il rientro dell'investimento si verifica in circa 5 anni.

CASO 2: sostituzione solo dei tubi fluorescenti con tubi LED

Fatte salve le considerazioni del Caso 1, si ottiene un piano di ammortamento caratterizzato dal flusso di cassa di Figura 87:

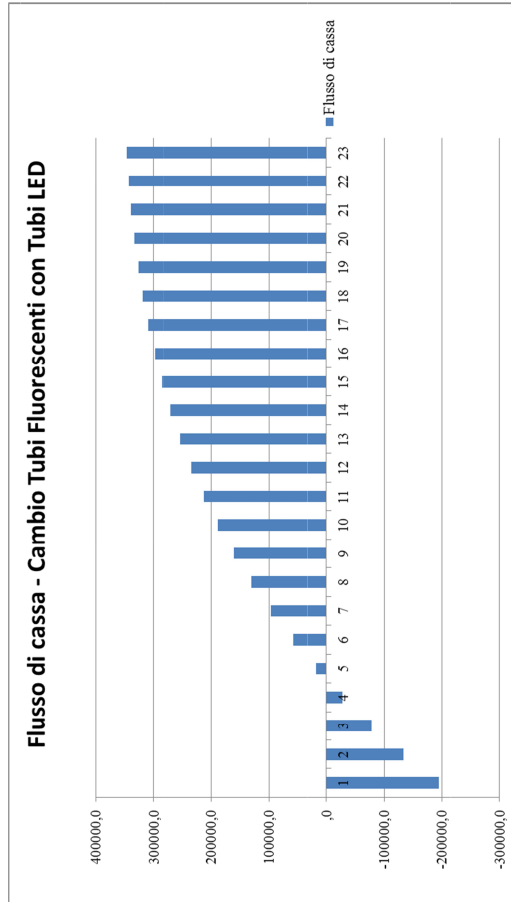


Figura 87 - Flusso di cassa – Caso di sostituzione solo dei tubi a fluorescenza con tubi LED

Come si può notare il rientro dell'investimento si verifica in circa 4 anni. In questo caso è però d'obbligo fare una considerazione importante in quanto all'atto della sola sostituzione dei tubi a fluorescenza con tubi LED il corpo illuminante esistente necessiterà di un ricablaggio (i LED non necessitano di starter); allo stesso tempo vista la sua non modernità impiantistica, il sistema non potrà essere dimmerabile e non accoppiabile a un sistema di Lighting Management (domotica di illuminazione).

10. APPENDICE: TAVOLE GRAFICHE

INDICE CAPITOLO

10.1	RIFERIMENTI STORICI DELL'EDIFICIO.....	152
10.2	PLANIMETRIE E DETTAGLI COSTRUTTIVI.....	153
10.3	DETTAGLIO DELLE VETRATE.....	154

10.1 RIFERIMENTI STORICI DELL'EDIFICIO

L'AREA PRIMA DEL 1860

Prima dell'edificazione della Manifattura per la lavorazione del tabacco, l'area aveva un carattere prevalentemente agricolo. Tra i campi coltivati sorgeva la Chiesa dell'arciconfraternita di Santa Maria dell'Orto e gli annessi locali adibiti a spezieria ed ospedale.



SANTA MARIA DELL'ORTO: ORIGINE ED EVOLUZIONE DELLA CHIESA E DELL'OSPEDALE

PRINCIPALI EVENTI CHE INTERESSANO LE PROPRIETÀ DELL'ARCICONFRATERNITA DI SANTA MARIA DELL'ORTO

- Fine XV sec** Prima cappella alla Madonna dell'Orto affiancata da un piccolo Ospedale
- Inizi del 1500** L'Ospedale e l'associata Spezieria raggiungono la loro piena attività fornendo l'assistenza sanitaria ai membri delle varie corporazioni che si impegnano nel suo mantenimento
- Fine del 1600** Ampliamento dell'ospedale al quale venne aggiunto un fabbricato di grandezza quasi pari al primitivo edificio. Riedificazione della Spezieria. Interventi decorativi della chiesa
- Fine del 1700** L'attività dell'ospedale venne sospesa a causa delle spoliazioni e devastazioni subite al tempo della Repubblica giacobina, e mai più ripresa
- 1839** L'Ospedale venne definitivamente soppresso ed i locali furono affittati all'Amministrazione Conteresata Sali e Tabacchi che lo adibirono a magazzino del greggio
- 1860** Inizio lavori per la costruzione della nuova fabbrica che occupava l'area prima riservata all'ospedale, all'orto ed al piccolo cimitero. La spezieria fu invece adibita a civile abitazione



DETTAGLI AMBIENTI EX OSPEDALE



- Corse dell'ospedale, ridotte dal 1839 dalla Regia Conteresata a magazzini per la conservazione del greggio.
- Locali annessi a dette corse
- Casa di abitazione del custode dei magazzini
- Cortile e pozzo che fa parte dell'enfiteusi
- Ingresso alla Chiesa ed Oratorio con le servitù del transito del custode dei magazzini
- Area dell'orto che fa parte panimenti dell'enfiteusi
- Magazzini costruiti dalla reverenda camera apostolica

L'EDIFICIO "STORICO" (periodo di costruzione 1860 - 1963, architetto ANTONIO SARTI)



La prima manifattura dei tabacchi a Roma fu realizzata nel biennio 1743-44 su progetto dell'architetto Luigi Vanvitelli nel rione Trastevere (nell'attuale via Garibaldi). La necessità di ampliare il numero di tabacchifici deriva dal fatto di riorganizzare gli spazi produttivi per renderli funzionali ad un nuovo tipo di prodotto, quello dei sigari, introdotto dalle truppe francesi.

Alla metà dell'Ottocento, la produzione di tabacco si suddivideva in tre diverse manifatture: nel Convento di Santa Margherita si produceva il tabacco da fiuto, nell'Ospizio di San Michele si producevano i sigari forti ed infine in alcuni locali attigui alla chiesa di Santa Maria dell'Orto si producevano i sigari leggeri.

Tra il 1858 e il 1859 questi tre locali divennero inutilizzabili, tanto che alla fine del 1859 si decide per una nuova costruzione, da realizzarsi proprio su alcuni terreni nei pressi della chiesa di Santa Maria dell'Orto.

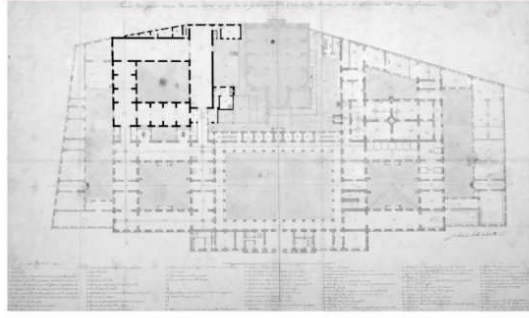
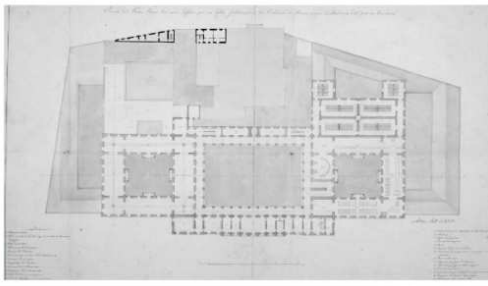
Nel 1859 la Regia Pontificia ottiene l'autorizzazione a predisporre un progetto di costruzione di una grande manifattura e, grazie a papa Pio IX (Giovanni Maria Mastai Ferretti 1792-1878), si decide di realizzare un edificio che risponda alle nuove esigenze e che riunisca in sé i vari reparti di fabbricazione, immagazzinamento e direzione.

Presso accurati studi fu compilato il progetto per il quale la fabbrica verrà unita all'ex-ospedale della Chiesa di Santa Maria dell'Orto, già in uso come magazzino.

Il palazzo fu costruito dall'architetto camerale Antonio Sarti (Budrio, 1797 - Roma, 1880), su programma fornito dal marchese Ferraioni (amministratore della Regia dei sali e tabacchi), e sotto la direzione di mons. Ferrari, tesoriere generale e ministro delle finanze, nel periodo compreso tra il 1860 ed il 1867 (anche se la maggior parte del lavoro doveva essere già ultimata nel 1863).

Il nuovo edificio, la cui facciata prima della demolizione delle ali era lunga complessivamente 168m, ha un corpo centrale in aggetto con otto colonne doriche poggianti su una cornice dell'antefreno (bugnato) sommonte da una trabeazione con la scritta "Pius IX P.M. officinarum nicotianis folio elaborandis a solo extruxit anno MDCCCLXIII" ed infine un timpano.

Fra le colonne 3 stemmi: quello di Pio IX (cent); quello della Camera Apostolica (sin), e quello di mons. Ferrari (des). L'interno della manifattura, prima dei lavori per la costruzione dei nuovi edifici nella seconda metà del 1950, si articolava su tre piani (più i sotterranei), intorno a cinque grandi cortili principali: il maggiore (del quale resta solo il lato retrostante la facciata) era caratterizzato da un duplice ordine di portici con 36 arcate per lato; su quello opposto all'ingresso si elevava la torre dell'orologio; le cui campane, del 1863, sono attualmente conservate nell'atrio.



Dal porto di Ripa Grande il tabacco veniva trasportato attraverso dei binari che arrivavano nei sotterranei della fabbrica. Qui si trovavano i magazzini e le stufe per l'essiccamento. L'edificio era dotato di un sistema di saliscendi meccanici, azionati con motore ad acqua, attraverso i quali il tabacco passava al piano terreno e da lì a quello superiore.

L'organizzazione interna degli ambienti era articolata nei vari piani in relazione alle diverse fasi di lavorazione del tabacco.

Al piano terreno vi erano la residenza del custode, il parlatorio, gli spogliatoi, le camere per le operaie lattanti, la stamperia, la cucina, un cortile per il "soleggiamento" dei tabacchi grezzi, un locale coperto per carico e scarico tabacchi, un laboratorio di apprestamento con vasche per la "umettazione" della foglia, un fono per combustione del materiale di scarto, locali per la fermentazione, un'officina del fabbro con macchine animate a vapore, magazzino delle carte ed etichette per tabacchi da fiuto e trinciati, una scuderia ed una sala principale che portava ai piani superiori.

Il primo piano era quasi del tutto occupato dagli uffici, si trovavano inoltre dei locali per le stufe, un camerino per il deposito delle chiavi dello stabilimento, un ufficio ragioniera, l'archivio, un magazzino per i sigari esteri ed una terrazza scoperta per l'essiccamento.

Al secondo piano si trovavano i laboratori dove erano dislocate le fasi vere e proprie della lavorazione dei sigari; vi erano quattro grandi locali posti sui quattro lati dei cortili adiacenti a quello centrale, un laboratorio delle scatole di cartone e un altro deposito di sigari provvisto di rotaie per il trasporto delle casse. I laboratori erano arredati con semplici tavoli e le operaie lavoravano manualmente, posizionate ai due lati del tavolo, per il confezionamento dei sigari.

In fine il terzo piano, accessibile solo dalle scale secondarie, è costituito da due grandi logge coperte, destinate all'essiccazione dei sigari e delle foglie di tabacco durante la bella stagione.

PRINCIPALI EVENTI CHE HANNO SEGNAATO LA STORIA DELL'EDIFICIO

1859-67: PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE EDIFICIO STORICO (Arch. Antonio SARTI) E DEL QUARTIERE LIMITROFO (Arch. Andrea BUSIRI VICI)

1927: PRIMA RISTRUTTURAZIONE DELL'EDIFICIO STORICO FINALIZZATA ALL'ADEGUAMENTO DELLA PARTE CENTRALE AD UFFICI CHE DOVEVANO OSPITARE LA DIREZIONE GENERALE DEI MONOPOLI DI STATO (Ing. Renzo ZIPPEL)

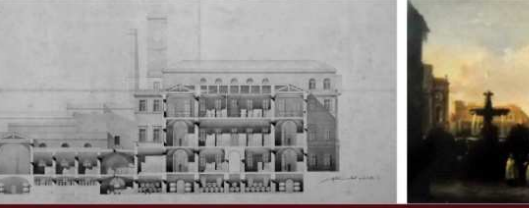
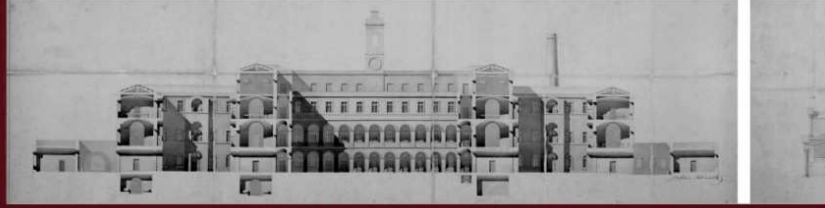
PROGETTAZIONE DELLA COPERTURA DELLA SALA MACCHINE (Ing. Pierluigi NERVI)

1958: DEMOLIZIONE DELLE ALI LATERALI DELL'EDIFICIO STORICO

1960-63: PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE DELL'EDIFICIO NUOVO (Arch. Cesare PASCOLETTI)



1. Iniziativa di un'industria nazionale di un'industria nazionale del tabacco a cura di mons. Ferrari
2. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863
3. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863
4. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863
5. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863
6. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863
7. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863
8. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863
9. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863
10. Direzione generale di Antonio Sarti (1860-67) del 1863



1. Accordo - Tra degli e reali, i Reali di Stato del 1864

2. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

3. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

4. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

5. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

6. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

7. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

8. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

9. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

10. Direzione - La Direzione di Stato del 1864

IL NUOVO QUARTIERE MASTAI (1865)

La nuova Fabbrica in origine affacciava su una via stretta e questo, oltre a non consentire una completa visuale della facciata, rendeva estremamente difficile il lavoro di carico e scarico delle materie prime occorrenti alla manifattura. Come risoluzione a questi inconvenienti, venne demolita tutta l'area di fronte alla facciata ed effettuata una vera operazione urbanistica nel cuore del quartiere popolare di Trastevere, ad opera dell'architetto Andrea Busiri Vici. L'operazione comprendeva la realizzazione della piazza con al centro una fontana circolare dedicata a Pio IX, ancora oggi esistenti, davanti all'ingresso principale della manifattura, e l'apertura di una nuova strada, via Mastai (l'odierna via Merry del Val), lunga 80 e larga 13 metri, che iniziava dalla metà di via di San Francesco a Ripa. La fontana era alimentata dall'acqua Paola (proveniente dal Gianicolo tramite una conduttura in piombo, "quale acqua però è destinata anche, nel suo sopravanzo per uso delle strade che si stanno costruendo" infatti "La sanità del nostro Signore, intesa sempre ad avvantaggiare la classe indigente, ha voluto che nell'ampio spazio residuo dei terreni acquistati sulla destra della nuova piazza si costrissero abitazioni, che con modici fitti potessero servire ai poveri, e approfittare i lavoranti addetti al nuovo stabilimento".



L'APERTURA DEL "VIALE DEL RE" (1886)



Il Rione Trastevere fu segnato da un importante evento nel 1886: l'apertura del viale del Re, poi viale del Lavoro e infine viale Trastevere, finalizzato a congiungere, attraverso un nuovo ponte (ossia ponte Garibaldi, aperto due anni dopo), via Arenula con la stazione ferroviaria che doveva essere il terminale dei collegamenti con il nord lungo il Tirreno.

Ma il nuovo Viale non fece in tempo ad essere ultimato che la stazione, edificata a fine '800, che si affacciava su piazza Ippolito Nievo - di tipologia delle costruzioni civili dell'epoca, con tettoia in ferro, tre ordini di bucatore e facciata decorata in pietra e bugnato con il suo tradizionale orologio - era già stata declassata, per il traffico passeggeri, a favore di Roma Termini.

Fino al 1950 è utilizzata come scalo merci e officina veicoli. Oggi è sede dell'Istituto Sperimentale delle Ferrovie.

Nel 1907, iniziano i lavori di realizzazione della stazione odierna ubicata nella vicina Piazza Biondo.

Pur se risparmiato dal più ambizioso progetto che colpirono pesantemente altri rioni della città, Trastevere uscì stravolto dalla costruzione di questo viale, che da solo alterò l'intero orientamento della zona e la divise in due parti che non si sarebbero mai più saldate.



L'INTRODUZIONE DEL TABACCO IN ITALIA

Il tabacco era stato introdotto a Roma nel 1565 dal Cardinali Prospero Santacroce, che era stato nunzio apostolico a Lisbona e a Parigi, le prime città europee nelle quali se ne era diffuso l'uso. Il consumo di questa erba si estese rapidamente, anche se fu salutarmente proibito da qualche pontefice, ma senza successo.

Nel 1655 Alessandro VII istituì la privativa del tabacco con chiostro del 21 agosto, quando non esisteva ancora una vera attività produttiva finalizzata a scopi fiscali e commerciali.

Nel 1742 Benedetto XIV concesse per nove anni, l'appalto generale del tabacco e quello dell'acquavite per Roma e lo Stato Pontificio a Giovanni Michilli, che si associò poi a Giovanni Antonio Bonamici, ed insieme fecero costruire tra il 1743 e il 1744 un edificio apposito per la lavorazione del prodotto in via Garibaldi al Gianicolo.

Nel 1752, trovandosi i due soci in pessime condizioni economiche, l'appalto fu concesso a Domenico Zaccardini ed al conti Giraud. Successivamente, nel 1755 gli stessi Michilli e Bonamici vendettero alla Dataria Apostolica l'edificio e la fabbrica.

La privativa e l'appalto del tabacco furono poi aboliti nel 1758 da Benedetto XIV e successivamente ripristinati dal Governo imperiale francese, che spostò la fabbrica nei locali attigui al convento di S. Caterina da Siena di Magnanopoli, ove rimase finché fu nuovamente trasferita, con il ritorno di Pio VII, dapprima, nel 1814, nel convento delle Convertite, al Corso, e successivamente, intorno al 1820 in parte in quello di S. Margherita in piazza Apollonia e in parte nel palazzo Lante in vicolo S. Francesco di Sales.

Il 31.XII.1855, scaduta l'Amministrazione Conteresata, venne istituita la Regia Pontificia del sale e del tabacco, alla quale venne preposto il march. Giuseppe Ferraioli, che conservò l'incarico fino al 1870.

Il 27 maggio 1858 il reparto lavorazione sigari scelti Virginia e gli uffici amministrativi, si trasferirono nell'Ospizio di S. Michele, prima di essere riuniti nella nuova fabbrica di piazza Mastai.

Negli anni 60 del 1800 lo Stato italiano affidò il monopolio dei sali e dei tabacchi dapprima alla Direzione Generale delle Gabelle, e in seguito, per 15 anni alla Regia conteresata, una società anonima.

Dal gennaio 1884 la Direzione Generale delle Gabelle del Ministero delle Finanze riprese il monopolio in amministrazione diretta, con risultati modesti. Pertanto si decise di dare una certa autonomia a questo servizio e si istituì, nel 1893, una Direzione Generale delle privative, che riuniva i servizi dei sali e dei tabacchi, la quale si rivelò ancora una volta inadeguata. Infine, nel 1928, fu creata l'Amministrazione Autonoma dei Monopoli di Stato, presieduta dal Ministero delle Finanze.

Dei Prezzi di Vendita dei Tabacchi in Roma.	
DESCRIZIONE	PREZZO
Tabacco di Virginia	...
Tabacco di Santo Domingo	...
Tabacco di Cuba	...
Tabacco di Indes	...
Tabacco di Connecticut	...
Tabacco di Maryland	...
Tabacco di Carolina del Nord	...
Tabacco di Virginia di prima qualità	...
Tabacco di Virginia di seconda qualità	...
Tabacco di Virginia di terza qualità	...
Tabacco di Virginia di quarta qualità	...
Tabacco di Virginia di quinta qualità	...
Tabacco di Virginia di sesta qualità	...
Tabacco di Virginia di settima qualità	...
Tabacco di Virginia di ottava qualità	...
Tabacco di Virginia di nona qualità	...
Tabacco di Virginia di decima qualità	...

LE MODIFICHE DEGLI ANNI '30

La fabbrica venne ristrutturata per la prima volta nel 1927 per adattare la parte centrale dello stabilimento ad uffici, che dovevano servire ad ospitare la Direzione generale dei Monopoli di Stato.

La parte interessata da questa prima sistemazione è quella adossata all'ex-ospedaleito, in linea con la facciata della chiesa di Santa Maria dell'Orto.

Nel biennio 1929-30 l'Amministrazione Autonoma dei Monopoli di Stato inviò numerose richieste all'ufficio tecnico del Governatorato per l'ampliamento del fabbricato "per forti ragioni industriali ed igieniche. (...) Tale ampliamento, data la deficienza di spazio nei cortili interni, non poteva "ottenersi altro che colà sopraelevazione dei fabbricati esistenti".

Numerose furono le proposte respinte, fino al 1930, quando fu concesso il permesso per la sopraelevazione di una pic-



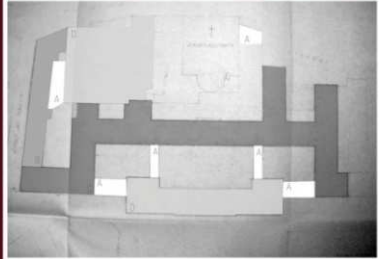
I lavori furono diretti dall'ingegner Renzo Zippel ed avvennero con la collaborazione dell'ingegner Pierluigi Nervi che disegnò la copertura della sala macchine per la selezione dei tabacchi: una sala di impianto basilicale priva di sostegni intermedi ed illuminata da una serie di ampie finestrate che segnano il ritmo delle arcate reticolari in cemento armato.

La struttura viene eseguita dalla Società per costruzioni Ing. Nervi & Nebbioli, costruzioni in cemento armato e murarie civili ed industriali, che aveva sede in Roma in via XXIV maggio.

La sala successivamente sarà adattata (e lo è tutt'ora) a mensa per gli impiegati che lavorano negli uffici sottostanti.

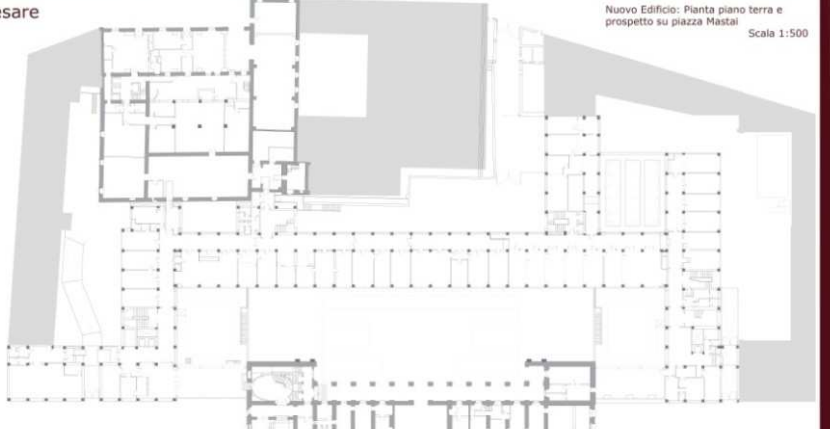
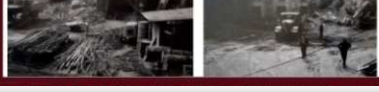
Contestualmente ai lavori di sopraelevazione viene realizzata, su disegno dell'ing. Zippel, una scala elicoidale nella parte retrostante la facciata su piazza Mastai, tutt'ora in situ.

L'EDIFICIO "NUOVO" (periodo di costruzione 1959 - 1960, architetto Cesare)



Nel 1958 viene inaugurata la nuova fabbrica del tabacco sulla circosvalazione Ostiense, su progetto dell'ingegner Pierluigi Nervi, mentre nella storica manifattura dipiazza Mastai inizia la demolizione delle ali laterali del vecchio edificio. La nuova sistemazione, realizzata su disegno dell'architetto Cesare Pascoletti, è destinata agli uffici della Direzione Generale dei Monopoli di Stato.

- A) Nuove costruzioni basse per collegamenti con l'edificio storico e servizi
- B) Da costruire: abitazioni e foresteria
- C) Da costruire: direzione e uffici
- D) Costruzioni esistenti da rimodernare



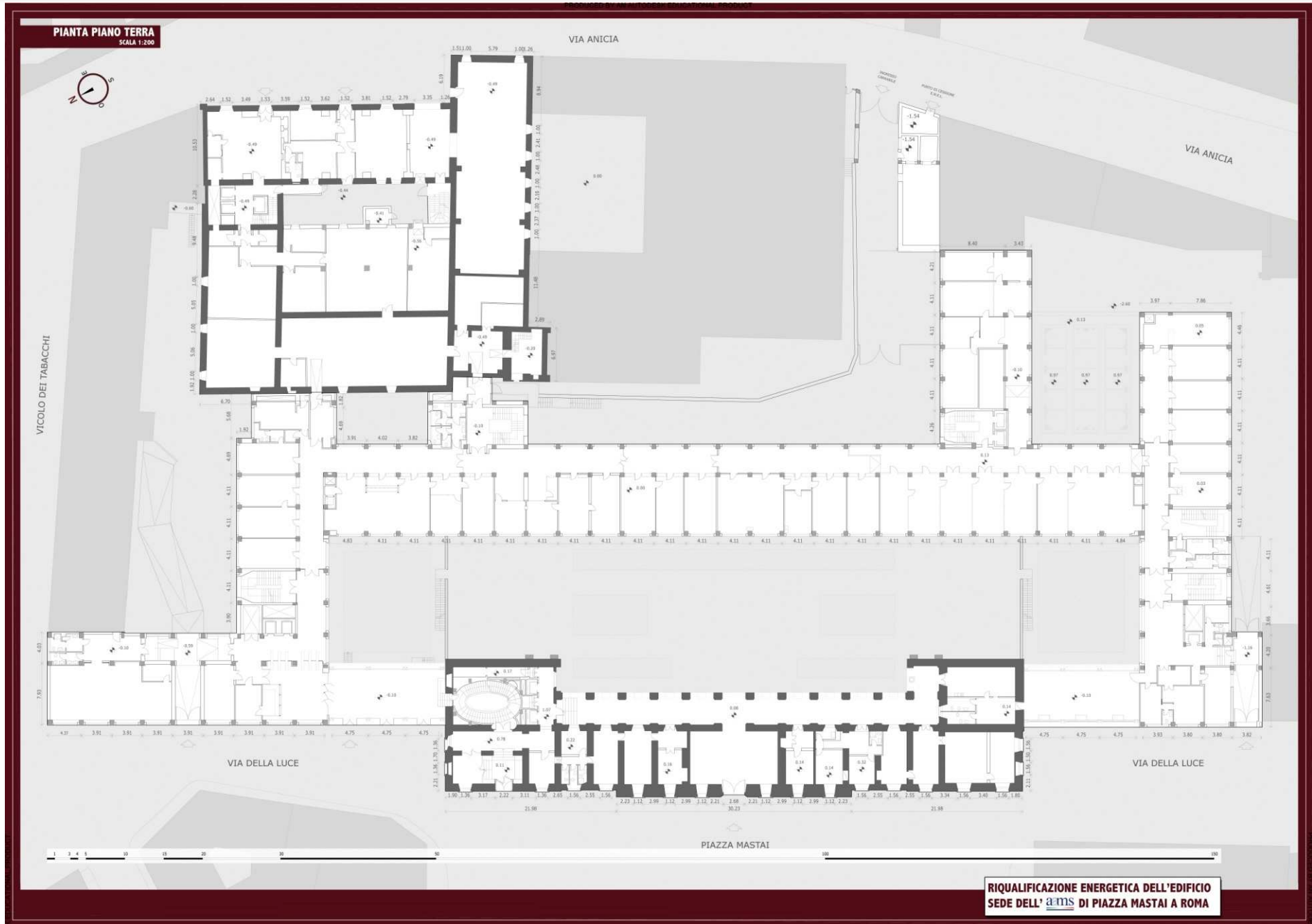
Nuovo Edificio: Pianta piano terra e prospetto su piazza Mastai
Scala 1:500

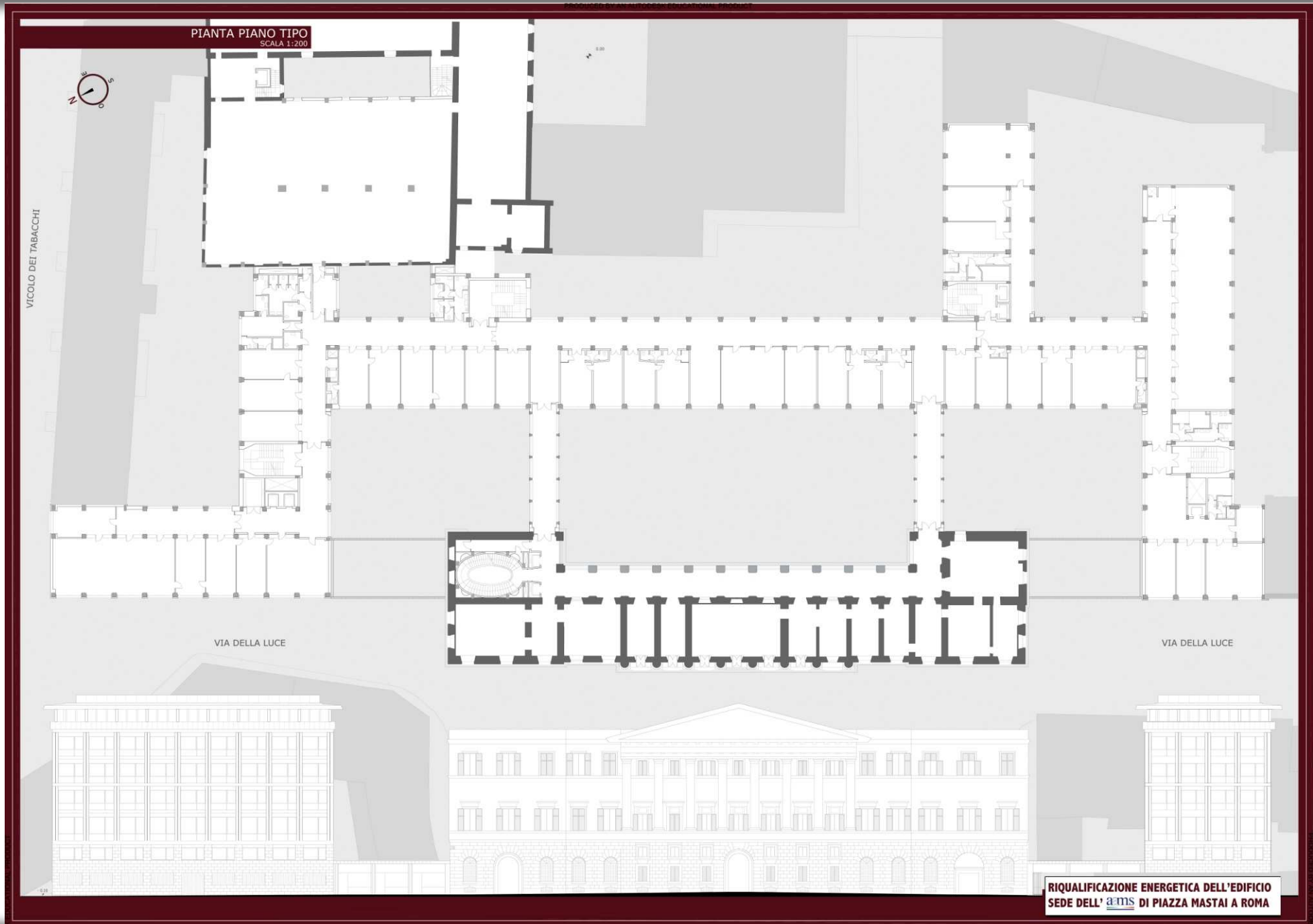


Nei lavori di demolizione delle ali del vecchio edificio e costruzione del nuovo è stato modificato anche il prospetto principale su piazza Mastai. Infatti, come si nota confrontando foto storiche e attuali, la facciata è stata abbassata di un piano nei locali che fiancheggiano il fronte centrale. Tale modifica ha causato un totale stravolgimento nella concezione della facciata, che ha perso l'imponenza e la monumentalità con le quali era stata concepita. I lavori hanno inoltre causato diversi problemi di tipo statico alla chiesa di S. Maria dell'Orto.



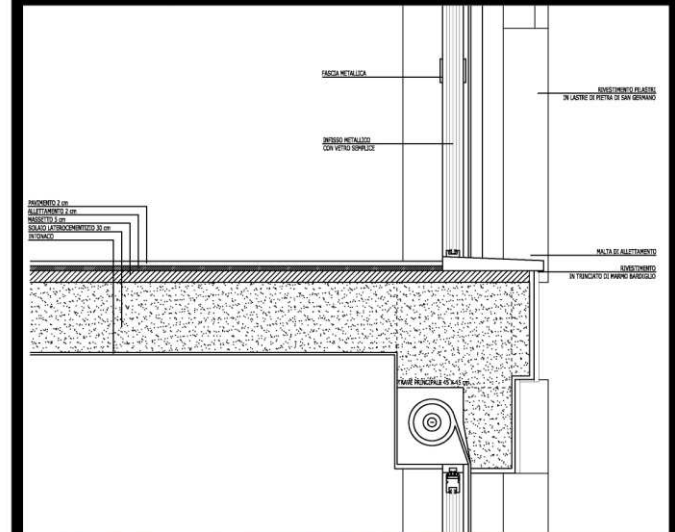
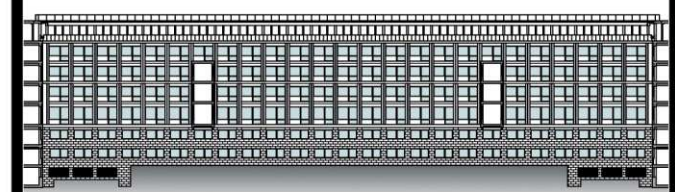
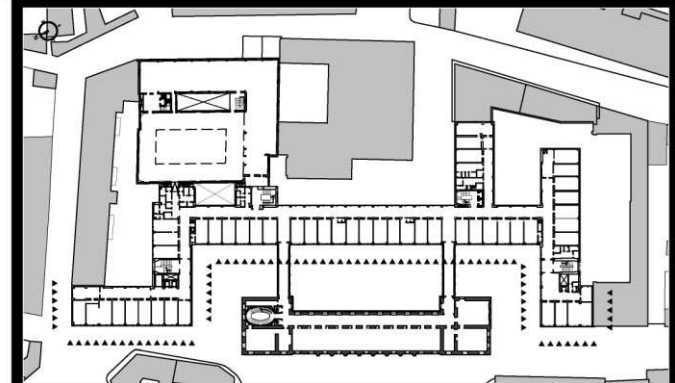
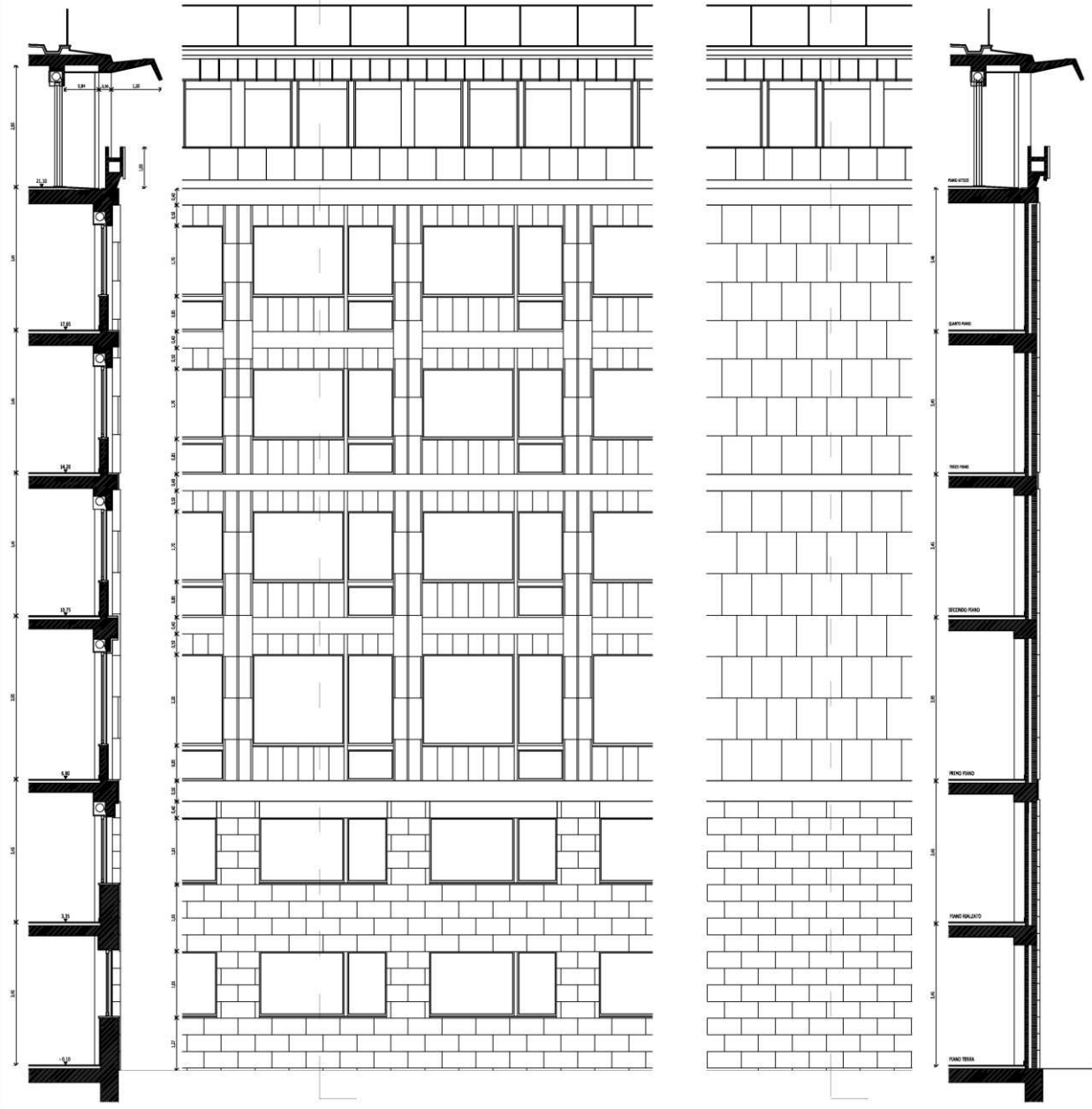
10.2 PLANIMETRIE E DETTAGLI COSTRUTTIVI



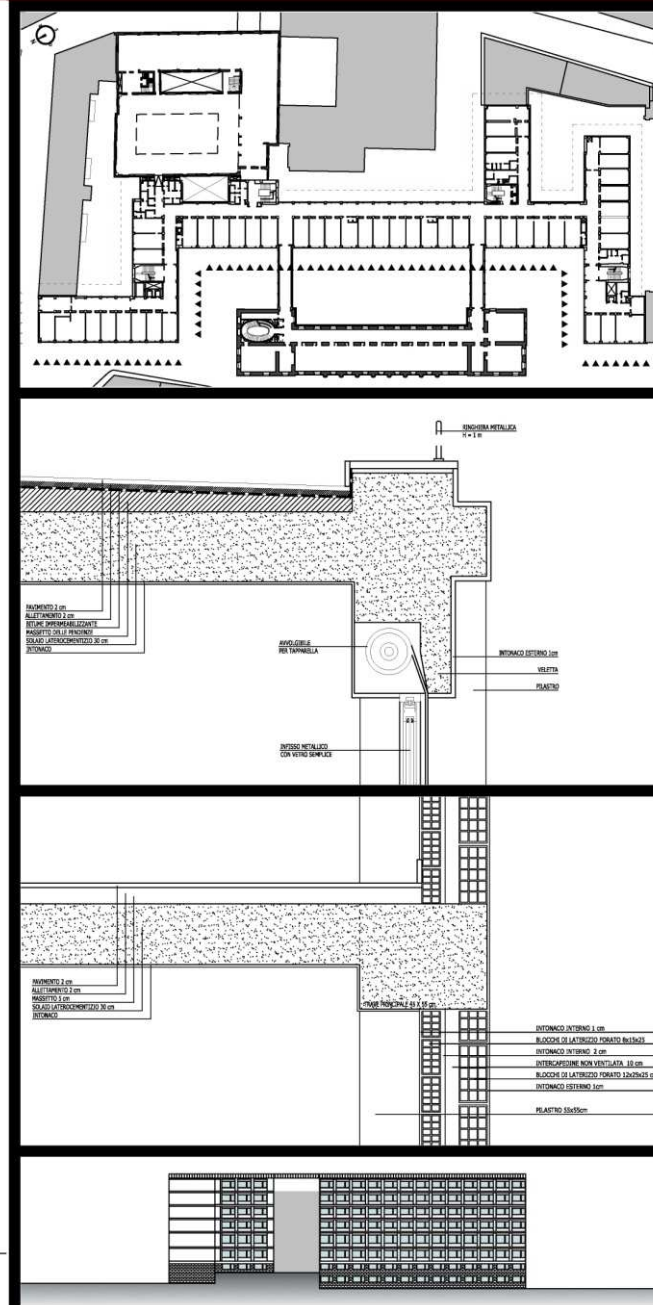
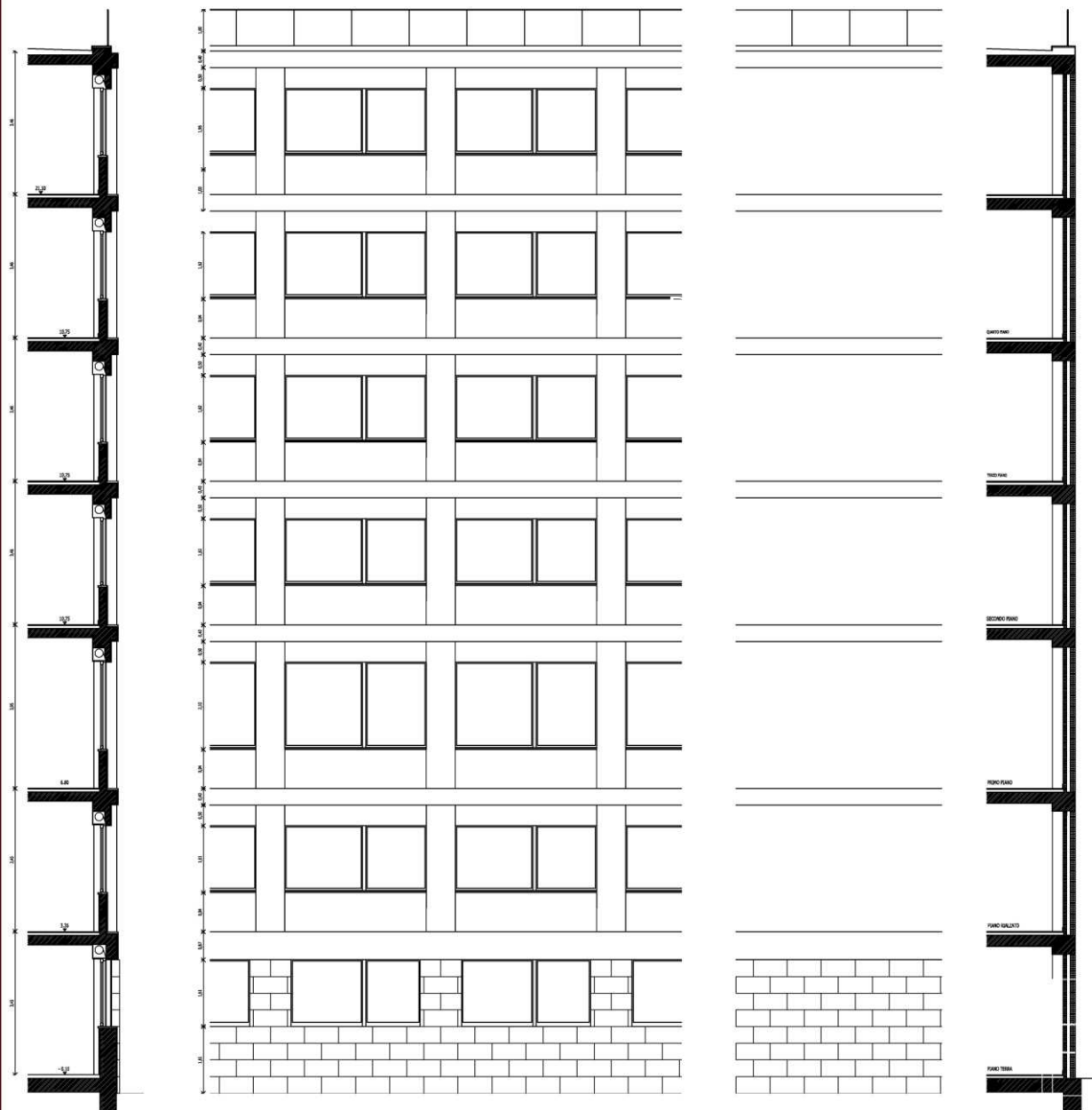


Riqualificazione Energetica sede AAMS

DETTAGLIO FACCIAIA TIPOLOGIA A: RIVESTIMENTO IN MATERIALE LAPIDEO E FINESTRE CON ANTE DI ALTEZZE DIFFERENTI



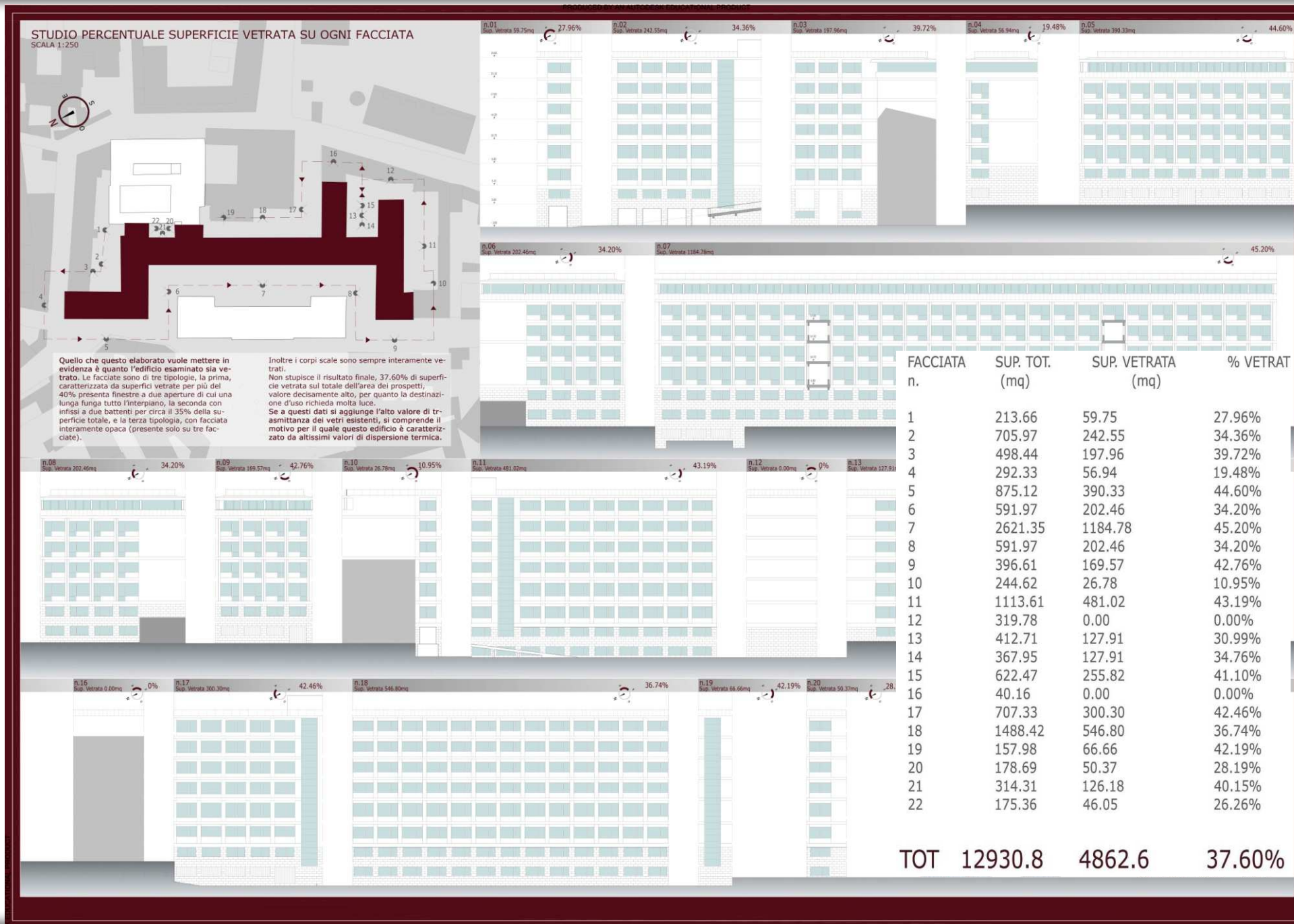
DETTAGLIO FACCIATA TIPOLOGIA B: FACCIATA INTONACATA E FINESTRA A DUE APERTURE DI UGUALE ALTEZZA



10.3 DETTAGLIO DELLE VETRATE

Riqualificazione Energetica sede AAMS

DETTAGLI VETRATE



11. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Sala, M. (2001) Recupero edilizio e bioclimatica : strumenti, tecniche e casi studio, Centro Abita.
- [2]. Trevisi, A. S., et al. (2007), Efficienza energetica in edilizia: diagnosi energetiche, tecnologie ad alto rendimento, fonti rinnovabili, soluzioni efficienti, applicazioni pratiche ed esempi costi-benefici per la riduzione del consumo di energia degli edifici e degli impianti, Maggioli.
- [3]. ASHRAE (2003), Standard 93-2003: Methods of testing to determine the performance of solar collectors, ASHRAEE.
- [4]. Duffie, J. A. e Beckman, W. (2006), Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley-Interscience, terza ed.
- [5]. Fuller, S. K. e Petersen, S. R. (1996), Life-cycle costing manual for the Federal Energy Management Program, U.S. Department of Commerce.
- [6]. IEA (2009), «World Energy Outlook 2009», Rap. tecn., International Energy Agency, Reading (Massachusetts).
- [7]. Santamouris, M. e Asimacopoulos, D. (1996), Passive Cooling of Buildings, James & James.
- [8]. Santini, Elia e Fasano (2009), «Caratterizzazione dei consumi energetici nazionali delle strutture ad uso ufficio», Rap. tecn., ENEA.
- [9]. Schmidt, A. C., Clausen, A. U. e Postlethwaite, D. (2011), A Comparative Life Cycle Assessment of Building Insulation Products made of Stone Wool, Paper Wool and Flax.
- [10]. SPF (2004), «Online collector test reports on www.spf.ch», Rap. tecn., Institut für Solartechnik SPF.
- [11]. Verdiana, R. (2010), Sviluppo di una metodologia di analisi energetica a livello di insediamento residenziale, Tesi di laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Torino.
- [12]. AA. VV. (1997), TRNSYS: A Transient System Simulation Program. Solar Energy, Madison
- [13]. AA. VV. (1997), TRNSYS: A Transient System Simulation Program. Solar Energy, Madison.
- [14]. Winston, R., Welford, W. T., Miñano, J. C. e Benítez, P. (2005), Nonimaging optics, Elsevier Accademic Press.
- [15]. Moncada Lo Giudice, G. e Coppi, M. (1997), Benessere termico e qualità dell'aria interna, Masson.
- [16]. Spirandelli, B. (2003), L'efficienza energetica come parametro progettuale, Murature Oggi n.79/2003.
- [17]. Marino, F. P. e Grieco, M. (2007) La Certificazione energetica degli edifici DLGS 192/2005 e 311/2006. Algoritmi di calcolo ed esperienze internazionali. Edifici ad alta efficienza, EPC.

- [18]. Grosso, M., Peretti, G., Piardi, S. e Scudo, G. Progettazione ecocompatibile dell'architettura - Concetti e metodi, strumenti d'analisi e valutazione, esempi applicativi, Gruppo Editoriale Esselibri
- [19]. Sala, M. e Ceccherini, N. (2000) Schermature solari, Alinea.
- [20]. Sala, M. e Ceccherini, N. (1993) Tecnologie solari, Alinea.
- [21]. Colaianni, V. G. (2000) Impianti tecnici dell'edilizia, FrancoAngeli.
- [22]. Benedetti, C. (1994) Manuale di Architettura Bioclimatica, Maggioli Editore.
- [23]. CNR (1985) Guida al controllo energetico della progettazione.
- [24]. Lepore, M. (2004) Solare termico passivo, Aracne.
- [25]. Mottura, G. e Pennini, A. Progettare sistemi di protezione solare degli edifici, Maggioli Editore.
- [26]. Grosso, M. (1997) Il raffrescamento passivo degli edifici, Maggioli Editore
- [27]. De Carli, M., Scarpa, M., Villi, G. e Zecchin, R. (2006) La ventilazione naturale, Tecnica, CDA n. 11 dicembre 2006.
- [28]. Edwards, M. (1980) Sistemi solari passivi.
- [29]. Colombo, R., Landabaso, A. e Sevilla, A. (1995) Manuel de conception, architecture solaire passive pour la région méditerranéenne, Centre Commun de Recherche.
- [30]. Rogora, A. (2003) Architettura e bioclimatica: la rappresentazione dell'energia nel progetto, Sistemi editoriali.
- [31]. Boifava, G., Di Leone, P. e Gini, M. (1981) Impianti solari nell'edilizia: il problema teorico l'aspetto tecnico, l'applicazione pratica, Tecniche nuove.
- [32]. Paul, J.K. (1977) Solar heating and cooling : recent advances, Park Ridge : Noyes data corporation.
- [33]. Sartogo, F. e Bastiani, M. (1998) Manuale metodologico per il recupero della struttura bioclimatica della citta storica di Perugia, Guerra.
- [34]. Andreini, P., Soma, F. e Bastiani, M. (2010) Climatizzazione degli edifici : fabbisogno energetico, efficienza e certificazione : progettazione, riqualificazione, installazione, manutenzione ed esercizio del sistema edificio - impianto di riscaldamento secondo le nuove regole di efficienza energetica , Hoepli.
- [35]. Fabbri, K. (2009) Guida alla riqualificazione energetica, DEI.
- [36]. Goswami, Y. D., Kreith, F. e Kreider, J. F. (2000) Principles of solar engineering, Taylor & Francis.
- [37]. Eicker, U. (2009) Low Energy Cooling for Sustainable Buildings, John Wiley and Sons.
- [38]. Herold, K. E., Radermacher, R. e Klein, S. A. (1996) Absorption chillers and heat pumps, CRC Press.
- [39]. Grignaffini, S., Asdrubali, F (2005). Experimental evaluation of the performances of H₂O - LiBr absorption refrigerator under

- service condition. International Journal of Refrigeration (ISSN:0140-7007), 489- 497, 28, number 4
- [40]. Carvalho, MJ (2007), WP 4.5: SOLAR COOLING: Contribution to a future development of CTSS method applicable to solar assisted air conditioning systems (or solar cooling systems).
- [41]. Duffie,J. and W. Beckman, Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, 2006; ISBN 0471698679.
- [42]. Hans-Martin Henning (Ed.): Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings A Handbook for Planners. Springer Wien/NewYork. 2nd revised edition 2008; ISBN 3211730958.
- [43]. TRNSYS 16 –Transient system simulation environment. Standard Component Library. Overview, Volume 3.

Marco Romagna - Riqualificazione Energetica dell' Edificio sede della Direzione Generale della
Amministrazione Autonoma dei Monopoli di Stato (A.A.M.S). Tesi di Dottorato, © dicembre 2012.