

POLITECNICO DI MILANO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea in *Ingegneria dell'Automazione*



***IMPLEMENTAZIONE DI UN FOGLIO ELETTRONICO
PER LA DETERMINAZIONE DEL FABBISOGNO DI
ENERGIA TERMICA PER LA CLIMATIZZAZIONE
INVERNALE DEGLI EDIFICI E PER IL
DIMENSIONAMENTO DI UN IMPIANTO
COGENERATIVO***

Relatore: Chiar.mo Prof. Luca FERRARINI

Tesi di Laurea di:

Attilio AMATO

Matr. 766974

Anno Accademico 2011 - 2012

Indice Generale

<i>Introduzione</i>	1
<i>CAPITOLO I: Il fabbisogno di energia termica di un edificio: la UNI/TS 11300</i> ---	5
1.1 La complessa situazione italiana	5
1.2 Introduzione alla UNI/TS 11300	8
1.2.1 Terminologia e definizioni	11
1.2.2 Fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale: UNI/TS 11300-1 ----	14
1.2.2 Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale: UNI/TS 11300-2 ----	17
1.3 Metodo di calcolo della 11300	19
1.3.1 Parametri Dinamici: il fattore di utilizzazione degli apporti termici	21
1.3.2 Gli scambi termici	26
1.3.3 Gli apporti termici	37
1.3.4 Fabbisogno di energia primaria e rendimento dell'impianto	43

CAPITOLO II: Il foglio di calcolo implementato	54
2.1 Ipotesi semplificative	55
2.2 Dati d'ingresso	57
2.3 Descrizione del foglio di calcolo implementato	59
2.3.1 Anagrafica edificio	59
2.3.2 Involucro edificio	60
2.3.3 Utilizzo edificio	61
2.3.4 Scambi termici per trasmissione	62
2.3.5 Scambio termico per ventilazione	63
2.3.6 Extra flusso termico per radiazione infrarossa verso la volta celeste	64
2.3.7 Scambio termico mensile	65
2.3.8 Flusso termico prodotto da sorgenti interne	66
2.3.9 Flusso termico di origine solare	66
2.3.10 Parametri dinamici	67
2.3.11 Fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale	68
2.3.12 Sottosistema di Emissione	69
2.3.13 Sottosistema di regolazione e di distribuzione	70
2.3.14 Sottosistema di generazione	71
2.4 Analisi sensitività	71
2.4.1 Volume lordo riscaldato	75
2.4.2 Superficie involucro disperdente	75
2.4.3 Superficie netta calpestabile climatizzata	78
2.4.4 Ripartizione pareti opache trasparenti	79
2.4.5 Orientamento pareti	80
2.4.6 Destinazione d'uso prevalente	81
2.4.7 Apporti interni	83
2.4.8 Indice di affollamento	84
2.4.9 Portata d'aria esterna	85
2.4.10 Trasmittanza pareti Opache e Trasparenti	86
2.4.11 Capacità termica interna	87
2.4.12 Rendimento sottosistema di emissione, regolazione, distribuzione, generazione	87
2.4.13 Ore e giorni di funzionamento	89

2.4.14 Interazione tra parametri -----	92
2.4.15 Confronto tra parametri -----	95
2.5 Validazione del foglio di calcolo su altri edifici -----	98
<i>CAPITOLO III: Caso di Studio: I Campus Bovisa -----</i>	102
3.1 Descrizione caso di studio -----	102
3.2 Raccolta dati -----	104
3.2.1 Superficie Utile Calpestabile Climatizzata e Volume Lordo Riscaldato -----	104
3.2.2 Superficie involucro disperdente e orientamento pareti -----	106
3.2.3 Percentuale di parete trasparente su parete totale: dimensionamento della finestra significativa dell'edificio -----	106
3.2.4 Destinazione d'uso prevalente -----	107
3.2.5 Trasmittanza pareti opache e trasparenti -----	110
3.3 Presentazione dei risultati -----	111
3.4 Validazione attraverso Termolog -----	116
3.5 Confronto con consumi reali -----	118
3.5.1 Calcolo dei consumi mensili, giornalieri e orari a partire dal valore totale -----	120
3.5.2 Durata effettiva del periodo di riscaldamento -----	122
3.5.3 Confronto -----	127
<i>CAPITOLO IV: Dimensionamento di un impianto cogenerativo -----</i>	131
4.1 Introduzione alla cogenerazione -----	131
4.1.1 La direttiva italiana -----	138
4.1.2 Vantaggi e limiti della cogenerazione -----	139
4.2 Soluzioni disponibili -----	143
4.2.1 Tecnologie tradizionali -----	143
4.2.2 Tecnologie innovative -----	150

4.3 Algoritmo per il dimensionamento e la scelta della modalità di funzionamento di un impianto cogenerativo	157
4.3.1 Funzione obiettivo	163
4.3.2 Vincoli	167
4.3.3 Ricerca dell'ottimo	168
4.4 Esempio applicativo: Campus Bovisa	169
<i>CAPITOLO V: Conclusioni</i>	188
5.1 Sviluppi futuri	190
<i>APPENDICE A: Metodo alternativo per il calcolo approssimativo del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale di un edificio</i>	192
<i>Bibliografia</i>	196

Indice delle figure

<i>Figura 1: Diagramma di flusso della procedura di calcolo e collegamenti con altre norme</i>	15
<i>Figura 2: Capacità termica interna per unità di superficie dell'involucro di tutti gli ambienti climatizzati $[KJ]/(m^2K)$</i> ;	24
<i>Figura 3: Illustrazione del fattore di utilizzazione degli apporti per la modalità di riscaldamento</i> .	25
<i>Figura 4: Esempio di classificazione delle superfici opache di un edificio</i>	29
<i>Figura 5: Maggiorazioni percentuali relative alla presenza dei ponti termici [%]</i>	30
<i>Figura 6: Trasmittanza termica di finestre con percentuale dell'area di telaio pari al 20 % dell'area dell'intera finestra</i>	31
<i>Figura 7: Trasmittanza termica di vetrate verticali triple riempite con diversi gas $[Wm^2K]$</i>	32
<i>Figura 8: Fattore di correzione $b_{tr, g}$</i>	33
<i>Figura 9: Trasmittanza termica dei solai a terra $[w/(m^2K)]$</i> ;	34
<i>Figura 10: Fattore di correzione $b_{tr, x}$</i>	34
<i>Figura 11: Dati convenzionali relativi all'utenza</i>	39
<i>Figura 12: Angolo dell'orizzonte ombreggiato da un'ostruzione esterna</i>	41
<i>Figura 13: Oggetto orizzontale: a) sezione verticale, b) sezione orizzontale</i>	41
<i>Figura 14: Trasmittanza di energia solare totale $g_{gl, n}$ di alcuni tipi di vetro</i>	43
<i>Figura 15: Rendimento di emissione η_e in locali di altezza minore di 4 m</i>	46
<i>Figura 16: Rendimento η_{rg} di regolazione</i>	48

<i>Figura 17: Rendimento η_g di distribuzione.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 18: Generatori di calore a gas o gasolio, bruciatore ad aria soffiata o premiscelati, modulanti, classificati ** (2 stelle)</i>	<i>50</i>
<i>Figura 19: Fabbisogni elettrici dei terminali di erogazione del calore</i>	<i>52</i>
<i>Figura 20: Parametri per il calcolo della potenza degli ausiliari</i>	<i>53</i>
<i>Figura 21: Vista del file Excel – Anagrafica edificio</i>	<i>59</i>
<i>Figura 22: Vista del file Excel – dati relativi a involucro edificio</i>	<i>60</i>
<i>Figura 23: Vista del file Excel – utilizzo edificio</i>	<i>61</i>
<i>Figura 24: Vista del foglio Excel – scambi termici per trasmissione, parte A</i>	<i>62</i>
<i>Figura 25: Vista del foglio Excel – scambi termici per trasmissione, parte B</i>	<i>62</i>
<i>Figura 26: Vista del foglio Excel – scambi termici per ventilazione.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 27: Vista del foglio Excel – Extra flusso termico per radiazione infrarossa</i>	<i>64</i>
<i>Figura 28: Vista del foglio Excel – Scambio termico mensile</i>	<i>65</i>
<i>Figura 29: Vista del foglio Excel – flusso termico prodotto da sorgenti interne.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 30: Vista del foglio Excel – flusso termico di origine solare</i>	<i>67</i>
<i>Figura 31: Vista del foglio Excel – parametri dinamici</i>	<i>68</i>
<i>Figura 32: Vista del foglio Excel – fabbisogno di energia termica per il riscaldamento</i>	<i>69</i>
<i>Figura 33: Vista del foglio Excel – rendimento del sottosistema di emissione</i>	<i>69</i>
<i>Figura 34: Vista del foglio Excel – rendimento del sottosistema di regolazione e di distribuzione .</i>	<i>70</i>
<i>Figura 35: Vista del foglio Excel – rendimento del sottosistema di generazione.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 36: Interfaccia per l’analisi di sensitività.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 37: Analisi di sensitività – volume lordo riscaldato</i>	<i>76</i>
<i>Figura 38: Analisi di sensitività – superficie involucro disperdente.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 39: Dettaglio dell’analisi di sensitività relativa alle variazioni della superficie dell’involucro disperdente.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 40: Analisi di sensitività – superficie netta calpestabile climatizzata.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 41: Analisi di sensitività – ripartizione superficie opaca/trasparente</i>	<i>80</i>
<i>Figura 42: Analisi di sensitività – variazione orientamento pareti.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 43: Analisi di sensitività – variazione destinazione d’uso prevalente.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 44: Analisi di sensitività – apporti medi globali interni.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 45: Analisi di sensitività – indice di affollamento</i>	<i>84</i>
<i>Figura 46: Analisi di sensitività – portata d’aria esterna.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 47: Analisi di sensitività – trasmittanza pareti opache.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 48: Analisi di sensitività – trasmittanza pareti trasparenti.....</i>	<i>87</i>

<i>Figura 49: Analisi di sensitività – capacità termica interna</i>	88
<i>Figura 50: Analisi di sensitività – rendimento totale dell’impianto</i>	89
<i>Figura 51: Durata della stagione di riscaldamento in funzione della zona climatica</i>	90
<i>Figura 52: Analisi di sensitività – ore di funzionamento impianto</i>	91
<i>Figura 53: Analisi di sensitività – giorni di funzionamento impianto</i>	91
<i>Figura 54: Pannello di controllo per l’implementazione dei quattro esempi</i>	94
<i>Figura 55: Confronto tra i fabbisogni ottenuti nei quattro esempi</i>	94
<i>Figura 56: Incidenza dei parametri nei quattro casi, trascurando le interazioni</i>	95
<i>Figura 57: Influenza sulla variabile errore dovuta alla variazione del 2% di ciascun parametro</i>	96
<i>Figura 58: Pianta di un edificio per la validazione del file Excel</i>	100
<i>Figura 59: Confronto tra il fabbisogno da certificazione e il fabbisogno ottenuto per messo del foglio elettronico implementato</i>	101
<i>Figura 60: Gli edifici del Campus di Via Durando</i>	103
<i>Figura 61: Gli edifici del Campus di Via La Masa</i>	103
<i>Figura 62: Dati relativi ai due Campus</i>	105
<i>Figura 63: Dati relativi alla superficie dell’involucro disperdente del campus Durando</i>	108
<i>Figura 64: Dati relativi alla superficie dell’involucro disperdente del campus La Masa</i>	109
<i>Figura 65: Struttura delle superfici opache degli edifici considerati</i>	110
<i>Figura 66: Trasmittanze relative a pareti opache e trasparenti nei due Campus</i>	112
<i>Figura 67: Scambi termici mensili dei due Campus</i>	113
<i>Figura 68: Apporti termici mensili dei due Campus</i>	114
<i>Figura 69: Rendimenti dei quattro sottosistemi e fabbisogno di energia primaria per ciascun edificio dei Campus di Bovisa</i>	115
<i>Figura 70: illustrazione del fattore di riduzione per riscaldamento intermittente</i>	124
<i>Figura 71: Vista del foglio Excel – correzione per intermittenza</i>	126
<i>Figura 72: Vista del foglio Excel – correzione per periodo di non occupazione</i>	126
<i>Figura 73: Confronto tra consumi reali e: a) fabbisogno ottenuto da 11300; b) fabbisogno con correzione proporzionale alle ore di effettivo utilizzo; c) fabbisogno con fattori di correzione previsti da UNI 13790; d) metodo di calcolo alternativo</i>	128
<i>Figura 74: a) Impianto motore a ciclo semplice; b) Impianto motore cogenerativo</i>	133
<i>Figura 75: Confronto tra produzione separata di energia elettrica e termica (SHP) e cogenerazione (CHP) – Le grandezza sono espresse in termini di “unità” di energia primaria</i>	136

<i>Figura 76: Impianto cogenerativo basato su un motore a combustione interna a servizio di una utenza con possibilità di cessione alla rete di energia elettrica e caldaia per carico termico di punta.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 77: Schema elementare di impianto a vapore con surriscaldamento</i>	<i>144</i>
<i>Figura 78: a) Schema di impianto a vapore a contropressione; b) Schema di impianto a vapore di spillamento.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 79: a) Schema di impianto turbogas in ciclo semplice; b) Schema di impianto turbogas cogenerativo.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 80: Schema di impianto a ciclo combinato gas-vapore</i>	<i>148</i>
<i>Figura 81: a) Diagramma pressione-velocità del ciclo teorico Sabathè; b) Le quattro fasi di un motore a ciclo Otto.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 82: a) Ciclo Brayton-Joule rigenerato; b) Microturbina a gas con rigeneratore</i>	<i>151</i>
<i>Figura 83: a) Schema concettuale delle fasi di lavoro di un motore Stirling; b) Diagramma sul piano temperatura-entropia del ciclo Stirling ideale.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 84: Principio di funzionamento di una cella a combustibile di tipo PEM.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 85: Schema di principio di un impianto di cogenerazione</i>	<i>157</i>
<i>Figura 86: Bilancio economico del funzionamento di una caldaia.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 87: Stima del costo di manutenzione di un impianto cogenerativo in funzione della taglia dello stesso</i>	<i>162</i>
<i>Figura 88: Calcolo del margine lordo operativo relativo al funzionamento termico comanda del Caso II.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 89: Interfaccia del Risolutore di Excel</i>	<i>169</i>
<i>Figura 90: Carichi di energia termica ed elettrica dei due Campus di Bovisa</i>	<i>170</i>
<i>Figura 91: Campi di applicazione delle differenti tecnologie di cogenerazione.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 92: Margine operativo lordo mensile del Campus Durando nelle tre diverse modalità di funzionamento dell'impianto</i>	<i>173</i>
<i>Figura 93: Margine operativo lordo mensile del Campus Durando nelle tre diverse modalità di funzionamento dell'impianto</i>	<i>174</i>
<i>Figura 94: Scelta della modalità di funzionamento ottimale.....</i>	<i>175</i>
<i>Figura 95: Costo di produzione netto del KWhe in funzione della percentuale di dissipazione del calore</i>	<i>177</i>
<i>Figura 96: Potenza termica cumulata per i Campus di Durando e La Masa</i>	<i>178</i>
<i>Figura 97: Potenza elettrica cumulata per i Campus di Durando e La Masa</i>	<i>178</i>

<i>Figura 98: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Ottobre, per il Campus La Masa</i>	<i>179</i>
<i>Figura 99: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Novembre, per il Campus La Masa</i>	<i>180</i>
<i>Figura 100: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Dicembre, per il Campus La Masa</i>	<i>180</i>
<i>Figura 101: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Gennaio, per il Campus La Masa</i>	<i>181</i>
<i>Figura 102: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Febbraio, per il Campus La Masa.....</i>	<i>181</i>
<i>Figura 103: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Marzo, per il Campus La Masa</i>	<i>182</i>
<i>Figura 104: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Aprile, per il Campus La Masa</i>	<i>182</i>
<i>Figura 105: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad ottobre, per il Campus La Masa</i>	<i>183</i>
<i>Figura 106: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad novembre, per il Campus La Masa</i>	<i>184</i>
<i>Figura 107: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad dicembre, per il Campus La Masa</i>	<i>184</i>
<i>Figura 108: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad gennaio, per il Campus La Masa</i>	<i>185</i>
<i>Figura 109: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad febbraio, per il Campus La Masa.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 110: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad marzo, per il Campus La Masa</i>	<i>186</i>
<i>Figura 111: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad aprile, per il Campus La Masa.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura 112: Cd_limite in funzione di S/V e GG</i>	<i>194</i>
<i>Figura 113: Vista del foglio Excel – Calcolo del fabbisogno come metodo alternativo</i>	<i>195</i>

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1: Metodologia di certificazione energetica adottata a livello regionale</i>	<i>7</i>
<i>Tabella 2: Tipologie di valutazioni previste dalla UNI/TS 11300.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabella 3: Parametri per la validazione del file di calcolo su altri edifici.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabella 4: Destinazioni d'uso prevalente considerate</i>	<i>107</i>
<i>Tabella 5: Confronto tra foglio di calcolo implementato e Termolog su Edificio 10 del Campus di via Durando.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabella 6: Errore ottenibile attraverso la ripartizione dei consumi rispetto al volume lordo riscaldato.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabella 7: Validazione del metodo di ripartizione secondo GG</i>	<i>121</i>
<i>Tabella 8: Esempi di modalità di funzionamento dell'impianto di cogenerazione</i>	<i>164</i>
<i>Tabella 9: Margine operativo lordo nei casi II e III</i>	<i>166</i>
<i>Tabella 10: Fabbisogno di Energia termica ed elettrica totale dei due Campus</i>	<i>172</i>
<i>Tabella 11: Confronto tra rapporti E/Q</i>	<i>176</i>
<i>Tabella 12: Indice PES relativi alle soluzioni implementate.....</i>	<i>176</i>

Introduzione

Al giorno d'oggi, quando si compra un'autovettura o un elettrodomestico, oltre al prezzo di acquisto, si tengono enormemente in considerazione i consumi che da esso derivano: molto spesso infatti, è proprio quest'ultimo aspetto a diventare così significativo da far passare l'investimento iniziale in secondo piano. In analogia a quanto accade con questi accessori, è sempre più frequente accostare questi stessi ragionamenti ad interi edifici. È in questo ambito che, con il decreto legislativo n.192 del 19 agosto 2005 – e con tutta una serie di decreti successivi –, viene data attuazione alla direttiva comunitaria relativa al *rendimento energetico nell'edilizia*.

Scopo della “normativa sull'efficienza energetica” è di stabilire i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di:

- favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica;
- contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto;
- promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico.

Ruolo di primaria importanza, per il conseguimento degli scopi che si prefigge tale normativa, è stato riconosciuto proprio alla cd. "certificazione energetica": non solo come strumento di controllo *ex post* del rispetto, in fase di realizzazione degli edifici, delle prescrizioni volte a migliorarne le prestazioni energetiche, ma soprattutto come strumento di informazione del proprietario e/o dell'acquirente. Il legislatore, infatti, ha ritenuto che una preventiva ed esauriente conoscenza dei dati relativi all'efficienza energetica dell'edificio, nonché dei suggerimenti in merito agli interventi più significativi ed economicamente convenienti per il miglioramento della prestazione energetica, costituisca presupposto imprescindibile per ottenere un costante e graduale aumento delle performance energetiche anche degli edifici già esistenti – come incentivo, sia per gli attuali proprietari, a migliorare tali prestazioni per rendere l'immobile più appetibile sul mercato, sia per gli acquirenti, ad orientare gli investimenti sul bene acquistato in via prioritaria proprio verso quegli interventi che possano consentire il contenimento dei consumi energetici.

La “normativa sull'efficienza energetica” in vigore a livello nazionale – ad eccezione di alcuni casi isolati – a cui si faceva riferimento precedentemente è la UNI/TS 11300. Tale normativa è stata utilizzata, nell'ambito del presente lavoro di tesi, per l'implementazione di un foglio elettronico che permettesse un calcolo approssimativo del fabbisogno di energia termica degli edifici per la climatizzazione invernale, a partire da un numero contenuto di dati d'ingresso. Per conseguire quanto espresso, basandosi sul metodo di calcolo descritto dalla suddetta specifica tecnica, sono state introdotte una serie di ipotesi semplificative, adeguatamente giustificate e successivamente validate, volte all'ottenimento di una procedura più *snella* di quanto prescritto dalla norma stessa: tale requisito si è dimostrato fondamentale nell'ottica di eseguire una prima certificazione energetica su una gran quantità di edifici, di cui molti parametri richiesti dal metodo di calcolo originale non sono noti a priori e, il cui ottenimento tramite misurazioni sul campo, avrebbe comportato una

spesa, in termini di tempo e di energie, decisamente non trascurabile. Il programma così realizzato è stato quindi utilizzato per il calcolo del fabbisogno di energia termica per il caso di studio costituito dai due Campus in Bovisa del Politecnico di Milano.

Successivamente, in riferimento al medesimo caso di studio, è stato sviluppato un ulteriore foglio di calcolo per il dimensionamento di un impianto cogenerativo in sostituzione di parte delle centrali termiche attualmente in uso.

Più nel dettaglio, nel primo capitolo, dopo una presentazione generale della situazione italiana in ambito di certificazione energetica, viene descritta dapprima la logica su cui si basa il metodo di calcolo della UNI/TS 11300 e quindi, le equazioni che permettono la scrittura di quello che sarà poi definito un bilancio quasi stazionario di energia. In quest'ultima parte vengono già esposte alcune delle approssimazioni adottate per il calcolo del fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale.

Nel secondo capitolo, viene analizzato il foglio elettronico implementato. Partendo dalla spiegazione dettagliata delle ipotesi semplificative non ancora specificate precedentemente, vengono definiti i dati d'ingresso strettamente necessari per il calcolo "snello". Relativamente a questi due aspetti, viene eseguita l'analisi di sensitività volta sia a dimostrare la correttezza delle approssimazioni eseguite, sia a fornire un'indicazione sull'accuratezza con cui devono essere procurati i parametri fondamentali. Si procede dunque con la presentazione delle celle più significative che compongono il file Excel e si esegue una prima validazione di quanto realizzato su una serie di edifici di cui si dispone la relativa certificazione energetica ufficiale.

Nel terzo capitolo viene presentato il caso di studio. Dopo una brevissima descrizione degli edifici che compongono i due Campus di Bovisa, viene esplicitata la metodologia adottata per il reperimento dei dati d'ingresso. I risultati forniti dal foglio elettronico, relativi ad uno degli edifici che

costituiscono il complesso di Durando, vengono confrontati poi con il fabbisogno dello stesso edificio ottenuto attraverso l'utilizzo di un programma certificato per la fornitura di attestati energetici e facente sempre riferimento alla UNI/TS 11300. Infine, si procede con un'ultima validazione di quanto fatto, per mezzo del confronto con i dati di consumo di metano reali. Per poter fare ciò, sarà necessario apportare delle modifiche a quanto realizzato distaccandosi così – in maniera coscienziosa – dalla suddetta specifica tecnica.

Infine, nel quarto capitolo, viene affrontato il tema della cogenerazione. Dapprima viene fatta un'introduzione, di carattere generale, alla generazione distribuita e quindi alla cogenerazione, dando una certa rilevanza alle soluzioni impiantistiche disponibili – tradizionali e non. Nella seconda parte, viene sviluppato un nuovo foglio elettronico che si vuole interfacciare con due specifiche tematiche: il dimensionamento dell'impianto di cogenerazione e la scelta della modalità di funzionamento ottimale dello stesso. Per concorrere a tali obiettivi, viene implementata una funzione di costo, ottimizzata attraverso il risolutore messo a disposizione dallo stesso Microsoft Excel, basato sul metodo del Simplex. Infine, lo strumento realizzato viene utilizzato per il dimensionamento di due impianti in grado di soddisfare buona parte dei fabbisogni energetici, termici ed elettrici, dei due campus oggetto di studio.

CAPITOLO I

Il fabbisogno di energia termica di un edificio: la UNI/TS 11300

1.1 La complessa situazione italiana

Il DLgs. 192/05, "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia", come enunciato nell'Articolo 1, "stabilisce i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico".

Necessario per la stesura di questa tesi è l'Articolo 17, clausola di cedevolezza: "In relazione a quanto disposto dall'articolo 117, quinto comma, della Costituzione, e fatto salvo quanto previsto dall'articolo 16, comma 3, della legge 4 febbraio 2005, n. 11, per le norme afferenti a materie di competenza esclusiva delle regioni e province autonome, le norme del presente decreto e dei decreti ministeriali applicativi nelle materie di legislazione concorrente si applicano per le regioni e province autonome che non abbiano ancora provveduto al recepimento della direttiva 2002/91/CE fino alla data di entrata in vigore della normativa di

attuazione adottata da ciascuna regione e provincia autonoma. Nel dettare la normativa di attuazione le regioni e le province autonome sono tenute al rispetto dei vincoli derivanti dall'ordinamento comunitario e dei principi fondamentali desumibili dal presente decreto e dalla stessa direttiva 2002/91/CE.”

Obiettivo dell'articolo è di riconoscere alle regioni il potere di dettare norme diverse da quelle nazionali rispettando le linee guida di questo decreto.

Questa possibilità è stata in alcuni casi male interpretata, portando alcune regioni a modificare i sistemi di calcolo e di classificazione, estendendo di fatto il loro potere anche sulla normativa tecnica.

L'ultimo comma dell'art. 18 del DLgs 115/2008, così come il comma 5 dell'art.3 del D.M. 26.06.2009 – linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici – invitano le Regioni che hanno già legiferato in materia ad adeguarsi alle metodologie ed ai requisiti essenziali dettati dalle norme nazionali.

A tal proposito, la tabella 1 riportata il modello di attestato, l'albo, il metodo e il software di calcolo che ogni regione o provincia autonoma hanno utilizzato per l'applicazione della normativa. Si possono distinguere quindi tre gruppi, in base ai diversi comportamenti adottati.

Gruppo verde

La tabella elenca, in ordine alfabetico, le regioni più virtuose. La certificazione energetica degli edifici è una prestazione professionale. Le competenze professionali specifiche sono già definite, in primis, dalla direttiva che prevede “esperti indipendenti”, in generale, dalla legislazione vigente ed in particolare dall'allegato III al DLgs. 40 maggio 2008 n. 115, che riconosce la competenza al “tecnico abilitato”, come ivi definito. Si tratta di requisiti oggettivi, che non richiedono un particolare albo professionale in aggiunta a quelli già esistenti.

LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA NELLE REGIONI ITALIANE				
REGIONE	MODELLO DI ATTESTATO	METODO DI CALCOLO	ALBO	SOFTWARE DI CALCOLO
Abruzzo	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Basilicata	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Calabria	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Campania	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Lazio	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Marche	Nazionale	UNI TS 11300	Abrogato	Certificato da CTI
Molise	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Puglia	Nazionale	UNI TS 11300	Abrogato	Certificato da CTI
Sardegna	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Sicilia	Nazionale	UNI TS 11300	SI	Certificato da CTI
Toscana	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Umbria	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Veneto	Nazionale	UNI TS 11300	No	Certificato da CTI
Emilia Romagna	Modello regionale con classi fisse Compilazione sistema informatico SACE	UNI TS 11300	SI	Certificato da CTI
Friuli Venezia Giulia	Nazionale (fino all'entrata in vigore del protocollo VEA)	UNI TS 11300	Abrogato	Certificato da CTI
Piemonte	Modello regionale a classi e ubicazione fisse Compilazione sistema informatico SICEE	UNI TS 11300	SI	Certificato da CTI
Trento (provincia)	Modello provinciale a classi e ubicazione fisse Compilazione portale informatico Odotech Nazionale solo per compravendite	UNI TS 11300	SI	Certificato da CTI
Liguria	Modello regionale con classi variabili (in funzione di EP _{lim2010})	UNI TS 11300 con integr. (All. G Reg. n. 1 - 22/01/09)	SI	CELESTE Altro software
Lombardia	Modello regionale a classi fisse	Regionale (Decr. 5796/09)	SI	CENED +
Bolzano (provincia)	Secondo standard Casaclima. Per compravendite è possibile utilizzare il modello nazionale	UNI TS 11300 Casaclima	SI	Certificato da CTI e Casaclima
Valle d'Aosta	Nazionale. Dal 20.07.2011 adotterà il sistema regionale "BEAUCLIMAT"	D.G.R. n. 3629/10	SI	Software BEAUCLIMAT (non ancora disponibile) Altro software

Tabella 1: Metodologia di certificazione energetica adottata a livello regionale

Quanto alle modalità di certificazione e di classificazione degli edifici, queste regioni si sono riferite alle linee guida nazionali fornite dal D.M. 26 giugno 2009 ed hanno adottato il metodo di calcolo prescritto dalla normativa nazionale: le specifiche tecniche UNI 11300. I relativi calcoli possono essere eseguiti con programmi di calcolo già in possesso dei professionisti, validati da CTI secondo le vigenti disposizioni di legge.

Le certificazioni ottenute con le modalità di cui sopra e le relative classi energetiche sono tutte perfettamente confrontabili tra loro.

Gruppo giallo

La tabella elenca, in ordine alfabetico, le regioni che solo parzialmente sono in linea con la normativa nazionale: così come per il gruppo verde,

queste regioni utilizzano il metodo di calcolo previsto dalle UNI/TS 11300 e i software di calcolo certificati dal Comitato Termotecnico Italiano – CTI. A differenza del primo gruppo, però, è necessaria l'iscrizione a un albo, e varia la modalità dell'attestato, che cambia per ogni singolo caso. In generale, queste regioni hanno un proprio modello di certificazione energetica, che prevede classificazioni diverse da quella nazionale e che è ottenuto tramite un passaggio dei dati attraverso il sistema informatico regionale.

Gruppo rosso

L'elenco comprende una provincia autonoma e le regioni che hanno interpretato in modo diverso la normativa già a disposizione delle istituzioni.

Ciascuna delle tre regioni utilizza un diverso software di calcolo, eccetto per la provincia di Bolzano, che usa software certificati da CTI; i modelli di attestato sono ad appannaggio delle singole amministrazioni pubbliche; infine, Liguria e Bolzano utilizzano metodi di calcolo previsti dalle UNI/TS 11300, seppur con qualche lieve modifica, mentre Lombardia e Valle d'Aosta, per diversi motivi, hanno adottato sistemi nuovi.

1.2 Introduzione alla UNI/TS 11300

La determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici, ovvero della quantità annua di energia primaria effettivamente consumata o che si prevede possa essere consumata per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio, richiede metodi di calcolo per:

- 1) il fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento ambiente;
- 2) il fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria;

- 3) il rendimento e il fabbisogno di energia primaria degli impianti di climatizzazione invernale;
- 4) il rendimento e il fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria;
- 5) il risparmio di energia primaria ottenibile utilizzando energie rinnovabili ed altri metodi di generazione per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria;
- 6) il rendimento e il fabbisogno di energie primaria degli impianti di climatizzazione estiva.

I suddetti metodi di calcolo sono descritti nelle seguenti specifiche tecniche – TS:

UNI/TS 11300-1 Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;

UNI/TS 11300-2 Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei riscaldamenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria;

UNI/TS 11300-3 Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva;

UNI/TS 11300-4 Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria.

Nel presente lavoro di tesi verranno trattati solamente i punti 1) e 3), facendo dunque riferimento solamente alle prime due parti della specifica tecnica presa in esame.

In generale, è previsto l'applicazione delle UNI/TS 11300 per tre differenti modalità di valutazione delle prestazioni energetiche dei sistemi edificio/impianto, come riassunto nella tabella 2.

La valutazione di progetto – A1 – è effettuata dal progettista, che deve verificare, prima della costruzione dell'edificio, che le caratteristiche dello

stesso siano conformi, in condizioni convenzionali, alle prescrizioni di legge oltre che ai requisiti commissionati dal mandatario.

TIPO DI VALUTAZIONE		DATI DI INGRESSO			SCOPO DELLA VALUTAZIONE
		USO	CLIMA	EDIFICIO	
A1	di Progetto	Standard	Standard	Progetto	Permesso di costruire; Certificazione o Qualificazione energetica del progetto.
A2	Standard	Standard	Standard	Reale	Certificazione o Qualificazione energetica.
A3	Adattata all'utenza	In funzione dello scopo		Reale	Ottimizzazione, Validazione, Diagnosi e programmazione di interventi di riqualificazione.

Tabella 2: *Tipologie di valutazioni previste dalla UNI/TS 11300*

La valutazione standard – A2 – viene effettuata sulla base dei dati relativi all'edificio e all'impianto reali; per le modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio e dell'impianto si assumono valori convenzionali di riferimento. La valutazione standard corrisponde esattamente a quella di progetto se l'edificio è costruito esattamente come progettato ed è quella utilizzata per la certificazione energetica.

La valutazione adattata all'utenza – A3 –, utilizzabile essenzialmente per la diagnosi energetica e per individuare ragioni di eventuali anomalie di consumo, è effettuata nelle condizioni effettive di utilizzo: per le modalità di occupazione e di uso dell'edificio e dell'impianto si assumono infatti i valori reali di funzionamento.

1.2.1 Terminologia e definizioni

Col fine di evitare ambiguità nell'interpretazione del lessico utilizzato nella TS, viene presentato un elenco dei principali termini, e delle relative definizioni, utilizzati nei paragrafi successivi:

- **ambiente climatizzato:** vano o spazio chiuso che, ai fini del calcolo, è considerato riscaldato ad una determinata temperatura di regolazione;
- **apporti termici:** calore generato all'interno dell'ambiente climatizzato, o che vi entra, proveniente da sorgenti di calore diverse dall'energia utilizzata intenzionalmente per il riscaldamento;
- **apporti termici interni:** calore generato all'interno dell'edificio dagli occupanti e dalle apparecchiature non intenzionalmente utilizzate per il riscaldamento;
- **apporti termici solari:** calore fornito dalla radiazione solare entrante nell'edificio, direttamente o indirettamente – a seguito all'assorbimento dei componenti edilizi –, attraverso le finestre, le pareti opache e le coperture;
- **area climatizzata:** area del pavimento degli ambienti climatizzati, comprendente l'area di tutti i piani se più di uno, esclusi piani interrati o altri ambienti non abitati;
- **coefficiente di scambio termico:** flusso termico diviso per la differenza di temperatura tra due ambienti; specificamente utilizzato come coefficiente di scambio termico per trasmissione e per ventilazione;
- **coefficiente di scambio termico per trasmissione:** flusso termico dovuto alla trasmissione termica attraverso la struttura di un edificio, diviso per la differenza tra le temperatura degli ambienti su ciascun lato della costruzione;

- **coefficiente di scambio termico per ventilazione:** flusso termico dovuto all'ingresso dell'aria in un ambiente chiuso, per infiltrazione o per ventilazione, diviso per la differenza tra la temperatura dell'aria interna e la temperatura dell'aria immessa;
- **edificio:** sistema costituito dalle strutture edilizie esterne che delimitano uno spazio di volume definito, dalle strutture interne che ripartiscono detto volume e da tutti gli impianti e dispositivi tecnologici che si trovano stabilmente al suo interno;
- **fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale:** è la quantità annua di energia primaria effettivamente consumata, o che si prevede possa essere necessaria, per la climatizzazione invernale in condizioni climatiche e di uso standard dell'edificio;
- **fabbisogno di energia termica utile:** quantità di calore che deve essere fornita – o sottratta – ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo;
- **fabbisogno ideale di energia termica utile:** fabbisogno di energia termica riferito a condizioni di temperatura dell'aria uniforme in tutto l'ambiente climatizzato;
- **fattore di utilizzazione degli apporti:** fattore di riduzione degli apporti termici mensili nel metodo di calcolo previsto dalla uni/ts 11300, introdotto per ricavare la conseguente riduzione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per il riscaldamento;
- **generatore di calore:** apparecchio nel quale si attua la conversione dell'energia chimica del combustibile in energia termica utile trasferita al fluido termovettore;
- **irradiazione solare:** energia solare incidente su una superficie, per are di superficie;

- **perdite di energia termica non recuperabile:** parte delle perdite che vanno ad aumentare il fabbisogno di energia termica;
- **perdite di energia termica recuperabili:** parte delle perdite che possono essere utilizzate per diminuire il fabbisogno di energia termica;
- **perdite di energia termica recuperate:** parte delle perdite recuperabili effettivamente utilizzate per diminuire il fabbisogno di energia termica;
- **perdite di distribuzione:** perdite di energia termica della rete di distribuzione;
- **perdite di emissione:** perdite di energia termica che aumentano il fabbisogno delle unità terminali dovute a non omogenea distribuzione della temperatura dell'aria negli ambienti od a flussi di calore diretti verso l'esterno;
- **perdite di produzione:** perdite di energia termica del sottosistema di produzione – generazione;
- **perdite di regolazione:** perdite di energia termica dovute alla regolazione imperfetta della temperatura degli ambienti riscaldati;
- **pompa di calore:** dispositivo o impianto che sottrae calore dall'ambiente esterno o da una sorgente di calore a bassa temperatura e lo trasferisce all'ambiente a temperatura controllata;
- **rendimento globale medio stagionale:** è il rapporto tra il fabbisogno di energia termica utile e il corrispondente fabbisogno di energia primaria durante la stagione di riscaldamento;
- **stagione di riscaldamento:** periodo dell'anno durante il quale vi è una richiesta significativa per il riscaldamento ambiente;
- **temperatura esterna:** temperatura dell'aria esterna – valori medi mensili;

- **temperatura interna:** media aritmetica della temperatura dell'aria e della temperatura media radiale al centro della zona considerata;
- **temperatura interna di regolazione:** temperatura interna fissata dal sistema di regolazione nella usuale modalità di riscaldamento;
- **zona termica:** parte dell'ambiente climatizzato mantenuto a temperatura uniforme attraverso lo stesso impianto di riscaldamento o ventilazione.

1.2.2 Fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale: UNI/TS 11300-1

La procedura di calcolo descritta nella UNI/TS 11300-1, fa riferimento ad un edificio che in generale può contenere al suo interno diverse zone termiche e differenti temperature di regolazione; invece, per quanto riguarda l'intervallo di calcolo, si fa sempre riferimento ai valori mensili delle diverse grandezze che entrano in gioco.

I principali dati di ingresso necessari per l'applicazione della presente norma sono:

- proprietà di trasmissione e ventilazione;
- apporti termici da sorgenti di calore interne all'edificio e proprietà solari;
- dati climatici;
- descrizione dell'edificio e dei componenti edilizi, impianti ed uso;
- requisiti di benessere quali temperature di regolazione e tassi di ventilazione;
- eventuali partizioni dell'edificio in differenti zone termiche per il calcolo.

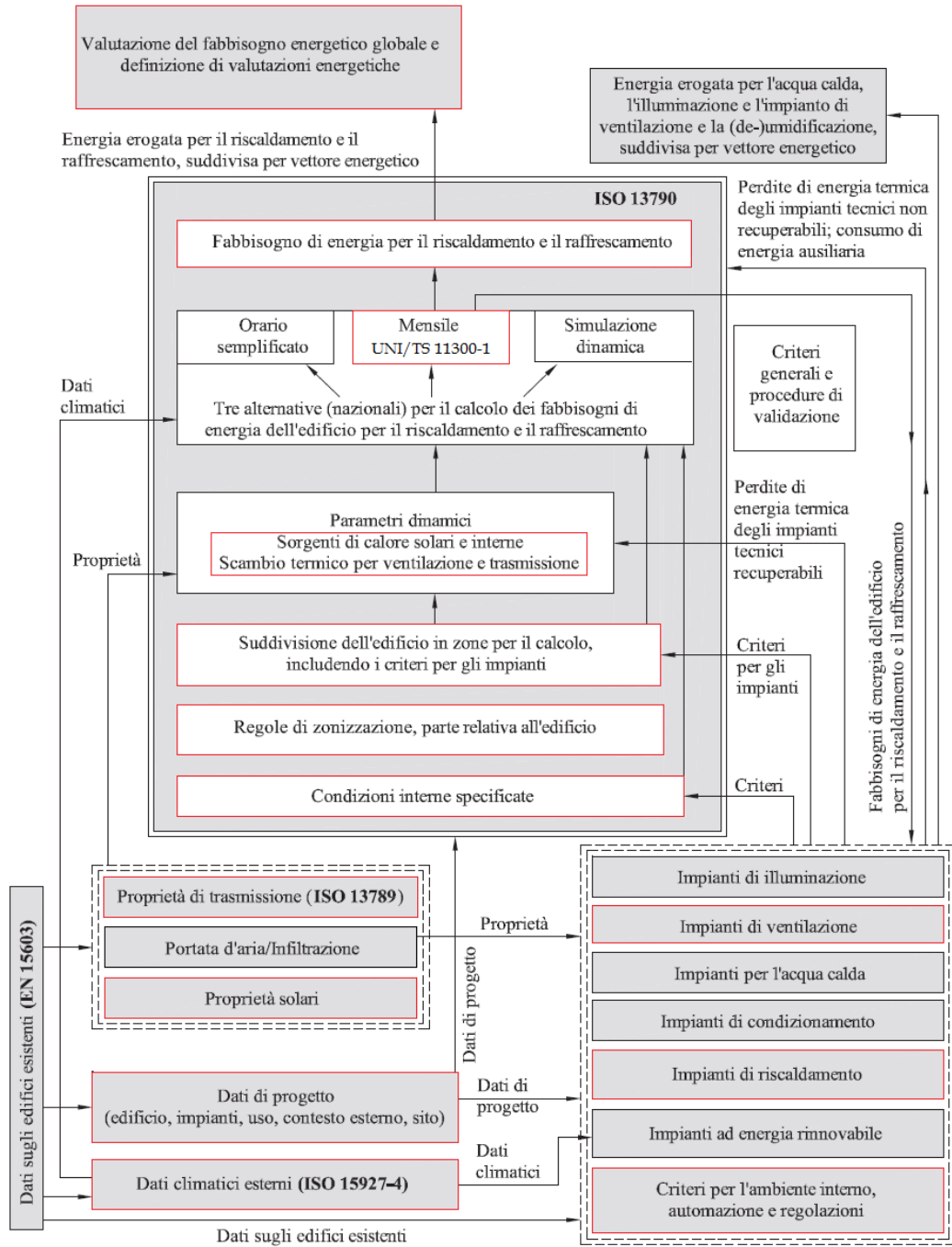


Figura 1: Diagramma di flusso della procedura di calcolo e collegamenti con altre norme

In figura 1 è rappresentato un diagramma di flusso della procedura di calcolo, sottolineando anche collegamenti con altre norme: sono

evidenziati, con un riquadro rosso, soltanto i passaggi che saranno tenuti in considerazione nel seguente elaborato.

In sintesi, la procedura di calcolo comprende i seguenti passi:

- definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non climatizzati dell'edificio;
- definizione dei confini delle diverse zone di calcolo, se richieste;
- definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno;
- calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni di energia termica per il riscaldamento;
- aggregazione dei risultati relativi ai diversi mesi ed alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

Il metodo di calcolo descritto nella normativa non è altro che un bilancio statico di energia termica, eseguito a livello di zona termica dell'edificio, e comprendente i seguenti termini:

- scambio termico per trasmissione tra l'ambiente climatizzato e l'ambiente esterno, retto dalla differenza tra la temperatura della zona climatica e la temperatura esterna;
- scambio termico per ventilazione – mediante ventilazione naturale oppure mediante un impianto di ventilazione meccanica –, retto dalla differenza tra la temperatura delle zona climatizzata e la temperatura dell'aria immessa;
- scambio termico per trasmissione e ventilazione tra zone adiacenti, retto dalla differenza tra la temperatura delle zona climatizzata e la temperatura interna dell'ambiente adiacente;
- apporti termici interni – inclusi gli apporti negativi dai pozzi termici –, per esempio dalle persone, dalle apparecchiature, dall'illuminazione e dal calore dissipato dagli impianti di riscaldamento o ventilazione;

- apporti termici solari – che possono essere diretti, per esempio attraverso le finestre, o indiretti, tramite l'assorbimento negli elementi edilizi opachi;
- accumulo, o rilascio, di calore nella massa dell'edificio.

La considerazione che sta alla base del metodo di calcolo è che la quantità netta del calore accumulato, o rilasciato, dalla massa dell'edificio risultante dal comportamento dinamico, è da considerare trascurabile, o quasi. In precedenza, infatti, si è parlato di bilancio statico ma in realtà è più corretto parlare di bilancio quasi stazionario dal momento che all'interno delle equazioni utilizzate si tiene conto, indirettamente, degli effetti dinamici attraverso un fattore di utilizzazione degli apporti termici, determinato in maniera empirica. Tale fattore tiene in considerazione il fatto che solo parte degli apporti termici interni e solari è utilizzata per ridurre il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento, poiché la quota restante porta ad un incremento indesiderato della temperatura interna al di sopra del valore di regolazione. Verrà data, nel seguito, una spiegazione più dettagliata del fenomeno.

1.2.2 Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale: UNI/TS 11300-2

Il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale, consiste in un bilancio termico a livello di impianto, in opposizione al fabbisogno di energia termica per il riscaldamento che è inteso come bilancio termico a livello di edificio.

A livello dell'impianto, il bilancio di energia termica per il riscaldamento, comprende i seguenti termini:

- il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento della zona termica dell'edificio;

- eventuale energia proveniente dagli impianti ad energia rinnovabile;
- le perdite di generazione, di accumulo, di distribuzione, di emissione e di regolazione degli impianti di riscaldamento ambiente;
- i rendimenti e i fabbisogni di energia elettrica degli ausiliari dei sistemi di riscaldamento.

Ai fini del calcolo dei rendimenti o delle perdite, gli impianti si considerano suddivisi in sottosistemi e la determinazione del rendimento medio stagionale di un impianto di riscaldamento e del fabbisogno di energia primaria deve essere effettuato in base ai rendimenti – o alle perdite – dei sottosistemi che lo compongono. Infatti, la presente specifica tecnica, non prevede prospetti che forniscano direttamente il rendimento medio stagionale dell'intero sistema edificio-impianto in base ai dati caratteristici del sistema stesso.

Ai fini del calcolo, i sottosistemi in cui si considerano suddivisi gli impianti sono nell'ordine:

- sottosistema di emissione;
- sottosistema di regolazione dell'emissione di calore in ambiente;
- sottosistema di distribuzione;
- sottosistema di generazione.

Per ciascun sottosistema occorre determinare:

- il fabbisogno di energia richiesta in ingresso dal sottosistema;
- l'eventuale energia ausiliaria richiesta;
- le perdite – eventualmente, in parte recuperabili.

Per quanto concerne le perdite, queste si suddividono in perdite non recuperabili – ossia perdite che devono essere comunque considerate perse senza possibilità di recupero – e in perdite recuperabili – ossia perdite che a seconda della situazione possono essere considerate perse o

recuperate. Un esempio di perdite recuperabili – dal sottosistema di distribuzione – è dato dalle perdite termiche di una tubazione posta all'interno o all'esterno del volume riscaldato: infatti, se le tubazioni sono all'esterno, tali perdite vanno considerate come completamente perse; se, viceversa, la tubazione si trova all'interno del volume riscaldato, parte delle perdite possono contribuire a soddisfare il fabbisogno di calore per riscaldamento. Tali perdite sono perciò considerate recuperabili. Tuttavia solo una parte delle perdite recuperabili sarà effettivamente recuperata: ciò dipende dalla presenza o meno di un sistema di regolazione.

In particolare, si può tenere conto delle perdite recuperate in due modi:

- riducendo le perdite di ciascun sottosistema ;
- riducendo il fabbisogno di energia termica utile di tutto il sistema con una quota pari alle perdite recuperate.

Ai fini di valutazione A1 e A3 si utilizza il primo metodo, mentre per le valutazioni standard si può adottare il secondo metodo – con fattore di riduzione per passare dalle perdite recuperabili a quelle effettivamente recuperate pari al valore empirico 0,8.

Infine, a proposito dell'energia ausiliaria – generalmente sotto forma di energia elettrica –, viene utilizzata per l'azionamento di pompe, valvole, ventilatori e sistemi di regolazione e controllo. Anche in questo caso parte dell'energia ausiliaria può essere recuperata come energia termica utile, apportando una corrispondente riduzione ai fabbisogno di calore.

1.3 Metodo di calcolo della 11300

Come descritto in precedenza, le operazioni preliminari per il calcolo del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento, consistono nella definizione dei confini dell'edificio e nella suddivisione eventuale dello stesso in zone termiche. In particolare, per quanto riguarda quest'ultimo

aspetto, la normativa precisa che la zonizzazione non è richiesta se si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

- le temperature interne di regolazione per il riscaldamento degli ambienti non differiscono di oltre 4 °C;
- gli ambienti sono serviti dallo stesso impianto di riscaldamento;
- se sono presenti più impianti di ventilazione, almeno l'80% delle aree di pavimento degli ambienti sono servite dallo stesso impianto.

Se, come accade spesso, queste condizioni sono rispettate, allora è lecito modellare l'intero edificio come una singola zona climatica.

Prima di procedere con il calcolo vero e proprio, è necessario chiarire un aspetto fondamentale: il presente paragrafo non ha l'obiettivo di illustrare in modo esaustivo l'intera procedura di calcolo necessaria per una corretta certificazione energetica, dal momento che questo non è lo scopo del lavoro svolto. Infatti, ciò che si vuole ottenere, è un foglio di calcolo che, pur seguendo le indicazioni fornite dalla normativa, sia il più snello possibile: per questo motivo talvolta verranno fatte delle semplificazioni, trascurando ad esempio alcuni fattori ritenuti poco influenti. Tali semplificazioni, che in parte saranno descritte già in questo capitolo, in parte nel successivo, saranno poi supportate da un'analisi di sensitività volta a sostenere le considerazioni fatte.

Per ciascuna zona termica dell'edificio e per ciascun mese, il *fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento ambiente* – $Q_{H,nd}$, espresso in [MJ] –, in condizioni di riscaldamento continuo, è calcolato come indicato dall'equazione (1):

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (1)$$

dove:

- $Q_{H,ht}$ è lo scambio termico totale nel caso di riscaldamento [MJ];
- $\eta_{H,gn}$ è il fattore adimensionale di utilizzazione degli apporti termici;

- Q_{gn} sono gli apporti termici totali [MJ];
- $Q_{H,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento [MJ];
- $Q_{H,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento [MJ];
- Q_{int} sono gli apporti termici interni [MJ];
- Q_{sol} sono gli apporti termici solari [MJ].

Come anticipato in precedenza, tale equazione rappresenta un bilancio statico: dice semplicemente che, a regime, l'energia fornita dall'impianto termico sommata all'energia "gratuita" dovuta ad apporti termici di varia natura, corretti con un non ben specificato fattore $\eta_{H,gn}$, deve bilanciare l'energia persa attraverso gli scambi termici verso l'ambiente esterno. Si è anche detto che è più corretto parlare di metodo quasi stazionario dal momento che in realtà gli effetti dinamici sono tenuti in considerazione proprio mediante il fattore di utilizzazione degli apporti termici. Tuttavia, le UNI/TS 11300, non forniscono alcuna informazione circa la provenienza di tale fattore.

1.3.1 Parametri Dinamici: il fattore di utilizzazione degli apporti termici

Per una spiegazione più dettagliata circa il fattore $\eta_{H,gn}$ è necessario ricorrere all'*Appendice I* della UNI EN ISO 13790 – ovvero la normativa europea a cui fa riferimento la specifica tecnica sotto analisi.

Per il riscaldamento, il fattore di utilizzazione degli apporti termici tiene in considerazione il fatto che solo parte degli apporti termici interni e solari è utilizzata per ridurre il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento, poiché la restante parte si traduce in un indesiderato incremento della temperatura interna al di sopra del valore di regolazione.

In questo approccio, gli apporti termici non utilizzati sono omessi dell'equazione di bilancio termico. Questo è controbilanciato dal fatto che lo scambio termico aggiuntivo per trasmissione e ventilazione risultante dagli apporti termici non utilizzati è anche omesso nell'equazione di bilancio termico: lo scambio termico per trasmissione e ventilazione infatti, è calcolato sulla base della temperatura interna di regolazione per il riscaldamento – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ –, ignorando così il surriscaldamento. Gli apporti termici non utilizzati portano ad un incremento della temperatura interna al di sopra del valore di regolazione e conseguentemente ad uno scambio termico aggiuntivo per trasmissione e ventilazione. In altre parole: il fattore di utilizzazione degli apporti è una misura dell'entità del surriscaldamento.

Per comprendere meglio il problema, si confronti l'equazione (1) per il calcolo del fabbisogno mensile secondo la UNI/TS 11300-1, con la seguente equazione:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht,real} - Q_{H,gn} \quad (2)$$

dove le differenze sono dovute all'assenza del fattore correttivo e alla sostituzione dello scambio termico totale $Q_{H,ht}$ con lo scambio termico totale reale $Q_{H,ht,real}$. Queste ultime due grandezze sono definite come segue:

$$Q_{H,ht} = f \cdot (\theta_{int,set} - \theta_e) \cdot t \quad (3)$$

$$Q_{H,ht,real} = f \cdot (\theta_{int,mn} - \theta_e) \cdot t \quad (4)$$

dove:

- f rappresenta un coefficiente di scambio termico che verrà discusso in seguito [W/K];
- θ_e è la temperatura esterna media del mese considerato [K];
- t è la durata del mese considerato [s];
- $\theta_{int,set}$ è la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata;
- $\theta_{int,mn}$ è la temperatura interna media reale.

Dunque, confrontando la (1) con la (2) si vede che, mentre nella seconda compare il termine relativo alla temperatura interna media reale non nota a priori, nella prima non si presenta il medesimo problema.

A questo punto si definisce il fattore di utilizzazione degli apporti termici per il calcolo del fabbisogno di riscaldamento nel seguente modo:

$$\eta_{H,gn} = \frac{(1-\gamma_H^{\alpha_H})}{(1-\gamma_H^{\alpha_H+1})} \quad (5)$$

con:

$$\gamma_H = \frac{Q_{gn}}{Q_{H,ht}} \quad (6)$$

$$\alpha_H = \alpha_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{1}{3600} \frac{C_m}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj}} \quad (8)$$

$$C_m = c_m \cdot A_f \quad (9)$$

dove:

- γ_H è il rapporto adimensionale di bilancio termico;
- τ è la costante di tempo termica della zona termica [h];
- C_m è la capacità termica interna della zona termica [J/K];
- $H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno [W/K];
- $H_{ve,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno [W/K];
- c_m capacità termica interna per unità di superficie dell'involucro [KJ/(m²K)];
- A_f è la superficie utile calpestabile climatizzata [m²].

In accordo con la UNI/TS 11300-1, si assume $\alpha_{H,0} = 1$ e $\tau_{H,0} = 15$ [h] – corrispondono a valori empirici calcolati a livello nazionale; invece, per

quanto riguarda la capacità termica specifica c_m , si fa riferimento al *prospetto 16* della medesima normativa, riportato in figura 2.

Caratteristiche costruttive dei componenti edilizi				Numero di piani		
Intonaci	Isolamento	Pareti esterne	Pavimenti	1	2	≥3
				Capacità termica areica		
gesso	interno ^{a)}	qualsiasi	tessile	75	75	85
	interno ^{a)}	qualsiasi	legno	85	95	105
	interno ^{a)}	qualsiasi	piastrelle	95	105	115
	assente/esterno	leggere/blocchi	tessile	95	95	95
	assente/esterno	medie/pesanti	tessile	105	95	95
	assente/esterno	leggere/blocchi	legno	115	115	115
	assente/esterno	medie/pesanti	legno	115	125	125
	assente/esterno	leggere/blocchi	piastrelle	115	125	135
	assente/esterno	medie/pesanti	piastrelle	125	135	135
malta	interno ^{a)}	qualsiasi	tessile	105	105	105
	interno ^{a)}	qualsiasi	legno	115	125	135
	interno ^{a)}	qualsiasi	piastrelle	125	135	135
	assente/esterno	leggere/blocchi	tessile	125	125	115
	assente/esterno	medie	tessile	135	135	125
	assente/esterno	pesanti	tessile	145	135	125
	assente/esterno	leggere/blocchi	legno	145	145	145
	assente/esterno	medie	legno	155	155	155
	assente/esterno	pesanti	legno	165	165	165
	assente/esterno	leggere/blocchi	piastrelle	145	155	155
	assente/esterno	medie	piastrelle	155	165	165
	assente/esterno	pesanti	piastrelle	165	165	165

^{a)} Isolamento interno = posto sul lato interno del componente.

Figura 2: Capacità termica interna per unità di superficie dell'involucro di tutti gli ambienti climatizzati [$KJ/(m^2K)$];

Il fattore di utilizzazione, come si osserva dalla (5), è dunque funzione del rapporto di bilancio termico e della costante di tempo dell'edificio: l'influenza di queste due grandezze sul fattore di utilizzazione è rappresentabile attraverso curve analoghe a quella di figura 3.

Non è di interesse, ai fini del presente elaborato, approfondire ulteriormente l'equazione (5), né tantomeno capire come essa è ottenuta: ci si limita pertanto ad una presentazione generale del problema.

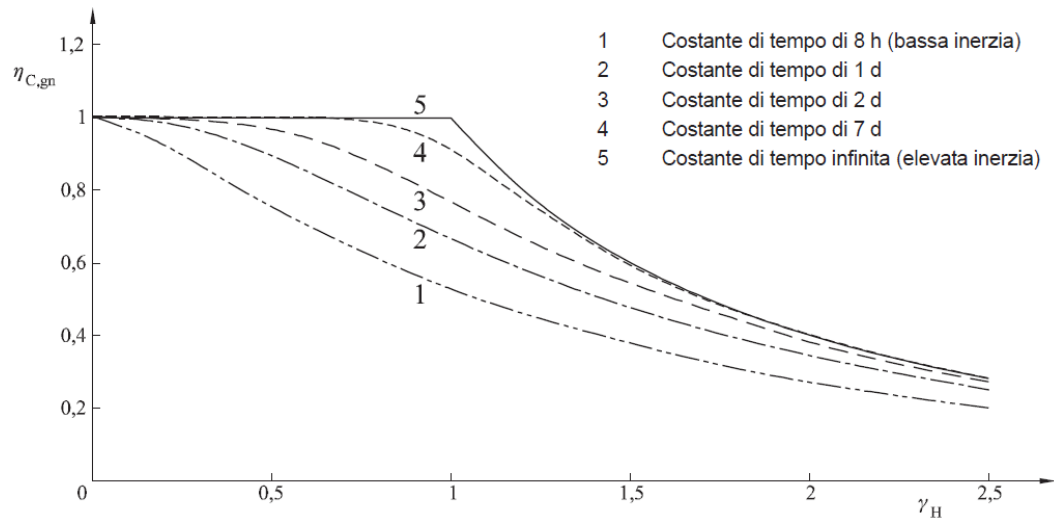


Figura 3: Illustrazione del fattore di utilizzazione degli apporti per la modalità di riscaldamento

Il fattore di utilizzazione degli apporti termici è ricavato mediante identificazione parametrica o tecniche di analisi di regressione, comparando per una serie di situazioni, il valori dei fabbisogni mensili di energia termica per il riscaldamento calcolati con un metodo appropriato di simulazione dettagliata, con i risultati del metodo mensile. Ciò richiede che, per ciascun valore del fabbisogno mensile di energia termica per il riscaldamento calcolato con il metodo di simulazione dettagliata, si conoscano i dati d'ingresso associati al metodo mensile: lo scambio termico mensile per trasmissione e ventilazione più gli apporti termici interni e solari mensili.

Sebbene questo sembri banale, in pratica appare difficile non introdurre piccoli errori e, poiché i fattori di utilizzazione si basano su una piccola differenza tra due grandi numeri, già un piccolo errore può portare a grandi differenze nei risultati.

Un modo per ricavare i dati d'ingresso necessari per il metodo mensile dal metodo di simulazione dettagliata, evitando il rischio appena menzionato, consiste nell'adottare un approccio "black box", eseguendo quindi più simulazioni dettagliate sullo stesso sistema, variando opportunamente alcune condizioni operative.

1.3.2 Gli scambi termici

Gli scambi termici che possono avvenire tra due strutture o più genericamente tra due corpi a differente temperatura sono sostanzialmente suddivisibili in tre categorie: per conduzione, per convezione e per irraggiamento. Si deve sempre tenere presente che durante la trasmissione del calore avviene uno scambio di energia, tanto più elevata quanto più è grande la differenza di temperatura tra le due sorgenti.

Lo scambio termico per conduzione avviene quando si ha una interazione tra i diversi sistemi: esempio di trasmissione per conduzione è il riscaldamento della parte esterna di una parete in laterizio e la propagazione del calore fino alla superficie interna.

Lo scambio termico per convezione si realizza tipicamente nei liquidi e negli aeriformi: il calore si trasmette attraverso un movimento della massa come, ad esempio, la movimentazione di aria calda verso le parti alte degli ambienti.

Come ultima categoria vi è quella di trasmissione di calore tramite irraggiamento, soprattutto nella banda spettrale dell'infrarosso: un esempio basilare di tale trasmissione è dato dal sole che riscalda la terra attraverso l'universo, per effetto delle radiazioni infrarosse emesse.

In generale, per ogni zona dell'edificio e per ogni mese, gli scambi termici si calcolano con le seguenti formule:

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + (\sum_k F_{r,k} \cdot \Phi_{r,mn,k}) \cdot t \quad (10)$$

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t \quad (11)$$

dove:

- $\theta_{int,set,H}$ è la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata [$^{\circ}C$];
- θ_e è la temperatura esterna media del mese [$^{\circ}C$];
- $F_{r,k}$ è il fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste;

- $\Phi_{r,mn,k}$ è l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo [W];
- t è la durata del mese considerato [s].

Di seguito sono descritte le metodologie di calcolo dei parametri necessari alla definizione degli scambi termici secondo le equazioni appena descritte.

SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

La trasmissione di calore da una zona termica può avvenire:

- verso l'aria esterna;
- verso il terreno;
- verso altre zone climatizzate;
- verso altre zone non climatizzate.

Il relativo coefficiente globale di scambio termico per trasmissione si ricava semplicemente come somma di questi contributi, secondo la relazione:

$$H_{tr,adj} = H_D + H_g + H_U + H_A \quad (12)$$

dove, come già accennato:

- H_D è il coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno [W/K];
- H_g è il coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno [W/K];
- H_U è il coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati [W/K];
- H_A è il coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone climatizzate a temperatura differente [W/K].

H_D – Scambio termico diretto per trasmissione attraverso l'ambiente esterno

Al fine di calcolare il coefficiente in questione è necessario operare una distinzione tra pareti opache e pareti trasparenti.

A. Pareti Opache

Nel caso di involucro opaco, la formula assume la seguente forma generale:

$$H_{D,o} = \sum_k A_{c,k} \cdot U_{c+pt,k} \quad (13)$$

dove:

- $A_{c,k}$ è l'area del componente opaco [m^2];
- $U_{c+pt,k}$ è la trasmittanza del componente opaco, maggiorata per la presenza di eventuali ponti termici, ovvero di porzioni di materiale in cui l'isolamento decade sensibilmente rispetto al resto della superficie [$W/(m^2K)$].

La trasmittanza termica non è altro che il valore del flusso di calore che passa attraverso una data superficie: un basso valore di trasmittanza è indice di una superficie particolarmente isolante al passaggio del flusso di calore. In generale, l'involucro opaco di un edificio è costituito da pareti con differenti caratteristiche stratigrafiche del materiale con cui è costituita e dello spessore, a seconda della funzione. A titolo di esempio viene riportata nella seguente figura 4 la classificazione dettagliata di una parete di un generico edificio.

Sfruttando quindi i prospetti da A.1 a A.7 dell'appendice A della UNI/TS 11300-1 è quindi possibile calcolare la trasmittanza termica per ciascun settore della parete e quindi, note le aree di ciascun componente opaco, il coefficiente $H_{D,o}$.

I valori di trasmittanza così ricavati devono poi essere maggiorati a causa della presenza di ponti termici: la maggiorazione percentuale da apportare è indicata nel prospetto 4 della specifica tecnica, riportato in figura 5.



Id.	Funzione	Materiale	Spessore
S1	Tamponatura sotto le finestre	Pareti a cassa vuota con mattoni forati	33 cm
S2	Tamponatura delle pareti	Pareti a cassa vuota con mattoni forati	53 cm
S3	Tamponatura degli angoli	Pareti a cassa vuota con mattoni forati	70 cm
S4	Solaio di copertura	Soletta piana in laterocemento	32 cm
S5	Cassonetti sopra le finestre	Soletta piana in laterocemento	60 cm

Figura 4: Esempio di classificazione delle superfici opache di un edificio

Un'analisi così dettagliata delle pareti opache per ciascun edificio è stata tuttavia ritenuta fuorviante per quelli che sono gli obiettivi preposti, pertanto si è deciso di considerare, in prima approssimazione, ciascun edificio come costituito da un'unica tipologia di parete – considerando quindi, per le pareti di ciascun edificio, un unico materiale e un unico

spessore e trascurandone la funzione. Tale scelta sarà poi supportata dall'analisi di sensitività effettuata nel capitolo seguente.

Descrizione della struttura	Maggiorazione ¹¹⁾
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto) senza aggetti/balconi e ponti termici corretti	5
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto) con aggetti/balconi	15
Parete omogenea in mattoni pieni o in pietra (senza isolante)	5
Parete a cassa vuota con mattoni forati (senza isolante)	10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico corretto)	10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico non corretto)	20
Pannello prefabbricato in calcestruzzo con pannello isolante all'interno	30

Figura 5: *Maggiorazioni percentuali relative alla presenza dei ponti termici [%]*

B. Pareti trasparenti

Nel caso di involucro trasparente, la formula assume la seguente forma:

$$H_{D,f} = \sum_k A_{w,p,k} \cdot U_{f,k} \quad (14)$$

dove:

- $A_{w,p,k}$ è l'area del componente trasparente [m^2];
- $U_{f,k}$ è la trasmittanza del componente trasparente [$W/(m^2K)$].

Per ricavare i valori di trasmittanza termica delle finestre $U_{f,k}$ – vetro più telaio – si è utilizzato il prospetto C.3 della specifica tecnica – riportato in figura 6. Assunto ciascun telaio pari al 20% dell'area dell'intera finestra – ipotesi strettamente necessaria per un calcolo semplificato –, il prospetto C.3 fornisce i valori $U_{f,k}$ in funzione della trasmittanza del vetro U_{gl} – ricavata a sua volta dal prospetto C.1 riportato in figura 7 – e dell'area delle finestre.

Analogamente a quanto fatto per le pareti opache, nell'ottica di effettuare una semplificazione che, senza penalizzare troppo i risultati, permettesse di effettuare un calcolo più snello e rapido del fabbisogno energetico, si è deciso di considerare un'unica tipologia di finestra per ciascun edificio – più nel dettaglio, scegliendo un'unica tipologia di vetrata e fissando le

medesime dimensioni per tutte le finestre dell'edificio in esame. Pertanto, il conteggio delle finestre così semplificate, è stato realizzato con la logica di tenere la percentuale di superficie trasparente di ciascuna parete il più possibile identica al caso reale – costituito invece da finestre di diverse dimensioni e forme.

Tipo di vetrata	U_{gl} [W/(m ² K)]	U_f [W/(m ² K)]												
		0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,6	3,0	3,4	3,8	7,0
Singola	5,7	4,7	4,8	4,8	4,8	4,9	4,9	5,0	5,0	5,1	5,2	5,2	5,3	6,0
Doppia o tripla	3,3	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5	3,6	4,1
	3,2	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5	4,0
	3,1	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,9
	3,0	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,9
	2,9	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,8
	2,8	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1	3,1	3,7
	2,7	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1	3,6
	2,6	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,5
	2,5	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,5
	2,4	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7	2,8	2,9	3,4
	2,3	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	3,3
	2,2	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	3,2
	2,1	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	3,1
	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	3,1
	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	3,1
	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	3,0
	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,9
	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,3	2,8
	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,7
	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2	2,7
1,3	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1	2,6	
1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,5	
1,1	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2,4	
1,0	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,3	
0,9	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	2,3	
0,8	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	2,2	
0,7	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	2,1	
0,6	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	2,0	
0,5	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,9	

Figura 6: *Trasmittanza termica di finestre con percentuale dell'area di telaio pari al 20 % dell'area dell'intera finestra*

Vetrata				Tipo di gas nell'intercapedine (concentrazione del gas $\geq 90\%$)				
Tipo	Vetro	Emissività normale	Dimensioni mm	Aria	Argon	Krypton	SF ₆	Xenon
Vetrata tripla	Vetro normale	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8	1,9	1,7
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,9	1,6
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6	2,0	1,6
	Due lastre con trattamento superficiale	$\leq 0,20$	4-6-4-6-4	1,8	1,5	1,1	1,3	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,3	1,0	1,3	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,8	1,3	0,8
	Due lastre con trattamento superficiale	$\leq 0,15$	4-6-4-6-4	1,7	1,4	1,1	1,2	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,2	0,9	1,2	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,7	1,3	0,7
	Due lastre con trattamento superficiale	$\leq 0,10$	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0	1,1	0,8
			4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8	1,1	0,7
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6	1,2	0,6
	Due lastre con trattamento superficiale	$\leq 0,05$	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9	1,1	0,7
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	1,1	0,5
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	1,1	0,5

Figura 7: Trasmittanza termica di vetrate verticali triple riempite con diversi gas $[\frac{W}{m^2K}]$

H_g – Scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno

Il coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno viene calcolato nel seguente modo:

$$H_g = A \cdot U_f \cdot b_{tr,g} \quad (15)$$

dove:

- A è l'area dell'elemento [m^2];
- U_f è la trasmittanza termica della parete sospesa del pavimento – tra ambiente interno e spazio sotto pavimento – $[\frac{W}{m^2K}]$;
- $b_{tr,g}$ è un fattore di correzione, ottenuto dal prospetto 6 della normativa – figura 8 .

Per quanto riguarda U_f , si fa riferimento, in accordo con quanto espresso nella normativa in esame, alla UNI EN ISO 13370.

Ambiente confinante	$b_{tr,g}$
Pavimento controterra	0,45
Parete controterra	0,45
Pavimento su vespaio aerato	0,80

Figura 8: Fattore di correzione $b_{tr,g}$

H_u – Scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati

Il coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzato è stato trascurato dal momento che in nessuno degli edifici in esame sono stati individuati ambienti non climatizzati dalle dimensioni tali da introdurre variazioni significative nel calcolo del fabbisogno.

Nel caso in cui tale ipotesi non fosse più veritiera, il coefficiente in esame viene calcolato con la seguente relazione:

$$H_u = A_{iu} \cdot U_{s,iu} \cdot b_{tr,x} \quad (16)$$

dove:

- A_{iu} è l'area del solaio su ambiente non climatizzato [m^2];
- $U_{s,iu}$ è la trasmittanza termica del solaio su ambiente non climatizzato, valutata secondo il prospetto A.6 dell'appendice A della 11300-1 [$w/(m^2K)$];
- $b_{tr,x}$ è il fattore di correzione dello scambio termico tra ambiente climatizzato e non, ricavato dal prospetto 5 della medesima normativa.

In figura 9 e 10 sono rispettivamente riportati i due prospetti appena citati.

Spessore [m]	Soletta in laterocemento su cantina	Soletta in laterocemento su vespaio o pilotis	Basamento in calcestruzzo su terreno
0,20	1,45	1,75	2,00
0,25	1,35	1,65	1,80
0,30	1,25	1,50	1,65
0,35	1,15	1,30	1,50

Figura 9: *Trasmittanza termica dei solai a terra $[w/(m^2K)]$;*

Ambiente confinante	$b_{tr,x}$
Ambiente	
- con una parete esterna	0,4
- senza serramenti esterni e con almeno due pareti esterne	0,5
- con serramenti esterni e con almeno due pareti esterne (per esempio autorimesse)	0,6
- con tre pareti esterne (per esempio vani scala esterni)	0,8
Piano interrato o seminterrato	
- senza finestre o serramenti esterni	0,5
- con finestre o serramenti esterni	0,8
Sottotetto	
- tasso di ventilazione del sottotetto elevato (per esempio tetti ricoperti con tegole o altri materiali di copertura discontinua) senza rivestimento con feltro o assito	1,0
- altro tetto non isolato	0,9
- tetto isolato	0,7
Aree interne di circolazione (senza muri esterni e con tasso di ricambio d'aria minore di $0,5 h^{-1}$)	0,0
Aree interne di circolazione liberamente ventilate (rapporto tra l'area delle aperture e volume dell'ambiente maggiore di $0,005 m^2/m^3$)	1,0

Figura 10: *Fattore di correzione $b_{tr,x}$*

H_A – Scambio termico per trasmissione verso altre zone climatizzate a temperatura diversa

Il coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone climatizzate risulta essere anch'esso nullo dal momento che non sono presenti nell'edificio delle zone termiche climatizzate a temperatura diversa – infatti è più che lecito ipotizzare che in ogni stanza, la temperatura desiderata sia, conformemente alle normative vigenti, pari a $20^{\circ}C$.

SCAMBIO TERMICO PER VENTILAZIONE

La normativa prevede dei ricambi per ventilazione dipendenti dall'occupazione dei locali e dalla loro destinazione d'uso in maniera tale da garantire una adeguata qualità dell'aria. Il numero di ricambi orari ricavato dalle formule è solitamente molto superiore a quanto eseguito normalmente negli edifici: le perdite per ventilazione sono, infatti, particolarmente elevate e rappresentano solitamente una voce di incongruenza fra il fabbisogno energetico calcolato e quello verificato durante la vita dell'edificio.

Il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione si ricava come:

$$H_{ve,adj} = \rho_a \cdot c_a \cdot (\sum_k b_{ve,k} \cdot q_{ve,k,mn}) \quad (17)$$

dove:

- $\rho_a \cdot c_a$ è la capacità termica volumica dell'aria, pari a $1200 [J/(m^3K)]$;
- $q_{ve,k,mn}$ è la portata mediata sul tempo del flusso d'aria k-esimo [m^3/s];
- $b_{ve,k}$ è il fattore di correzione della temperatura per il flusso d'aria k-esimo, pari a 1.

La portata mediata sul tempo del flusso d'aria k-esimo si ricava come:

$$q_{ve,k,mn} = f_{ve,t,k} \cdot A \cdot n_s \cdot q_{aria,pers} \quad (18)$$

dove:

- $f_{ve,t,k}$ è la frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria k-esimo
– per una situazione permanente, $f_{ve,t,k} = 1$;
- A è l'area dei locali in cui è previsto lo stazionamento di persone;
- n_s è l'indice di affollamento, ricavato secondo la norma UNI 10339 Appendice A – nel caso di edifici adibiti ad attività scolastiche, è pari a $0,45 [persone/m^2]$.
- $q_{aria,pers}$ è la portata d'aria esterna di rinnovo, ottenuta dalla

norma UNI 10339 – nel caso di edifici adibiti ad attività scolastiche, è pari a 5 [1/(s · persona)].

EXTRA FLUSSO TERMICO PER RADIAZIONE INFRAROSSA VERSO LA VOLTA CELESTE

Il calcolo dell'extra flusso termico per radiazione infrarossa verso la volta celeste è effettuato, secondo quanto riportato nei punti 11.3.5 e 11.4.6 della UNI EN ISO 19790:2008, adottando le seguenti ipotesi:

- La differenza tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura apparente del cielo $\Delta\theta_{er} = 11 [K]$;
- Il coefficiente di scambio termico esterno per irraggiamento h_r , pari a:
 - 4,5 [W/(m²K)] per materiali da costruzioni – superfici opache;
 - 4,184 [W/(m²K)] per i vetri senza deposito superficiale – superfici trasparenti;
- Il fattore di forma tra un componente edilizio e la volta celeste $F_{r,k}$ vale:
 - 1 per coperture orizzontali;
 - 0,5 per pareti verticali.

A partire da queste considerazioni, si ricava l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo mediato sul tempo, ovvero:

$$\dot{\Phi}_{r,mn,k} = R_{se} \cdot U_{c,k} \cdot A_{c,k} \cdot h_r \cdot \Delta\theta_{er} \quad (19)$$

dove:

- R_{se} è la resistenza termica superficiale esterna del componente, determinata secondo la norma UNI EN 6946 [m²K/W];
- $U_{c,k}$ è la trasmittanza termica del componente [W/(m²K)];
- $A_{c,k}$ è la superficie di scambio del componente edilizio k-esimo.

Il calcolo dovrà essere effettuato mese per mese.

1.3.3 Gli apporti termici

Oggi giorno gli apporti di calore, soprattutto quelli solari, stanno diventando sempre più importanti e, in alcune tipologie edilizie – come ad esempio le case passive – costituiscono la fonte primaria di energia per l'edificio.

Gli apporti di calore sono sostanzialmente distinguibili fra interni, dipendenti dagli occupanti e dal calore dovuto alle apparecchiature elettriche presenti e alla illuminazione, e solari, derivati dall'irraggiamento medio della località interessata, dall'orientamento delle superfici, ombreggiamenti, caratteristiche di assorbimento delle superfici ecc.

Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese, gli apporti termici si calcolano con le seguenti formule [MJ]:

$$Q_{int} = (\sum_k \Phi_{int,mn,k}) \cdot t + (\sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{int,mn,u,l}) \cdot t \quad (20)$$

$$Q_{sol} = (\sum_k \Phi_{sol,mn,k}) \cdot t + (\sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{sol,mn,u,l}) \cdot t \quad (21)$$

dove le due sommatorie si riferiscono rispettivamente ai flussi entranti/generati nella zona climatizzata e quelli negli ambienti non climatizzati, ed inoltre:

- $b_{tr,l}$ è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avete la sorgente di calore interna l-esima oppure il flusso termico l-esimo di origine solare;
- $\Phi_{int,mn,k}$ è il flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo [W];
- $\Phi_{int,mn,u,l}$ è il flusso termico prodotto dalla l-esima sorgente di calore interna all'ambiente non climatizzato adiacente u, mediato sul tempo [W];
- $\Phi_{sol,mn,k}$ è il flusso termico k-esimo di origine solare, mediato sul tempo [W];

- $\Phi_{sol,mn,u,l}$ è il flusso termico l-esimo di origine solare nell'ambiente non climatizzato adiacente u, mediato sul tempo [W].

Nella maggior parte dei casi – ed in particolare negli edifici analizzati –, i termini $b_{tr,l}$, $\Phi_{int,mn,u,l}$ e $\Phi_{sol,mn,u,l}$ sono nulli in quanto negli ambienti adiacenti non climatizzati non sono presenti sorgenti di calore né interne né esterne di origine solare. Pertanto le equazioni appena illustrate possono essere semplificate nelle seguenti:

$$Q_{int} = (\sum_k \Phi_{int,mn,k}) \cdot t \quad (22)$$

$$Q_{sol} = (\sum_k \Phi_{sol,mn,k}) \cdot t \quad (23)$$

Le sommatorie sono calcolate per i k elementi opachi e trasparenti.

FLUSSO TERMICO PRODOTTO DA SORGENTI INTERNE DI CALORE

Gli apporti termici interni comprendono qualsiasi calore generato nell'ambiente climatizzato dalle sorgenti interne diverso dall'energia utilizzata intenzionalmente per il riscaldamento ambiente, ovvero:

- Il calore metabolico proveniente dagli occupanti e il calore disperso dalle apparecchiature;
- Il calore dissipato dai dispositivi di illuminazione;
- Il calore dissipato, o assorbito, dagli impianti di acqua calda, di rete e reflua;
- Il calore dissipato, o assorbito, dagli impianti di riscaldamento e di ventilazione;
- Il calore proveniente da, o diretto a, processi e prodotti.

In generale, il flusso termico prodotto da sorgenti interne di calore, lo si ottiene come sommatoria di flussi termici dovuti a ciascuno degli elementi appena elencati; tuttavia, nelle valutazioni di progetto o standard, per edifici diversi dalle abitazioni, gli apporti termici interni sono espressi anche in funzione della destinazione d'uso, secondo quanto riportato nel Prospetto 8 della norma UNI/TS 11300-1 par. 13.1.1, di seguito riportato.

Categoria di edificio	Destinazione d'uso	Apporti medi globali per unità di superficie utile di pavimento
		W/m ²
E.1 (3)	Edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari	6
E.2	Edifici adibiti a uffici e assimilabili	6
E.3	Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili	8
E.4 (1)	Cinema e teatri, sale di riunione per congressi	8
E.4 (2)	Mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto	8
E.4 (3)	Bar, ristoranti, sale da ballo	10
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili	8
E.6 (1)	Piscine, saune e assimilabili	10
E.6 (2)	Palestre e assimilabili	5
E.6 (3)	Servizi di supporto alle attività sportive	4
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	4
E.8	Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili	6

Figura 11: Dati convenzionali relativi all'utenza

Pertanto, il flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo è espresso dalla seguente relazione:

$$\Phi_{int,mn,k} = \varphi_{int,mn,k} \cdot A_f \quad (24)$$

dove:

- $\varphi_{int,mn,k}$ è l'apporto medio globale per unità di superficie utile di pavimento, rappresentato in figura 11, [W/m²];
- A_f è la superficie utile calpestabile climatizzata [m²].

FLUSSO TERMICO DI ORIGINE SOLARE

Il flusso termico k-esimo di origine solare $\Phi_{sol,k}$ si calcola con la seguente relazione:

$$\Phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k} \quad (25)$$

$$F_{sh,ob,k} = F_{hor} \cdot F_{ov} \cdot F_{fin} \quad (26)$$

$$I_{sol,k} = 11,57 \cdot H_{sol,k} \quad (27)$$

dove:

- $F_{sh,ob,k}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k-esima;
- $A_{sol,k}$ è l'area di captazione solare effettiva della superficie k-esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato [m^2];
- $I_{sol,k}$ è l'irradianza solare media mensile, sulla superficie k-esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale [W/m^2];
- F_{hor} è il fattore di ombreggiatura relativo ad ostruzioni esterne;
- F_{ov} è il fattore di ombreggiatura relativo ad aggetti orizzontali;
- F_{fin} è il fattore di ombreggiatura relativo ad aggetti verticali;
- $H_{sol,k}$ è l'irradiazione solare globale giornaliera media mensile, tabellata nei Prospetti VII-XIII della norma UNI 10349 [MJ/m^2];
- 11,57 è un opportuno coefficiente di conversione, espresso in [s^{-1}].

I tre fattori di ombreggiatura devono essere calcolati per ciascun componente, opaco e trasparente, tramite interpolazione lineare dei dati tabellati nell'Appendice D della norma UNI/TS 11300-1. I valori dei fattori di ombreggiatura dipendono dalla latitudine, dall'orientamento dell'elemento ombreggiato, dal clima, dal periodo considerato e dalle caratteristiche geometriche degli elementi ombreggianti. Tali caratteristiche sono descritte da un parametro angolare come illustrato nelle figure 12 e 13.

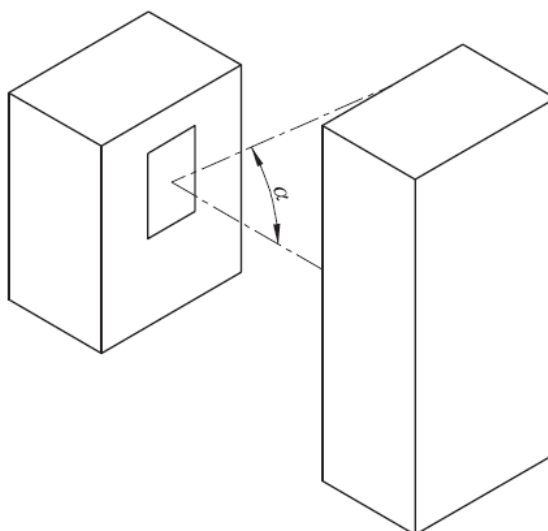


Figura 12: Angolo dell'orizzonte ombreggiato da un'ostruzione esterna

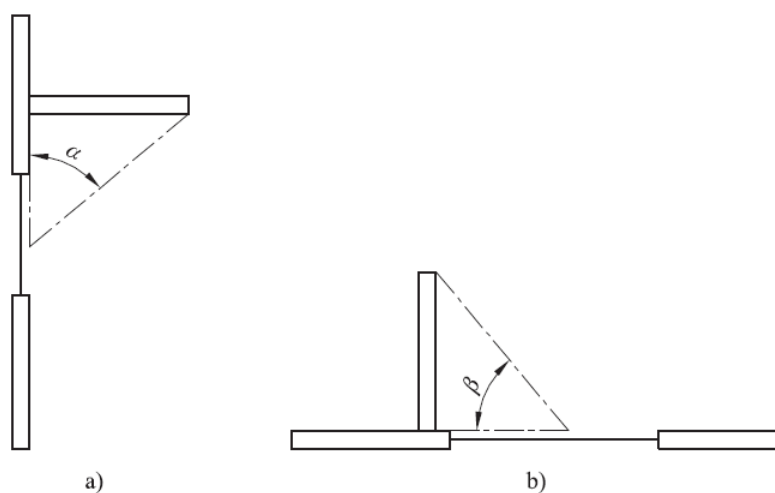


Figura 13: Aggetto orizzontale: a) sezione verticale, b) sezione orizzontale

Tuttavia il costo, in termini di tempo necessario ad una corretta identificazione di tali parametri per ciascun edificio, non è giustificato da un sostanziale variazione del termine relativo al flusso termico solare il quale, tra l'altro, negli edifici in esame risulta essere generalmente poco influente. Per questo motivo si è deciso di trascurare il termine relativo al fattore di riduzione per ombreggiatura, ponendo quindi $F_{sh,ob,k} = 1$.

Area di captazione solare effettiva di un componente vetrato

Gli apporti solari che giungono all'interno attraverso una vetratura dipendono, oltre che dal tipo di vetro, anche dalla struttura del componente e dall'efficacia di eventuali schermature – tende, tapparelle, ecc.. La norma richiede il calcolo di una superficie equivalente, chiamata area di captazione solare effettiva, che tenga in considerazione i fattori appena citati:

$$A_{sol} = F_{sh,gl} \cdot g_{gl} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p} \quad (28)$$

$$g_{gl} = F_w \cdot g_{gl,n} \quad (29)$$

dove:

- $F_{sh,gl}$ è il fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili; si è scelto di trascurare tale fattore – in pratica si sta considerando di mantenerle sollevate durante l'utilizzo della struttura, il che rappresenta un'ipotesi tutto sommato verosimile;
- g_{gl} è la trasmittanza di energia solare totale della finestra quando la schermatura solare non è utilizzata;
- F_F è la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata dal telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato; secondo il par. 14.3.2 della normativa in uso, il valore $(1 - F_F)$ può essere assunto pari a 0,8;
- $A_{w,p}$ è l'area proiettata totale del componente vetrato [m^2];
- F_w è il fattore di esposizione: secondo il par. 14.3.1 della 11300-1, può essere assunto pari a 0,9;
- $g_{gl,n}$ è la trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale, ricavabile dal prospetto 13 della 11300-1, di seguito riportato.

Tipo di vetro	$g_{gl,n}$
Vetro singolo	0,85
Doppio vetro normale	0,75
Doppio vetro con rivestimento basso-emissivo	0,67
Triplo vetro normale	0,70
Triplo vetro con doppio rivestimento basso-emissivo	0,50
Doppia finestra	0,75

Figura 14: Trasmittanza di energia solare totale $g_{gl,n}$ di alcuni tipi di vetro

Area di captazione solare effettiva di una parete opaca

Come è noto dall'esperienza comune, l'apporto solare su una parete dipende, oltre che dalla sua inclinazione, dal colore – colori scuri riflettono meno le radiazioni, consentendo alla parete di accumulare più calore. L'area di captazione solare effettiva della parte opaca dell'involucro edilizio è calcolata con la seguente formula:

$$A_{sol} = \alpha_{sol,c} \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c \quad (30)$$

dove:

- $\alpha_{sol,c}$ è il fattore di assorbimento solare del componente opaco che, in accordo con la normativa, può essere assunto pari a 0,3 per colore chiaro della superficie esterna, 0,6 per colore medio e 0,9 per colore scuro;
- R_{se} è la resistenza termica superficiale esterna del componente opaco, pari a 0,04 [$m^2 K/W$], determinato secondo la UNI EN ISO 6946;
- U_c è la trasmittanza termica del componente opaco [$W/(m^2 K)$];
- A_c è l'area proiettata del componente opaco [m^2].

1.3.4 Fabbisogno di energia primaria e rendimento dell'impianto

Come detto in precedenza, il fabbisogno di energia primaria è calcolato a partire dal fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale,

il quale è ottenuto trascurando qualsiasi interazione tra edificio e impianto: il rendimento medio stagionale dell'impianto termico, non è altro che il rapporto tra questi due fabbisogni ed indica quindi quanta parte dell'energia consumata serve a creare le condizioni di comfort interno, mentre la rimanente parte è energia persa in una dei sottosistemi che si è detto comporre l'impianto. Tale rendimento, che misura la prestazione energetica dell'edificio, è calcolato come:

$$\eta_g = \frac{Q_{H,nd}}{Q_{p,H}} \quad (31)$$

dove:

- $Q_{H,nd}$ è il fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento precedentemente definito;
- $Q_{p,H}$ è il fabbisogno globale di energia primaria per il riscaldamento, da determinare.

FABBISOGNO GLOBALE DI ENERGIA PRIMARIA

Il fabbisogno globale di energia primaria, trascurando i fabbisogni per la produzione di acqua calda sanitaria e per usi di cottura, è dato da:

$$Q_{p,H} = \sum_i Q_{H,c,i} + Q_{H,aux} \cdot f_{p,ei} \cdot 11,86 \cdot 10^3 = Q_{gn,IN} + Q_{aux,p} \quad (32)$$

dove:

- $Q_{gn,IN}$ è il fabbisogno di generazione [kWh];
- $Q_{aux,p}$ è il fabbisogno di energia elettrica per ausiliari degli impianti di riscaldamento [kWh];
- $Q_{H,c,i}$ è il fabbisogno di energia per il riscaldamento ottenuto dall' i -esimo vettore energetico [kWh];
- $Q_{H,aux}$ è il fabbisogno di energia elettrica per ausiliari degli impianti di riscaldamento [kWh_{el}];
- $f_{p,ei}$ è il fattore di conversione di energia primaria dell'energia elettrica ausiliaria, deliberato annualmente dell'Autorità per

l'Energia con delibera EEN 3/08 e pari a $0,187 \cdot 10^{-3}$
[tep/kWh_{el}].

Per convertire il termine degli ausiliari elettrici da [tep] a [kWh], occorre moltiplicare per il fattore di conversione $11,86 \cdot 10^3$ [kWh/tep].

Quanto ricavato rappresenta l'energia che il sistema deve trasformare da primaria in altre forme – termica, elettrica, meccanica, ecc – per soddisfare un fabbisogno netto dell'edificio che è pari al valore $Q_{H,nd}$.

A sua volta, il fabbisogno di generazione è definito secondo la seguente relazione:

$$Q_{gn,IN} = Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,c} + Q_{l,d} + Q_{l,gn} \quad (33)$$

dove:

- $Q_{l,e}$ sono le perdite totali di emissione [kWh];
- $Q_{l,c}$ sono le perdite totali di regolazione [kWh];
- $Q_{l,d}$ sono le perdite totali di distribuzione [kWh];
- $Q_{l,gn}$ sono le perdite totali di generazione [kWh].

A. Sottosistema di emissione

I sistemi di emissione dell'energia termica sviluppata dal generatore possono essere diversi, ognuno con un rendimento diverso a seconda della tipologia. Nello specifico si possono avere ventilconvettori, radiatori, bocchette d'aria calda, ecc.

Il contributo delle perdite di emissione è calcolato sulla base del rendimento di emissione η_e :

$$Q_{l,e} = Q_{H,nd} \cdot \frac{1-\eta_e}{\eta_e} \quad (34)$$

Il valore del rendimento è fornito dal prospetto 17 della UNI/TS 11300-2 – figura 15 – ed è significativamente influenzato dalle caratteristiche del locale e, in modo particolare, dalla sua altezza. Come si vede, il rendimento è espresso in funzione del carico termico medio annuo, ottenuto come

indicato nella nota a) dello stesso prospetto – dividendo cioè il fabbisogno annuo di energia termica utile, per il tempo convenzionale di esercizio dei terminali di emissione e per il volume lordo riscaldato del locale.

Tipo di terminale di erogazione	Carico termico medio annuo W/m^3 a)		
	<4	4-10	>10
	η_e		
Radiatori su parete esterna isolata (*)	0,95	0,94	0,92
Radiatori su parete interna	0,96	0,95	0,92
Ventilconvettori (**) valori riferiti a t_{media} acqua = 45 °C	0,96	0,95	0,94
Termoconvettori	0,94	0,93	0,92
Bocchette in sistemi ad aria calda (***)	0,94	0,92	0,90
Pannelli isolati annegati a pavimento	0,99	0,98	0,97
Pannelli non isolati annegati a pavimento (****)	0,98	0,96	0,94
Pannelli annegati a soffitto	0,97	0,95	0,93
Pannelli a parete	0,97	0,95	0,93

a) Il carico termico medio annuo, espresso in W/m^3 è ottenuto dividendo il fabbisogno annuo di energia termica utile espresso in Wh, calcolato secondo la UNI/TS 11300-1, per il tempo convenzionale di esercizio dei terminali di emissione, espresso in ore, e per il volume lordo riscaldato del locale o della zona espresso in metri cubi.

*) Il rendimento indicato è riferito ad una temperatura di mandata dell'acqua di 85 °C.
Per parete riflettente, si incrementa il rendimento di 0,01.
In presenza di parete esterna non isolata ($U > 0,8 W/m^2 K$) si riduce il rendimento di 0,04.
Per temperatura di mandata dell'acqua ≤ 65 °C si incrementa il rendimento di 0,03.

**) I consumi elettrici non sono considerati e devono essere calcolati separatamente.

***) Per quanto riguarda i sistemi di riscaldamento ad aria calda i valori si riferiscono a impianti con:

- griglie di ripresa dell'aria posizionate ad un'altezza non maggiore di 2,00 m rispetto al livello del pavimento;
- bocchette o diffusori correttamente dimensionati in relazione alla portata e alle caratteristiche del locale;
- corrette condizioni di funzionamento (generatore di taglia adeguata, corretto dimensionamento della portata di aspirazione;
- buona tenuta all'aria dell'involucro e della copertura.

****) I dati forniti non tengono conto delle perdite di calore non recuperate dal pavimento verso il terreno; queste perdite devono essere calcolate separatamente ed utilizzate per adeguare il valore del rendimento.

Figura 15: Rendimento di emissione η_e in locali di altezza minore di 4 m

Per sopperire alle perdite di emissione espresse dalla (34), il sistema dovrà soddisfare un fabbisogno di emissione totali pari a:

$$Q_{e,IN} = Q_{H,nd} + Q_{L,e} \quad (35)$$

B. Sottosistema di regolazione

la regolazione dell'impianto è molto importante per l'ottimizzazione di tutto il sistema. Un sistema di regolazione che non risponde

accuratamente e velocemente alla richiesta di energia genera oscillazioni di temperatura all'interno dell'ambiente causando incrementi degli scambi termici per trasmissione e ventilazione con l'esterno. Il rendimento di regolazione è un parametro che esprime la deviazione tra la quantità di energia richiesta in condizioni reali rispetto a quella ideale. Tale rendimento è influenzato da precisione dello strumento, velocità di risposta, taratura, ecc.

Indicato con η_c il rendimento di regolazione, le perdite totali di regolazione si calcolano come:

$$Q_{l,c} = Q_{e,IN} \frac{1-\eta_c}{\eta_c} \quad (36)$$

Anche in questo caso, il valore di η_c è fornito da un prospetto, riportato in figura 16.

Pertanto, oltre alle già citate perdite di emissione, il sistema dovrà sopperire anche a quelle di regolazione e soddisfare un fabbisogno di regolazione pari a:

$$Q_{c,IN} = Q_{e,IN} + Q_{l,c} \quad (37)$$

C. Sottosistema di distribuzione

Le perdite di distribuzione vengono calcolate sulla base del rendimento di distribuzione η_d applicato al fabbisogno di regolazione secondo la formula:

$$Q_{l,d} = Q_{c,IN} \frac{1-\eta_d}{\eta_d} \quad (38)$$

Come al solito, il rendimento in questione lo si ottiene dai prospetti della UNI/TS 11300-2. In particolare, sono presenti cinque prospetti che forniscono il valore di η_d in funzione dell'anno di costruzione dell'edificio e della tipologia di impianto, che può essere:

- Impianto autonomo;
- Impianto centralizzato a distribuzione orizzontale;
- Impianto centralizzato con montanti di distribuzione: montanti in traccia nei paramenti interni;

Tipo di regolazione	Caratteristiche	Sistemi a bassa inerzia termica	Sistemi ad elevata inerzia termica	
		Radiatori, convettori, ventilconvettori, strisceradianti ed aria calda	Pannelli integrati nelle strutture edilizie e disaccoppiati termicamente	Pannelli annegati nelle strutture edilizie e non disaccoppiati termicamente
Solo Climatica (compensazione con sonda esterna)		$1 - (0,6 \eta_u \gamma)$	$0,98 - (0,6 \eta_u \gamma)$	$0,94 - (0,6 \eta_u \gamma)$
Solo ambiente con regolatore	On off	0,94	0,92	0,88
	PI o PID	0,99	0,97	0,93
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,96	0,92
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,95	0,91
	P banda prop. 2 °C	0,95	0,93	0,89
Climatica + ambiente con regolatore	On off	0,97	0,95	0,93
	PI o PID	0,995	0,99	0,97
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 2 °C	0,97	0,96	0,94
Solo zona con regolatore	On off	0,93	0,91	0,87
	PI o PID	0,995	0,99	0,97
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 2 °C	0,94	0,92	0,88
Climatica + zona con regolatore	On off	0,96	0,94	0,92
	PI o PID	0,995	0,98	0,96
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,96	0,94
	P banda prop. 2 °C	0,96	0,95	0,93
Nota	γ rapporto apporti/perdite. η_u fattore di utilizzo degli apporti definito nella UNI/TS 11300-1.			

Figura 16: Rendimento η_{rg} di regolazione

- Impianto centralizzato con montanti di distribuzione: montanti in traccia nei paramenti interni o nell'intercapedine;
- Impianto centralizzato con montanti di distribuzione: montanti correnti nell'intercapedine.

A titolo di esempio viene riportato, in figura 17, il prospetto 21b.

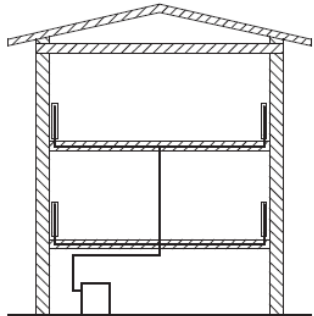
IMPIANTI CENTRALIZZATI A DISTRIBUZIONE ORIZZONTALE					
	Altezza edificio	Isolamento distribuzione			
		Legge 10/91 Periodo di realizzazione dopo il 1993	Discreto Periodo di realizzazione 1993-1977	Medio Periodo di realizzazione 1976-1961	Insufficiente Periodo di realizzazione prima del 1961
Fino a 3 piani		0,980	0,969	0,958	0,947
Oltre 3 piani		0,990	0,980	0,969	0,958

Figura 17: Rendimento η_g di distribuzione

Analogamente a quanto fatto nei sottosistemi precedenti, si ottiene il fabbisogno di distribuzione sommando le perdite appena calcolate al fabbisogno di regolazione:

$$Q_{d,IN} = Q_{c,IN} + Q_{l,d} \quad (39)$$

D. Sottosistema di generazione

Le perdite di generazione che tengono conto delle caratteristiche del generatore – caldaia – e delle sue modalità di utilizzo, si calcolano con la seguente formula:

$$Q_{l,gn} = Q_{d,IN} \frac{1-\eta_{gn}}{\eta_{gn}} \quad (40)$$

dove η_{gn} rappresenta il rendimento di generazione calcolato secondo i prospetti 23 della specifica tecnica: tali prospetti riferiti a diverse tipologie di generatore, sono costituiti da un valore di base più una serie di fattori di correzione che possono diminuire il valore del rendimento in funzione delle caratteristiche del generatore e della sua installazione.

Le tipologie di caldaie considerate nei prospetti sono:

- generatori di calore atmosferici tipo B, classificati 2 stelle;
- generatori di calore a camera stagna tipo C per impianti autonomi, classificati 3 stelle;

- generatori di calore a gas o gasolio, bruciatore ad aria soffiata o premiscelati, modulanti, classificati 2 stelle;
- generatori di calore a gas a condensazione, classificati 4 stelle;
- generatori ad aria calda a gas o gasolio con bruciatore ad aria soffiata o premiscelato, funzionamento on-off; generatori di aria calda a gas a camera stagna con ventilazione nel circuito di combustione di tipo B o C, funzionamento on-off.

Per quanto riguarda invece i fattori di correzione, si hanno:

- F1 rapporto tra la potenza del generatore installato e la potenza di progetto richiesta;
- F2 installazione all'esterno;
- F3 camino di altezza maggiore di 10m;
- F4 temperatura media di caldaia maggiore di 65 °C in condizioni di progetto;
- F5 generatore monostadio;
- F6 camino di altezza maggiore di 10 m in assenza di chiusura dell'aria comburente all'arresto;
- F7 temperatura di ritorno in caldaia nel mese più freddo.

A titolo di esempio si riporta il prospetto relativo alla terza tipologia di generatori.

Valore di base	F1			F2	F4	F5	F6
	1	1,25	1,5				
90	0	-1	-2	-1	-1	-1	-2
Nota	Per generatori antecedenti al 1996 valore di base 86. Per generatori classificati * (1 stella) valore di base 88.						
Nota	Valore di base riferito a: caldaia a due stelle, sovradimensionamento 1 riferito alla potenza nominale, installazione in centrale termica, chiusura aria comburente all'arresto (o bruciatore a premiscelazione totale), temperatura di mandata in condizioni di progetto <65 °C.						

Figura 18: Generatori di calore a gas o gasolio, bruciatore ad aria soffiata o premiscelati, modulanti, classificati ** (2 stelle)

Il fabbisogno di generazione è quindi ottenuto come segue:

$$Q_{gn,IN} = Q_{d,IN} + Q_{l,gn} \quad (41)$$

POTENZE ELETTRICHE E FABBISOGNO DEGLI AUSILIARI

Il fabbisogno di energia elettrica di un impianto di riscaldamento $Q_{H,aux}$ è determinato dalla somma dei fabbisogni di energia elettrica degli ausiliari dei sottosistemi di emissione $Q_{aux,e}$, distribuzione $Q_{aux,d}$ e produzione $Q_{aux,gn}$.

Il fabbisogno di energia ausiliaria è espresso in termini di energia elettrica, convertita con un opportuno fattore di conversione, in energia primaria.

Tale fabbisogno può essere determinato:

- in sede di progettazione dell'impianto;
- con misure sull'impianto;
- con metodo di calcolo basati su parametri di riferimento.

In particolare si farà riferimento all'ultimo metodo dal momento che non sono disponibili i dati necessari per l'applicazione di uno degli altri due.

Sottosistema di emissione

Il fabbisogno di energia per gli ausiliari elettrici del sottosistema di emissione è ricavato con la seguente relazione:

$$Q_{aux,e} = t_{gn} \cdot W_{vn} \quad (42)$$

dove t_{gn} rappresenta il tempo di funzionamento, espresso in [h], dell'impianto di generazione mentre W_{vn} proviene dal prospetto riportato in figura 19.

Sottosistema di regolazione

In accordo con la UNI/TS 11300-2, non si considerano fabbisogni elettrici per il sottosistema di regolazione.

Categoria di terminali	Tipologie	Fabbisogni elettrici unitari	
Terminali privi di ventilatore con emissione del calore per convezione naturale ed irraggiamento	Radiatori, convettori, strisce radianti, pannelli isolati dalle strutture ed annegati nelle strutture	Nulli	
Terminali di erogazione per immissione di aria calda	Bocchette e diffusori in genere	Si considerano compresi nella distribuzione dell'aria	
Terminali di erogazione ad acqua con ventilatore a bordo (emissione prevalente per convezione forzata)	Ventilconvettori, convettori ventilati, apparecchi in genere con ventilatore ausiliario	Portata d'aria m ³ /h	Potenza elettrica ^(*) W
		Fino a 200 m ³ /h	40
		Da 200 a 400 m ³ /h	50
Generatori d'aria calda non canalizzati ^(**)	Generatori pensili - Generatori a basamento - Roof top	Da 400 a 600 m ³ /h	60
		1 500	90
		2 500	170
		3 000	250
		4 000	350
		6 000	700
8 000	900		
(*) Valori di default da utilizzare in mancanza di dati forniti dal fabbricante.			
(**) Nel caso di generatori canalizzati il fabbisogno di energia elettrica del ventilatore deve essere compreso nella distribuzione.			

Figura 19: Fabbisogni elettrici dei terminali di erogazione del calore

Sottosistema di distribuzione

Il fabbisogno di energia elettrica per la distribuzione lo si ottiene dalla seguente relazione:

$$Q_{aux,d} = t_{gn} \cdot F_v \cdot W_{PO,d} \quad (43)$$

dove:

- $W_{PO,d}$ è la potenza elettrica della pompa nelle condizioni di progetto [W];
- t_{gn} è il tempo convenzionale di attivazione della pompa [h];
- F_v è un fattore che tiene conto della variazione della velocità della pompa, pari a 1 se la pompa è a velocità costante, a 0,6 se a velocità variabile.

Sottosistema di generazione

Per quanto riguarda la potenza degli ausiliari del generatore, si utilizza la seguente relazione empirica:

$$W_{aux,gn} = G + H \cdot \Phi_{gn}^n \quad (44)$$

dove:

- G, H, n sono parametri ricavabili dal prospetto B.4 della specifica tecnica, riportato in figura 20;
- Φ è la potenza termica utile nominale del generatore, secondo quanto fornito dalla data di targa dello stesso [kW].

Dalla (44) si ricava poi il fabbisogni di energia elettrica relativo al sottosistema di generazione semplicemente moltiplicando per t_{gn} .

Tipologia	Potenza	G	H	n
Generatori standard				
Generatori atmosferici a gas	Φ_{Pn}	40	0,148	1
	Φ_{Pint}	40	0,148	1
	Φ_{Po}	15	0	0
Generatori con bruciatore ad aria soffiata a combustibili liquidi e gassosi	Φ_{Pn}	0	45	0,48
	Φ_{Pint}	0	15	0,48
	Φ_{Po}	15	0	0
Generatori a bassa temperatura				
Generatori atmosferici a gas	Φ_{Pn}	40	0,148	1
	Φ_{Pint}	40	0,148	1
	Φ_{Po}	15	0	0
Generatori con bruciatore ad aria soffiata a combustibili liquidi e gassosi	Φ_{Pn}	0	45	0,48
	Φ_{Pint}	0	15	0,48
	Φ_{Po}	15	0	0
Generatori a condensazione a combustibili liquidi e gassosi	Φ_{Pn}	0	45	0,48
	Φ_{Pint}	0	15	0,48
	Φ_{Po}	15	0	0

Figura 20: Parametri per il calcolo della potenza degli ausiliari

CAPITOLO II

Il foglio di calcolo implementato

Le formule della specifica tecnica, riportate nel precedente capitolo, sono state utilizzate per realizzare un foglio Excel che, previo l'inserimento del minor numero di dati possibili, permettesse di effettuare il calcolo del fabbisogno energetico per il riscaldamento e del fabbisogno di energia primaria, il più conforme possibile con quanto descritto dalla normativa stessa.

Nel presente capitolo verrà dunque descritto il programma realizzato, mettendo in evidenza i dati d'ingresso necessari al calcolo, le ipotesi semplificative – alcune delle quali sono già state illustrate nel capitolo precedente e non verranno pertanto riprese –, l'analisi di sensitività eseguita su una vasta serie di parametri con lo scopo di giustificare eventuali approssimazioni ovvero evidenziare le grandezze che più incidono sul risultato, la validazione del programma su edifici su cui è stata eseguita la certificazione energetica e, infine, l'introduzione di alcuni fattori corretti necessari per tenere conto delle effettive ore di funzionamento degli impianti.

2.1 Ipotesi semplificative

Col fine di ottenere un programma il più snello possibile, sono state effettuate alcune semplificazioni che non hanno riguardato le formule fornite dalla UNI/TS 11300, ma soltanto i valori che in queste equazioni compaiono. Tale scelta talvolta è stata necessaria, causa mancanza di un numero adeguato di informazioni sugli edifici sotto analisi, talvolta invece è stata compiuta consapevolmente, giustificandola a priori e/o a posteriori del calcolo, dal momento che l'ottenimento dell'informazione come prevista da specifica tecnica, avrebbe comportato un dispendio di tempo non legittimato poi da una variazione significativa nei risultati.

Pertanto, le semplificazioni adottate risultano essere le seguenti:

- Per ciascun edificio, è stata scelta un'unica *dimensione delle finestre*. In realtà, spesso, un edificio è costituito da finestre di dimensioni diverse ma, per evitare di complicare eccessivamente il file di calcolo, è stata dimensionata un'unica finestra significativa: in questo modo lo stesso foglio di calcolo può essere utilizzato, senza effettuare modifiche strutturali, per un qualsiasi edificio – viceversa, il foglio Excel avrebbe dovuto prevedere un numero arbitrario di celle per consentire l'inserimento di un numero variabile di dati relativi alle finestre, venendo in qualche modo meno all'obiettivo prefissato. Nel prossimo paragrafo sarà illustrata la logica con cui viene dimensionata la finestra significativa di ciascun edificio;
- Per quanto riguarda la *tipologia di vetro*, si è scelta la stessa soluzione per tutti gli edifici – vista la vastità di edifici analizzati e la scarsità di dati a disposizione, non è stato possibile fare altrimenti;
- Sulle *pareti opache* si è tenuta la stessa strategia: per tutti gli edifici si è infatti considerata un'unica tipologia di parete, con la stessa struttura – materiali e spessore;

- Tutti gli edifici sono visti come dei *parallelepipedi* formati da quattro pareti laterali verticali e due superfici orizzontali – copertura e pavimentazione, di ugual dimensione. Ciascuna parete verticale dovrà avere un proprio *orientamento* – nord, sud, est, ovest – in modo da poter ricavare il corrispettivo valore di irraggiamento solare: naturalmente non sempre le pareti sono perfettamente orientate in queste quattro direzioni quindi, di volta in volta, occorrerà adattare, nel miglior modo possibile, l'edificio a questa semplificazione;
- Ogni edificio ha un'unica *destinazione d'uso prevalente*: tale ipotesi è molto forte dal momento che la destinazione d'uso influenza notevolmente i risultati finali, ma è necessaria per ottenere un foglio di calcolo univoco – vale lo stesso discorso relativo alle diverse dimensioni delle finestre di un edificio;
- Assenza di *ambienti non climatizzati interni* agli edifici: tale ipotesi è retta dal fatto che tali spazi sono effettivamente assenti o comunque se presenti, sono di dimensioni tali da non comportare una variazione significativa del fabbisogno di energia termica;
- Assenza di *ambienti climatizzati a temperatura differente*, poiché la temperatura interna per il riscaldamento è scelta pari a 20 °C, in accordo con la normativa vigente;
- *Ombreggiatura* dovuta ad ostruzioni esterne piuttosto che ad oggetti verticali ed orizzontali trascurata;
- Relativamente al sottosistema di emissione, si è scelto di considerare che tutti gli edifici fossero muniti dello stesso *terminale di erogazione* – nello specifico si considera il ventilconvettore, più noto col termine inglese fan coil;
- Per quanto riguarda il *sottosistema di regolazione*, analogamente a quanto fatto per quello di emissione, si è considerata la stessa tipologia di regolazione – solo ambiente, quindi senza

compensazione climatica con sonda esterna, con regolatore di tipo PI o PID;

- Infine, per la *distribuzione*, si è ancora optato per una scelta univoca in tutti gli edifici analizzati – nel dettaglio si è considerato di avere a disposizione impianti centralizzati a distribuzione orizzontale.

Come detto, a supporto di tali scelte, il paragrafo 2.4 fornirà un'indicazione sulla bontà delle semplificazioni adottate e su quanto una valutazione erronea di un parametro possa influenzare il fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale ottenuto.

2.2 Dati d'ingresso

Il foglio di calcolo realizzato, è stato pensato per fornire una valutazione di tipo standard dove, si ricorda, i dati dell'edificio e dell'impianto corrispondono ai valori reali mentre per i dati relativi alle modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio e dell'impianto si assumono valori convenzionali di riferimento. Tale scelta permette infatti di fare spesso ricorso ai prospetti che la normativa offre, riducendo così la quantità di informazioni dettagliate – relative ad edifici ed impianti – che occorre possedere: ciò, ovviamente, si riflette nel risultato finale che risulterà pertanto meno accurato di una valutazione adattata all'utenza, realizzata considerando solo ed esclusivamente valori reali, misurati – talvolta con molta difficoltà: basti pensare all'indice di affollamento piuttosto che ai ricambi d'aria per ventilazione – sul campo.

In definitiva, i dati e le informazioni strettamente necessarie per l'ottenimento del fabbisogno energetico per il riscaldamento e, di conseguenza, del fabbisogno di energia primaria, risultano essere:

- Superficie netta calpestable climatizzata;

- Superficie involucro disperdente ottenuta come somma delle superfici relative alle quattro pareti verticali, alla copertura e alla pavimentazione;
- Volume lordo riscaldato;
- Ripartizione tra superficie opaca e superficie trasparente su ciascuna delle quattro pareti verticali dell'edificio;
- Orientamento delle pareti dell'edificio secondo la corrispettiva ipotesi del paragrafo precedente;
- Destinazione d'uso prevalente dell'edificio – scolastica, ad uso uffici, ecc.;
- Zona climatica a cui appartiene l'edificio;
- Descrizione della superficie opaca – tipologia e spessore di parete, materiale con cui è costruita – necessaria per il calcolo della trasmittanza della stessa attraverso i prospetti della normativa;
- Descrizione della superficie trasparente – dimensione della finestra significativa e tipologia di vetro – necessaria per il calcolo della trasmittanza della stessa attraverso i prospetti della normativa;
- Ore di funzionamento giornaliero dell'impianto di riscaldamento;
- Giorni di funzionamento annuale dell'impianto di riscaldamento.

A questo punto è necessario spendere qualche parola sulla scelta e sul conteggio della finestra significativa di ciascun edificio. La logica con cui quest'elemento è dimensionato è quella di avere, circa, lo stesso rapporto superficie trasparente di una parete su superficie totale della stessa, nei seguenti due casi:

- caso reale, ottenuto sommando le superfici, anche diverse, delle finestre che realmente compongono la parete in esame;
- caso ideale, ottenuto sommando la superficie di un numero fittizio – intero – di finestre significative.

2.3 Descrizione del foglio di calcolo implementato

A questo punto vengono riportate alcune immagini del foglio di calcolo realizzato con la descrizione sintetica degli elementi principali – si tenga presente che il file Excel fa uso di su oltre trecento celle per effettuare i calcoli previsti dalla normativa.

In particolare, relativamente alla colorazione delle celle, varrà la seguente legenda:

- celle con sfondo rosa: informazioni di carattere descrittivo;
- celle con sfondo verde: dati di ingresso;
- celle con sfondo giallo: dati provenienti dai prospetti della UNI/TS 11300;
- celle con sfondo bianco: celle di calcolo oppure contenenti valori che, in prima approssimazione, possono essere non modificati;
- celle con sfondo ocra: fabbisogni di energia.

2.3.1 Anagrafica edificio

A	B	C	D	E	F	G	H	I
ANAGRAFICA EDIFICIO								
Num. Edificio	Localizzazione	Sede	Campus	Denominazione Edificio		Indirizzo	CAP	Edificio

Figura 21: Vista del file Excel – Anagrafica edificio

Nelle celle di figura 21 sono contenuti una serie di dati relativi all’anagrafica dell’edificio in esame. Pertanto, la loro funzione è semplicemente quella di identificare in modo univoco la struttura – il riempimento di tutti i campi non è strettamente necessario.

2.3.2 Involucro edificio

In questa sezione sono riportate le proprietà strutturali dell’edificio. Nella prima parte vengono richiesti superficie netta calpestabile e volume lordo riscaldato – dati d’ingresso –, superficie totale dell’involucro disperdente – ottenuta come somma delle sei superfici che compongono l’edificio di forma parallelepipedale – e l’altezza media del piano – necessaria per la lettura di alcuni prospetti. Quindi, per ciascuna parete verticale orientata, vengono richieste la superficie trasparente e totale – dati d’ingresso – da cui si ricava la superficie opaca. In figura 22 è riportata soltanto la parete relativa al lato nord.

J	K	L	M	N	O	P	Q
INVOLUCRO EDIFICIO							
Superficie Netta Calpestabile e Climatizzata [mq]	Superficie involucro disperdente [mq]	Volume Lordo Riscaldato [mc]	Altezza media piano	Parete Nord			
				Superficie Trasparente [mq]	Superficie Trasparente [%]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]

Figura 22: Vista del file Excel – dati relativi a involucro edificio

2.3.3 Utilizzo edificio

AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY
UTILIZZO EDIFICIO													
Cod.	Destinazione d'uso prevalente	Ore di utilizzo giornaliero							Ore di funzionamento giornaliero medie [h]	Tot ore/settimana	Zona Climatica	Giorni/Anno Funzionamento Impianto Termico	Ore/Anno Funzionamento Impianto Termico
		Lun	Mart	Mer	Gio	Ven	Sab	Dom					
		24	24	24	24	24	24	24	24	192	E	183	4392

Figura 23: Vista del file Excel – utilizzo edificio

In questa parte sono richiesti i dati relativi all'utilizzo dell'edificio. Il codice e la destinazione d'uso prevalente sono utilizzati nel prospetto 8 della UNI/TS 11300-1 riportato precedentemente in figura 11 e, come detto, sono parametri critici: infatti si sta assumendo che un edificio abbia, tra le possibili categorie previste dal prospetto – scolastici, industriali, uffici, mense, ecc. –, per l'appunto un'unica destinazione d'uso, mentre nella realtà non sempre ciò accade. Ma, come al solito, si vedrà l'influenza di tale semplificazione nel paragrafo 2.4.

Nelle altre celle troviamo le ore di utilizzo giornaliero dell'impianto, il totale settimanale, il codice identificativo della zona climatica da cui ricavare i giorni, e quindi le ore, di funzionamento stagionale dell'impianto termico. Come si vede, queste ultime celle contengono già dei valori; ciò è dovuto al fatto che la specifica tecnica in questione, per valutazioni di progetto e standard, richiede di considerare un regime di funzionamento continuo dell'impianto di climatizzazione durante tutta la durata legale della stagione di riscaldamento. Ciò porta ovviamente a sovradimensionare, rispetto ai consumi reali, il valore del fabbisogno di energia primaria calcolato – ma di questo ne si parlerà, in maniera approfondita, soltanto in seguito.

2.3.4 Scambi termici per trasmissione

AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ
SCAMBI TERMICI PER TRASMISSIONE										
Scambi termici per trasmissione - PARETI OPACHE					Scambi termici per trasmissione - PARETI TRASPARENTI					
Descrizione Parete	Spessore Medio Pareti [m]	Trasmittanza Termica media [W/(mqK)]	Maggiorazione percentuale relativa alla presenza di ponti termici	Trasmittanza Termica Maggiorata [W/(mqK)]	Descrizione Parete	Spessore Medio [mm]	Trasmittanza Termica Vetro [W/(mqK)]	Superficie Media Finestra [mq]	Numero Finestre	Trasmittanza Termica Finestre [W/(mqK)]

Figura 24: Vista del foglio Excel – scambi termici per trasmissione, parte A

BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU
SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE										
Scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati			Scambio Termico per Trasmissione verso il Terreno		Scambio termico verso	Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione				
Area Solaio su Ambiente non Climatizzato [mq]	Fattore di Correzione	Trasmittanza termica dei solai a terra su ambienti non climatizzati	Area Solaio su Terreno [mq]	Trasmittanza verso il Terreno	Trasmittanza verso altre zone a differente temperatura	Hd	Hu	Hg	Ha	Coefficiente di scambio termico per trasmissione: Htr,adj [W/K]
							0		0	

Figura 25: Vista del foglio Excel – scambi termici per trasmissione, parte B

In figura 24 è illustrato il calcolo dello scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno, relativo rispettivamente alle pareti opache e trasparenti. I valori delle trasmittanze sono ricavati dai prospetti della normativa in base alla descrizione della parete e allo spessore medio della stessa. In figura 25 invece, si trovano gli scambi termici per

trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati e verso altre zone climatizzate a temperatura diversa – entrambi nulli in base alle ipotesi semplificative precedentemente discusse – e lo scambio termico per trasmissione verso il terreno – ricavato come al solito dai prospetti della specifica tecnica. Dalla somma dei quattro coefficienti si ottiene il coefficiente di scambio termico per trasmissione.

2.3.5 Scambio termico per ventilazione

BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD
SCAMBIO TERMICO PER VENTILAZIONE								
Scambio Termico Per Ventilazione								
Portata d'aria esterna di Rinnovo: q _{aria,pers} [10 ⁻³ mc/s per persona]	Indice di Affollamento: n _s [persone/mq]	Fattore di correzione indice affollamento	Portata su Tempo: q _{ve,k}	Frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria: f _{ve,t,k}	Portata Mediata sul tempo del flusso d'aria: q _{ve,k,mn} [mc/s]	Capacità Termica Volumetrica Aria [J/(mcK)]	Fattore di correzione della temperatura: b _{ve,k}	Coefficiente di scambio Termico per Ventilazione: H _{ve,adj} [w/K]
		0,6		1		1200	1	

Figura 26: Vista del foglio Excel – scambi termici per ventilazione

In figura 26 è rappresentato il calcolo dello scambio termico per ventilazione. La portata d'aria esterna di rinnovo è ottenuta dalla UNI 10339 – Impianti aeraulici a fini di benessere – ed è funzione della destinazione d'uso prevalente dell'edificio – i valori sono riportati in un foglio del documento Excel realizzato e la cella viene riempita in automatico una volta impostata la destinazione d'uso; in modo del tutto analogo funziona l'indice di affollamento. La semplificazione adottata, di considerare un'unica destinazione d'uso per ciascun edificio, influenza,

come detto, in maniera significativa il risultato finale proprio a causa di questi due fattori. La UNI/TS 11300-1 dice poi di considerare, ai fini della determinazione della portata d'aria di progetto, il valore dell'indice di affollamento pari al 60% di quanto riportato nella norma precedentemente citata – da cui il fattore di correzione dell'indice di affollamento. Gli altri parametri fissati sono la frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria – nell'ipotesi di sistemi a portata fissa – la capacità termica volumetrica dell'aria e il fattore di correzione della temperatura – pari a 1 se, come accade spesso, la temperatura di mandata è pari a quella esterna. Applicando le formule riportate nel capitolo precedente, si ottiene quindi il coefficiente di scambio termico per ventilazione.

2.3.6 Extra flusso termico per radiazione infrarossa verso la volta celeste

CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK
SCAMBIO TERMICO						
Extra Flusso Termico per Radiazione Infrarossa verso la volta celeste						
Differenza tra temperatura dell'aria esterna e temperatura apparente del cielo; $\Delta\theta_{er}$ [K]	Coefficiente di scambio termico esterno per irraggiamento [W/mqK] - PARETI OPACHE	Coefficiente di scambio termico esterno per irraggiamento [W/mqK] - PARETI TRASPARENTI	Resistenza termica superficiale esterna del componente: R_s [mqK/W]	Extra Flusso mediato sul tempo [W]	Fattore di forma	Extra Flusso Termico per Radiazione Infrarossa: [W]
11	4,5	4,185	0,04		0,5	

Figura 27: Vista del foglio Excel – Extra flusso termico per radiazione infrarossa

In questa sezione viene eseguito il calcolo dell'extra flusso termico per irradiazione. Come si nota dalla figura 27 molti dei parametri sono fissati. In particolare abbiamo la differenza tra la temperatura dell'aria esterna e

la temperatura apparente del cielo – da normativa pari a $11 K$ –, il coefficiente di scambio termico per irraggiamento riferito a superfici opache o trasparenti – e calcolato in modo univoco per tutti gli edifici –, la resistenza termica superficiale esterna del componente – da normativa UNI 6946 sulle “Caratteristiche termiche delle strutture edilizie” secondo cui, ai fini del calcolo dei consumi energetici, tale grandezza assume un valore di default pari a $0,04$ – e il fattore di forma – pari a 1 per pareti orizzontali e a $0,5$ per pareti verticali: dal momento che quest’ultime sono dominanti, si esegue l’approssimazione riportata in figura.

2.3.7 Scambio termico mensile

CL	CM	CN	CO	CP
SCAMBIO TERMICO MENSILE				
Gennaio				
Temperatura Esterna Media: Θ_e [°C]	Giorni di Funzionamento	Scambio Termico per Trasmissione [MJ]	Scambio Termico per Ventilazione [MJ]	Scambio Termico Mensile: QH_{ht} [MJ]
1,7	31			

Figura 28: Vista del foglio Excel – Scambio termico mensile

A questo punto si esegue il calcolo dello scambio termico per ciascun mese noti i coefficienti di scambio termico per trasmissione, per ventilazione, l’extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa – calcolati nelle sezioni precedenti –, la temperatura esterna media mensile – da UNI 10349, sui “Dati climatici italiani” – e i giorni di funzionamento dell’impianto – pari, in base a quanto detto in precedenza circa la

condizione di funzionamento continuativa, ai giorni che compongono il mese. In figura 28 è riportato un esempio di calcolo relativo al mese di gennaio.

2.3.8 Flusso termico prodotto da sorgenti interne

DV	DW
APPORTI TERMICI	
Flusso Termico prodotto da Sorgenti Interne	
Apporti Medi Globali per Unità di Superficie Utile di Pavimento [W/mq]	Flusso Termico Prodotto da Sorgenti Interne: $\Phi_{int,mn,k}$ [W]

Figura 29: Vista del foglio Excel – flusso termico prodotto da sorgenti interne

Il calcolo degli apporti termici, grazie al noto prospetto 8 della UNI/TS 11300-1 che fornisce i valori degli apporti medi globali specifici in funzione della destinazione d'uso prevalente dell'edificio, risulta assai rapido come si evince dalla figura 29. Per ottenere il flusso termico prodotto da sorgenti interne infatti, basta moltiplicare tale valore per la superficie utile di pavimento.

2.3.9 Flusso termico di origine solare

A differenza del caso precedente, il calcolo del flusso termico di origine solare risulta assai più articolato. È infatti richiesto:

- il fattore di riduzione degli apporti solari relativo a schermature mobili, ottenuto dal prodotto del fattore di ombreggiatura relativo

- ad ostruzioni esterne, aggetti orizzontali e aggetti verticali. Tuttavia, come giustificato in precedenza, tale fattore viene trascurato – e posto quindi pari a 1;
- il fattore di esposizione assunto, in base a quanto riferito dalla specifica tecnica, pari a 0,9;
 - la trasmittanza di energia solare totale, ottenuta anch'essa dalla medesima normativa;
 - la frazione di area relativa al vetro, pari all'80 % della finestra – scelta obbligata per poter utilizzare i prospetti della normativa relativi alla trasmittanza delle finestre;
 - le aree di captazione solare effettiva dovute a componenti opachi e trasparenti e riferite a ciascuna parete, secondo le equazioni del capitolo precedente;
 - il fattore di assorbimento, dipendente dal colore della parete opaca – si considera per tutti gli edifici un colore medio.

DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK
APPORTI TERMICI SOLARI													
Flusso Termico di origine solare													
Fattore Di Riduzione degli Apporti Solari relativo a Schermature Mobili: Fsh,gl	Fattore di Esposizione fw	Trasmittanza di Energia Solare Totale eg	Frazione di Area Relativa al Vetro: (1-Ff)	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Trasparente - PARETE NORD	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Trasparente - PARETE SUD	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Trasparente - PARETE EST	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Trasparente - PARETE OVEST	Fattore di Assorbimento Solare	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Opaco - PARETE NORD	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Opaco - PARETE SUD	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Opaco - PARETE EST	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Opaco - PARETE OVEST	Area di Captazione Solare Effettiva dovuta a Componente Opaco - PARETE COPERTURA
1	0,9	0,75	0,8					0,6					

Figura 30: Vista del foglio Excel – flusso termico di origine solare

2.3.10 Parametri dinamici

In figura 31 è riportato il calcolo dei parametri dinamici che permettono di ottenere il valore mensile del fattore di utilizzazione degli apporti termici. Ricavata la capacità termica interna per unità di superficie da prospetto, si

ottiene la costante di tempo termica e quindi il parametro numerico adimensionale a_H , che da essa dipende. L'altro parametro dinamico, ovvero il rapporto adimensionale di bilancio termico sarò calcolato, mese per mese, nel paragrafo successivo.

EM	EN	EO
PARAMETRI DINAMICI		
Capacità termica interna per unità di superficie [kJ/(mq*K)]	Costante di Tempo Termica [h]	a_H

Figura 31: Vista del foglio Excel – parametri dinamici

2.3.11 Fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale

A questo punto si può procedere al calcolo del fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale. Dapprima si calcola il rapporto adimensionale di bilancio termico mensile che permette in seguito di ottenere il fattore di utilizzazione degli apporti termici. Quindi, si procede al calcolo del fabbisogno di energia termica mensile sottraendo agli scambi termici mensili precedentemente calcolati, gli apporti termici corretti col relativo fattore. Non resta che sommare i valori mensili per ottenere il fabbisogno ideale di energia termica espresso in [MJ] e in [kWh], come illustrato in figura 32.

FZ	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GG
FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA PER IL RISCALDAMENTO							
Dicembre						Totale Fabbisogno Ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: QH,nd [MJ]	Totale Fabbisogno Ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: [kWh]
Apporti Termici Interni : Q _{int} [MJ]	Apporti Termici Solari : Q _{sol} [MJ]	Apporti Termici Totali : Q _{gn} [MJ]	Rapporto adimensionale di bilancio termico: Y _H	Fattore di Utilizzazione degli Apporti Termici: η _{H,gn}	Fabbisogno Ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: Q _{H,nd} [MJ]		

Figura 32: Vista del foglio Excel – fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

2.3.12 Sottosistema di Emissione

HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW
RENDIMENTO DI EMISSIONE						
Sottosistema di Emissione						
Tempo Convenzionale di Esercizio dei terminali di Emissione [h]	Carico Termico Medio Annuo [W/mc]	Riduzione Rendimento di Emissione	Rendimento di Emissione	Rendimento di Emissione Corretto	Perdite Totali di Emissione [kWh]	Fabbisogno di Emissione
4392		0,04				

Figura 33: Vista del foglio Excel – rendimento del sottosistema di emissione

Noto il tempo convenzionale di funzionamento dell'impianto – regime continuativo – si ottiene il carico termico medio annuo da utilizzare

esclusivamente per la lettura del prospetto relativo ai rendimenti del sottosistema di emissione. Nel paragrafo relativo alle ipotesi semplificative, si è detto di considerare per tutti gli edifici lo stesso terminale di erogazione – fan coil – pertanto il rendimento sarà scelto solamente tra tre valori, in funzione proprio del carico termico. È inoltre presente un fattore correttivo dovuto alla presenza di parete non isolata. A partire dal rendimento appena calcolato e dal fabbisogno di energia termica per il riscaldamento, si ottengono le perdite e il fabbisogno di emissione, come illustrato in figura 33.

2.3.13 Sottosistema di regolazione e di distribuzione

Per entrambi i sottosistemi di regolazione e distribuzione il calcolo è assai semplice. Infatti, noti i rendimenti da prospetto – si è fatta una semplificazione nel relativo paragrafo su entrambi i sottosistemi – si ottengono nell’ordine, le perdite e quindi i fabbisogni di regolazione e di distribuzione.

HX	HY	HZ	IA	IB	IC
RENDIMENTO DI REGOLAZIONE			RENDIMENTO DI DISTRIBUZIONE		
Sottosistema di Regolazione			Sottosistema di Distribuzione		
Rendimento di Regolazione	Perdite totali di Regolazione [kWh]	Fabbisogno di Regolazione	Rendimento di Distribuzione	Perdite Totali di Distribuzione [kW]	Fabbisogno di Distribuzione [kW]
0,97			0,988		

Figura 34: Vista del foglio Excel – rendimento del sottosistema di regolazione e di distribuzione

2.3.14 Sottosistema di generazione

ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO
RENDIMENTO DI GENERAZIONE											
Sottosistema di Generazione										Fabbisogno Globale di Energia Primaria [kWh]	Rendimento Medio Stagionale dell'Impianto
Rendimento di Base	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	Rendimento di Generazione [kW]	Perdite Totali di Generazione [kW]		

Figura 35: Vista del foglio Excel – rendimento del sottosistema di generazione

Infine, si passa al sottosistema di generazione. Il rendimento viene calcolato come descritto nel paragrafo precedente; si ottengono così le perdite totali di generazione e quindi il fabbisogno di tale sottosistema che corrisponde poi, a meno degli apporti relativi agli ausiliari elettrici – non considerati in figura 35–, al fabbisogno globale di energia primaria per la climatizzazione invernale. Il rendimento medio stagionale dell’impianto è poi ottenuto come rapporto tra il fabbisogno di energia ideale per il riscaldamento e l’ultimo fabbisogno calcolato – o, in alternativa, come prodotto tra i rendimenti dei quattro sottosistemi.

2.4 Analisi sensitività

Per analisi di sensitività s’intende lo studio delle variazioni del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale al variare di uno o più parametri che lo determinano. I parametri presi in esame, possono essere suddivisi in due categorie:

- parametri richiesti come dati di ingresso;

- parametri assunti costanti in accordo con le ipotesi semplificative precedentemente discusse.

Allo stesso modo, anche l'obiettivo dell'analisi assume due sfumature differenti. Per quanto riguarda i parametri appartenenti alla prima categoria infatti, lo scopo dell'analisi di sensitività vuole essere quello di fornire una sorta di indice sull'accuratezza con cui i valori di tali grandezze devono essere forniti allo strumento di calcolo implementato: si andrà quindi a classificare tali parametri in base all'incidenza che una loro variazione comporta sul risultato finale. Relativamente alla seconda categoria, dal momento che tali valori rimangono costanti su tutti i casi di studio analizzati, lo scopo dell'analisi sarà quello di validare l'ipotesi semplificativa adottata, mostrando come una variazione significativa del parametro in esame non si traduce in una variazione altrettanto significativa del fabbisogno di energia primaria.

Tale analisi è stata anch'essa eseguita tramite la creazione di alcuni fogli elettronici per mezzo di Excel. In particolare, sono stati scelti tre edifici significativi – tra quelli che appartengono al caso di studio descritto nel capitolo 3 – e, tramite il pannello di controllo illustrato in figura 36, si va a valutare, in seguito alla variazione di uno o più parametri, l'errore annesso così definito:

$$Error_{e\%} = \frac{Fabbisogno_{variato} - Fabbisogno_{corretto}}{Fabbisogno_{corretto}} \quad (45)$$

Come si vede dalla figura, è possibile valutare non solo l'influenza del singolo parametro, ma anche l'interazione tra questi – fino ad un massimo di sei soluzioni differenti; nelle celle grigie, sono riportati i valori originali per ciascun edificio mentre nell'ultima riga rossa sono inserite informazioni sulla tipologia di dato da inserire:

- % indica che è richiesta una variazione percentuale, positiva o negativa, rispetto al valore originale;
- *Cod.* indica che è richiesto il codice che caratterizza la destinazione d'uso dell'edificio;

- h indica che sono richieste le ore di funzionamento giornaliere;
- gg indica che sono richiesti i giorni di funzionamento settimanale;
- η indica che è richiesto un nuovo valore di rendimento.

Le grandezze oggetto di studio sono:

- Dati di ingresso
 - Superficie involucro disperdente;
 - Ripartizione parete opaca-trasparente;
 - Volume lordo riscaldato;
 - Superficie netta calpestabile climatizzata;
 - Destinazione d'uso prevalente
 - Apporti interni;
 - Indice di affollamento;
 - Portata d'aria di rinnovo;
 - Trasmittanza pareti trasparenti;
 - Orientamento pareti;
- Dati costanti in tutti i casi di studio
 - Trasmittanza pareti opache;
 - Ore di funzionamento giornaliere;
 - Giorni di funzionamento settimanali;
 - Rendimento di emissione, regolazione, distribuzione, generazione;
 - Capacità termica interna.

Prima di procedere con l'analisi vera e propria, è necessario fare una precisazione fondamentale: quello che si va a valutare non è la reale incidenza di tali parametri nel fabbisogno di energia primaria di un edificio ma è l'incidenza di tali parametri all'interno del metodo di calcolo – del fabbisogno di energia primaria di un edificio – descritto dalla UNI/TS 11300 e implementato, con una serie di semplificazioni

aggiuntive, nel foglio di calcolo precedentemente descritto. Comprendere questa differenza è necessario per giustificare i risultati che saranno presentati. Si vedrà infatti che alcuni parametri avranno un'incidenza significativamente diversa da quello che sarebbe lecito aspettarsi in base all'esperienza comune. Ma ciò non è contraddittorio: vuol dire semplicemente che i suddetti parametri hanno un maggiore, o minore, peso nelle formule utilizzate.

Inoltre, alcune delle grandezze precedentemente citate presentano una forte dipendenza l'una dall'altra – in particolare quelle legate alle dimensioni dell'edificio. Tali correlazioni tuttavia non sono automaticamente considerate: ad esempio, ai fini dell'analisi di sensitività, si potrà variare la superficie dell'involucro disperdente, senza modificare il volume lordo riscaldato o la superficie utile di pavimento.

2.4.1 Volume lordo riscaldato

A riprova di quanto appena descritto, si esegue dapprima l'analisi di sensitività rispetto al volume lordo riscaldato. Come si vede da figura 37, tale grandezza non influenza affatto il calcolo del fabbisogno di energia primaria dal momento che la stessa viene utilizzata solamente per il calcolo, a posteriori, di alcuni indici di prestazione energetica.

2.4.2 Superficie involucro disperdente

Come mostrato in figura 38, la superficie dell'involucro disperdente ha un impatto notevole sul calcolo del fabbisogno. Per questo motivo, bisogna prestare particolare attenzione a questo dato – il più delle volte tuttavia, il reperimento di un valore corretto non è problematico. Innanzitutto, guardando il grafico, si nota la simmetria puntuale rispetto alla variazione nulla della superficie dell'involucro disperdente: ciò vuol dire che ritocchi



Figura 37: Analisi di sensitività – volume lordo riscaldato

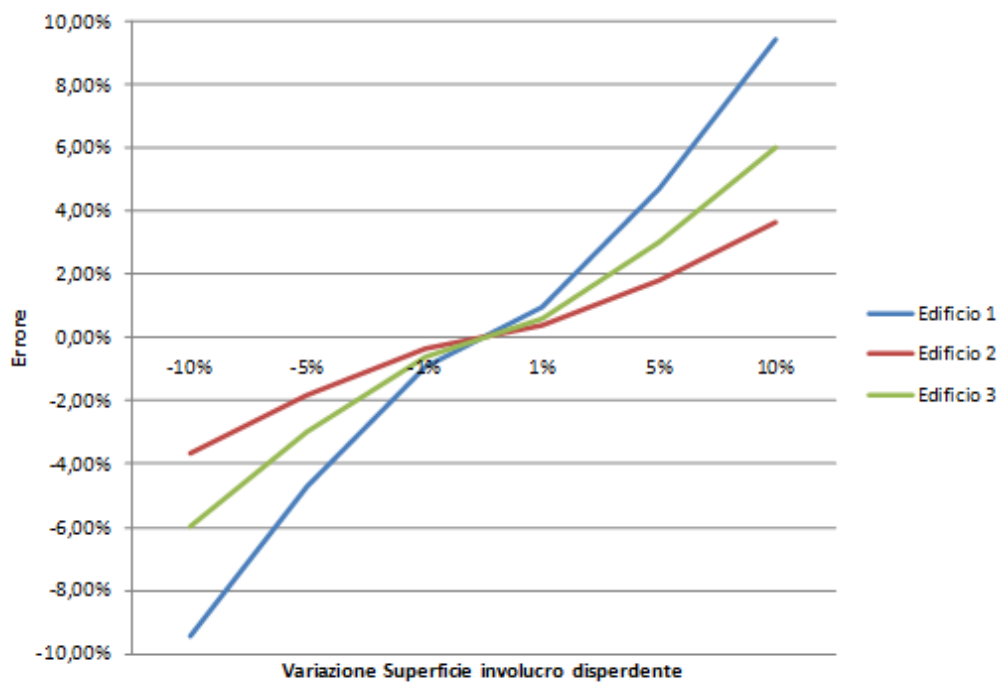


Figura 38: Analisi di sensitività – superficie involucro disperdente

in positivo o in negativo di tale grandezza provocano lo stesso effetto, in valore assoluto, sul fabbisogno finale.

Il secondo aspetto è che nei diversi edifici, il peso sul risultato finale è variabile. Ciò è dovuto al differente rapporto tra scambio termico per trasmissione e per ventilazione. Infatti, mentre lo scambio termico per trasmissione è linearmente dipendente con la superficie dell'involucro disperdente – e quindi varia nei tre edifici in maniera proporzionale –, quello per ventilazione non lo è. Ne segue che nemmeno lo scambio termico totale, essendo questo somma di un termine linearmente dipendente e di uno non linearmente dipendente, potrà avere un legame lineare con il parametro oggetto di analisi. Relativamente all'Edificio 1, lo scambio termico per trasmissione domina quello per ventilazione, mentre nell'Edificio 2 accade il contrario – l'Edificio 3 è una via di mezzo tra queste due situazioni. Per questo motivo si avrà un'influenza maggiore della superficie disperdente nel primo caso, in accordo con quanto mostrato in figura. Ciò è legato, ancora una volta, alla scelta della destinazione d'uso prevalente. Infatti, la portata mediata sul tempo del flusso d'aria $q_{ve,k,mn}$, dipendente linearmente dal prodotto tra l'indice di affollamento n_s e la portata esterna di rinnovo $q_{aria,pers}$, vale:

- Edificio 1: $q_{ve,k,mn} = A_{pavimento_1} \cdot n_s \cdot q_{aria,pers} = 0,66 \cdot A_{pavimento_1}$
- Edificio 2: $q_{ve,k,mn} = A_{pavimento_2} \cdot n_s \cdot q_{aria,pers} = 4,22 \cdot A_{pavimento_2}$
- Edificio 3: $q_{ve,k,mn} = A_{pavimento_3} \cdot n_s \cdot q_{aria,pers} = 2,11 \cdot A_{pavimento_3}$

Si veda, ad esempio, che lo scambio termico per ventilazione nell'edificio 2, avendo al suo interno il fattore moltiplicativo 4,22, avrà un peso maggiore nel bilancio e quindi il risultato sarà meno influenzabile con le variazioni legate alla superficie dell'involucro disperdente.

Legata a quest'ultima considerazione, si può osservare l'andamento esponenziale della variabile errore rappresentata nuovamente in figura 39 dove sono stati considerati un maggior numero di casi.

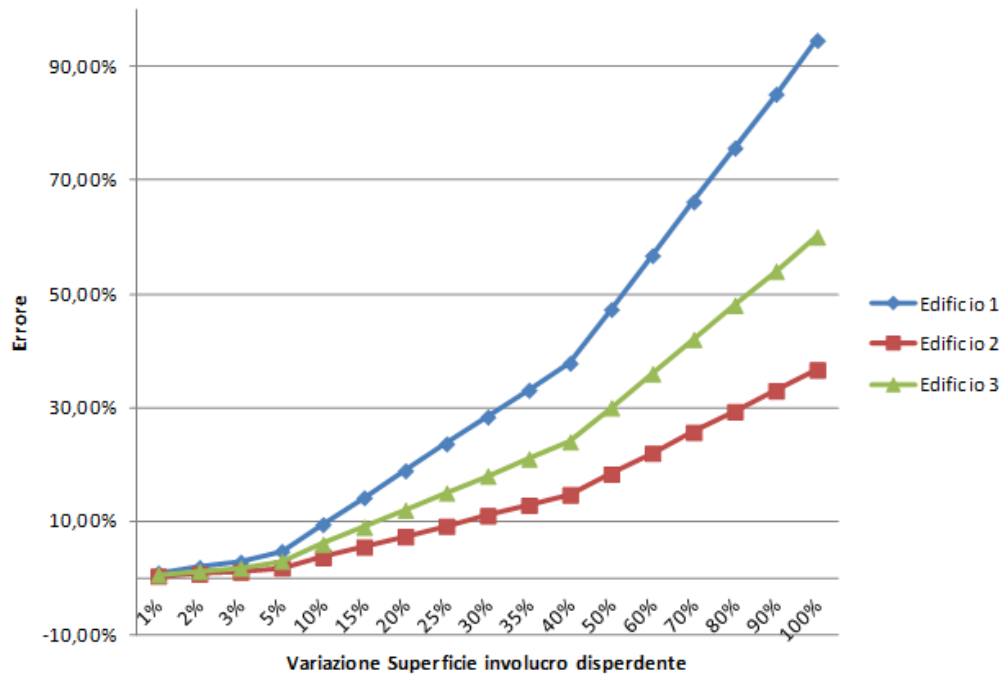


Figura 39: Dettaglio dell'analisi di sensitività relativa alle variazioni della superficie dell'involucro disperdente

2.4.3 Superficie netta calpestabile climatizzata

Una situazione duale a quella precedente si verifica nel caso di variazioni della superficie netta calpestabile climatizzata, come illustrato in figura 40. In questo caso infatti, tale parametro influenza linearmente lo scambio termico per ventilazione e in maniera non lineare, e quasi trascurabile, quello per trasmissione – varia soltanto il coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno.

Guardando dal grafico l'entità delle variazioni di fabbisogno in funzione della superficie calpestabile, si può affermare che, in generale, anche questo parametro è da fornire al file di calcolo realizzato con la maggiore precisione possibile: fortunatamente questa grandezza, come le due precedenti, è spesso disponibile – o comunque, ricavabile dalle piante dell'edificio.

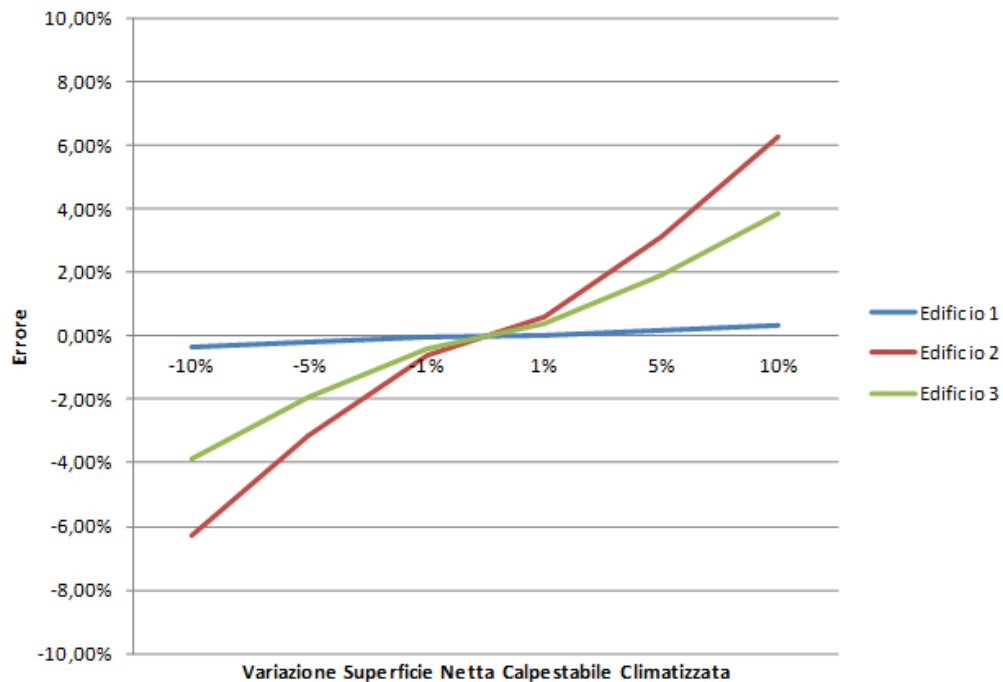


Figura 40: *Analisi di sensitività – superficie netta calpestabile climatizzata*

2.4.4 Ripartizione pareti opache trasparenti

La ripartizione tra superficie trasparente e superficie opaca di un edificio ha una relativamente scarsa influenza sul calcolo finale, anche se non del tutto trascurabile – figura 41. Infatti, variazioni del 30% – di un parametro che al più, è facilmente ottenibile con una serie di misurazioni sul campo – si traducono, nel caso peggiore, in una alterazione inferiore al 5% del risultato finale. Il comportamento, nei tre diversi edifici, è analogo a quello relativo alle variazioni della superficie dell’involucro disperdente. Come prima, si va a modificare solamente il termine legato al coefficiente di scambio termico per trasmissione in modo che, la variazione di fabbisogno maggiore la si ha nell’edificio 1 – quello dove gli scambi termici per ventilazione risultava essere di secondaria importanza.

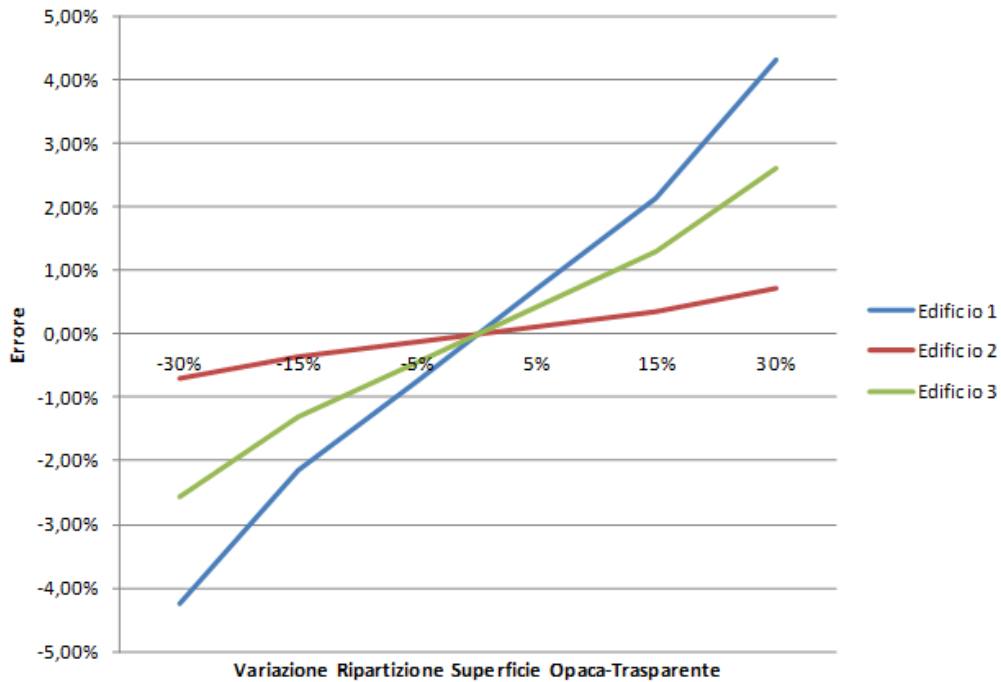


Figura 41: *Analisi di sensitività – ripartizione superficie opaca/trasparente*

2.4.5 Orientamento pareti

In questa analisi si va – nell’ipotesi di considerare l’edificio come un parallelepipedo – a spostare idealmente una certa quantità di m^2 dalle superfici orientate verso Nord e Sud a quelle orientate verso Est ed Ovest : così facendo, la superficie disperdente totale dell’edificio non viene modificata. Ciò influenza il metodo di calcolo per conto dell’extra flusso termico per radiazione infrarossa verso la volta celeste ma tuttavia, come si evince dalla figura 42, dà origine a variazioni del tutto trascurabili.

In base a quanto detto, se fosse disponibile solamente il dato relativo alla superficie totale disperdente delle pareti verticali dell’edificio si potrebbe, ai fini del calcolo secondo la UNI/TS 11300, ripartire arbitrariamente tale valore sui quattro lati – ad esempio il 25% del totale in ciascuna direzione. A questo punto, anche l’ipotesi iniziale di approssimare l’edificio come un

parallelepipedo può essere sciolta ed estendere il calcolo a costruzioni di qualsivoglia forma.

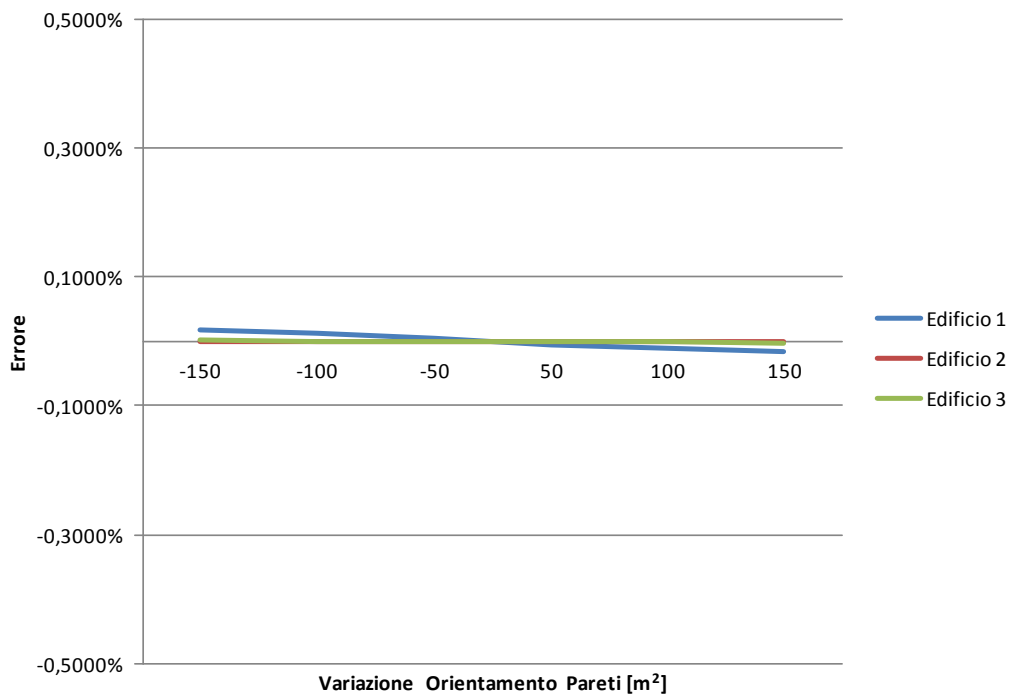


Figura 42: Analisi di sensitività – variazione orientamento pareti

2.4.6 Destinazione d’uso prevalente

Come detto più volte, la destinazione d’uso prevalente è un parametro assai critico, sia per la difficoltà nella scelta di un valore che possa rappresentare al meglio l’edificio sotto analisi – si ricordi l’ipotesi semplificativa di considerare un’unica destinazione d’uso per ciascun edificio –, sia perché da esso dipendono parametri che già di per sé approssimano una serie di grandezze decisamente influenti nel calcolo del fabbisogno di energia primaria.

L’analisi viene svolta rispetto alle seguenti destinazioni d’uso:

- E.2 edifici adibiti ad ufficio e assimilabili;
- E.4(2) mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto;
- E.4(3) bar, ristoranti, sale da ballo;

- E.5 edifici adibiti ad attività commerciali ed assimilabili;
- E.7 edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili;
- E.8 edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili.

I risultati sono mostrati in figura 43– si ricordi che l’Edificio 1 ha destinazione E.2, l’Edificio 2 ha destinazione E.7 e l’Edificio 3 ha destinazione E.8.

La destinazione d’uso prevalente agisce sul calcolo del fabbisogno attraverso i seguenti parametri:

- Apporti medi globali interni per unità di superficie utile;
- Indice di affollamento;
- Portata d’aria esterna di rinnovo.

Di seguito si analizzeranno singolarmente i tre fattori.

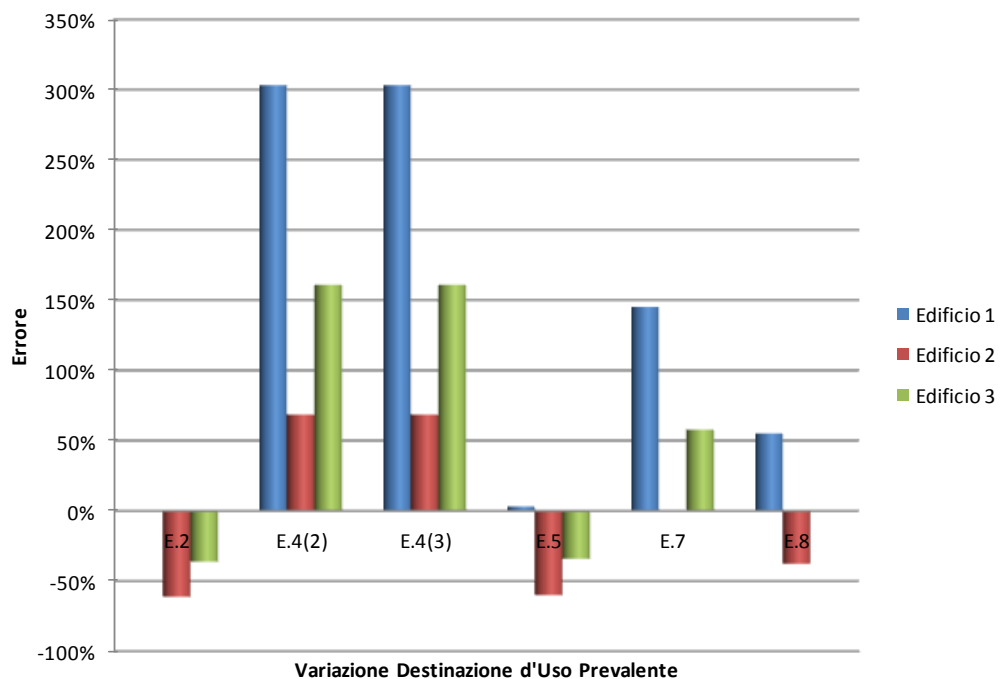


Figura 43: Analisi di sensitività – variazione destinazione d’uso prevalente

2.4.7 Apporti interni

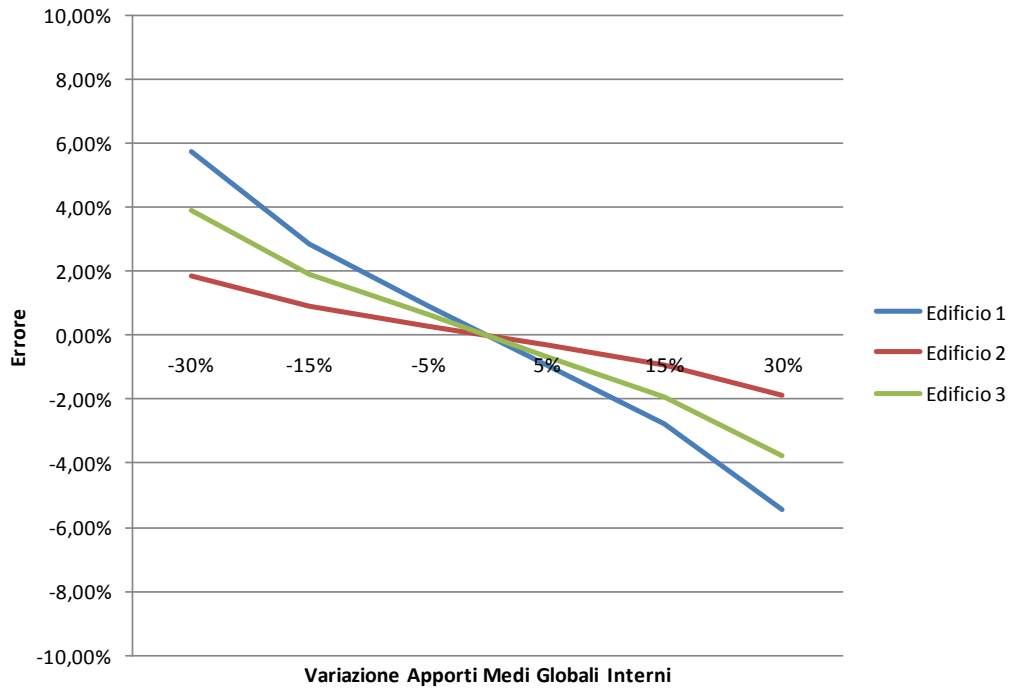


Figura 44: Analisi di sensitività – apporti medi globali interni

La variazione degli apporti medi globali interni $\varphi_{int,mn,k}$ influenza in modo non lineare la variabile errore, come illustrato dalla figura 44 e ricavato esplicitando la seguente formula:

$$\begin{aligned}
 Q_{H,nd} &= Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) = \\
 &= Q_{H,ht} - f(\varphi_{int,mn,k}) \cdot (\varphi_{int,mn,k} \cdot A_f + Q_{sol})
 \end{aligned}
 \tag{46}$$

dove $f(\varphi_{int,mn,k})$ è essa stessa fortemente non lineare.

Per quanto riguarda la maggiore o minore influenza della variazione di tale parametro sul risultato finale nei tre edifici, valgono le seguenti due considerazioni:

- L'Edificio 2 ha una superficie dell'involucro disperdente nettamente superiore alle altre due strutture, pertanto il termine relativo a questa grandezza – invariante rispetto al parametro oggetto di analisi – sarà dominante rispetto al contributo fornito dagli apporti

interni. Ciò spiega l'andamento, nel grafico, di questo edificio rispetto agli altri due;

- L'Edificio 3 ha una superficie dell'involucro disperdente leggermente minore rispetto all'Edificio 1 e pertanto, in accordo con quanto detto nel punto precedente, si dovrebbe avere un'influenza maggiore di $\varphi_{int,mn,k}$. Ciò però non accade a causa della superficie netta calpestabile A_f – si veda l'equazione (46) – che, poiché maggiore nell'Edificio 1, agisce compensando la differenza precedente in modo da avere l'andamento illustrato nel grafico.

Un'ultima osservazione riguarda la pendenza delle curve. Infatti, dal momento che $\varphi_{int,mn,k}$ compare in (46) con segno negativo, si avrà che ad un aumento degli apporti termici interni corrisponde, ovviamente, una riduzione del fabbisogno di energia primaria.

2.4.8 Indice di affollamento

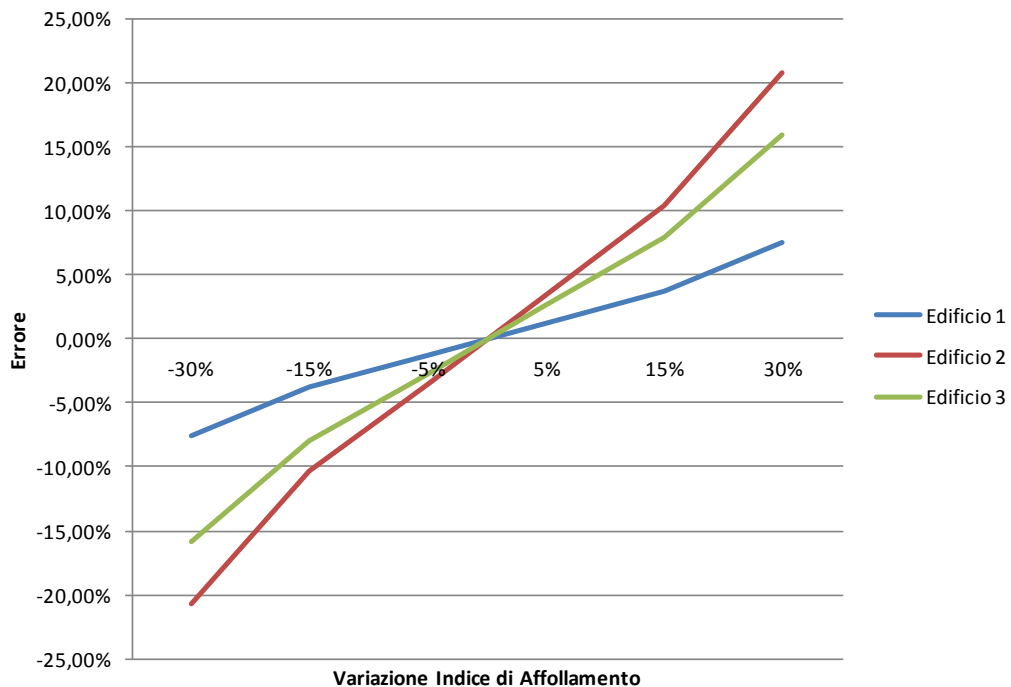


Figura 45: Analisi di sensitività – indice di affollamento

L'indice di affollamento influenza in maniera significativa la variabile errore, come illustrato in figura 45. L'influenza sull'edificio è tanto maggiore quanto è maggiore il peso dello scambio termico per ventilazione rispetto a quello per trasmissione, in modo del tutto analogo a quanto avviene nell'analisi di sensitività relativa alla superficie netta calpestabile climatizzata.

2.4.9 Portata d'aria esterna

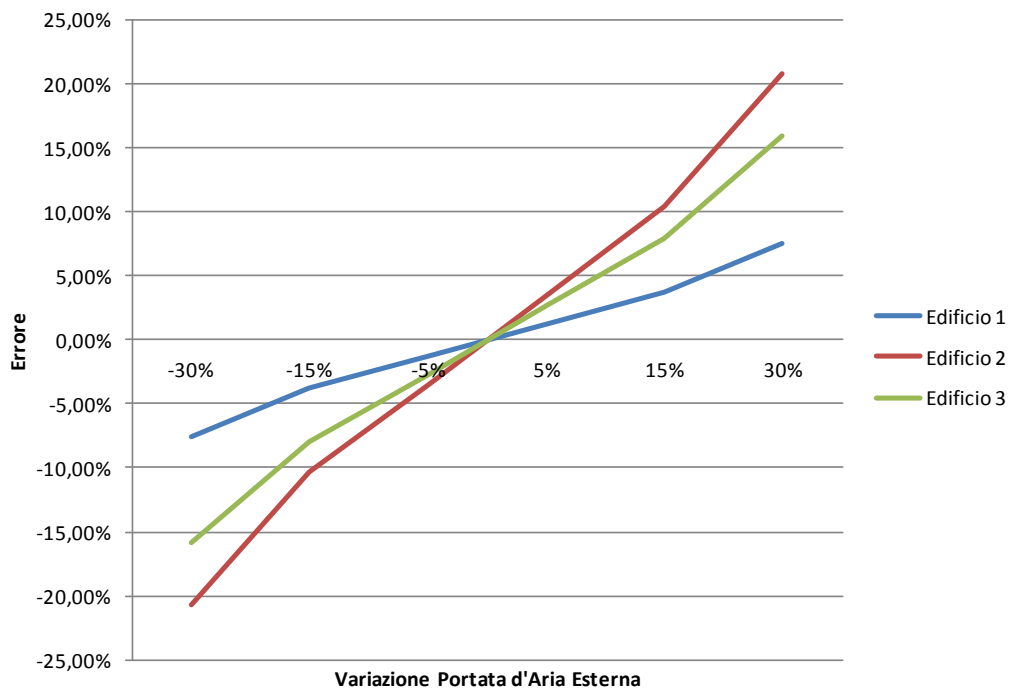


Figura 46: Analisi di sensitività – portata d'aria esterna

L'ultimo parametro legato alla destinazione d'uso prevalente dell'edificio è la portata d'aria esterna. In figura 46 è illustrata l'influenza del parametro sul fabbisogno di energia primaria.

In questo caso, non solo valgono gli stessi ragionamenti relativi all'indice di affollamento, ma si ha addirittura, a parità di variazione percentuale del parametro, la stessa variazione dell'errore – come si nota dal confronto dei

due rispettivi grafici. A questa conclusione ci si poteva arrivare semplicemente guardando l'equazione (46).

2.4.10 Trasmittanza pareti Opache e Trasparenti

In figura 47 e 48 sono illustrati gli andamenti della variabile errore in funzione della trasmittanza, rispettivamente, delle pareti opache e trasparenti. Tali grandezze compaiono entrambe nel calcolo del coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno e sono tanto più importanti quanto è minore l'apporto dovuto allo scambio termico per ventilazione. Se si confrontano i due grafici, si osserva come il termine relativo alle pareti opache sia, in valore assoluto, maggiore: ciò è comune nella maggior parte degli edifici dal momento che la percentuale di parete trasparente, rispetto alla superficie totale dell'involucro disperdente, è spesso inferiore al 15%.

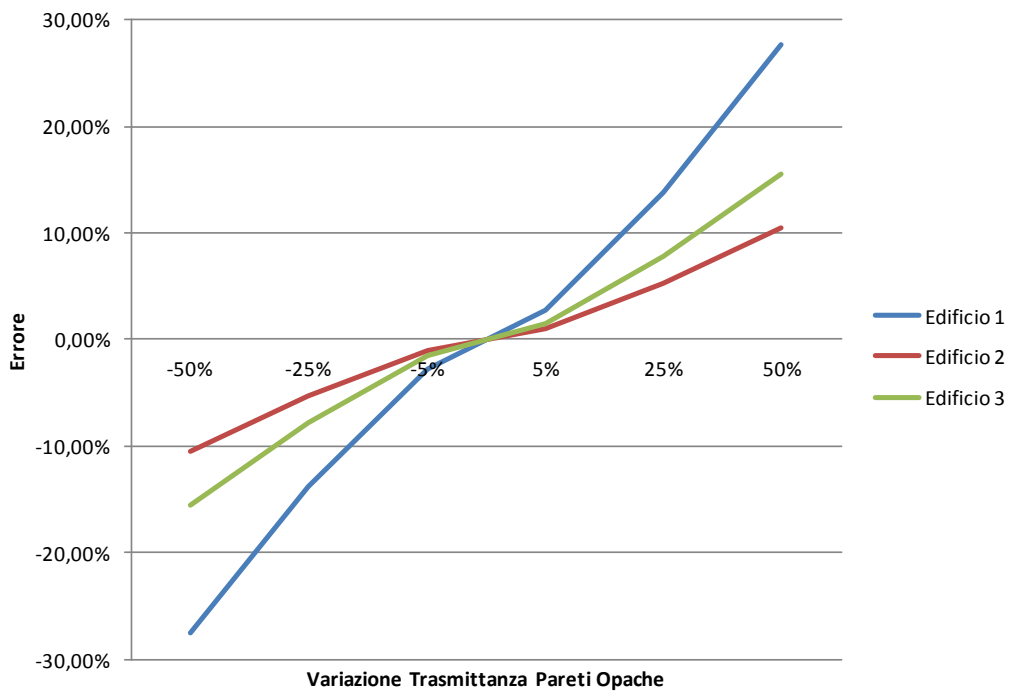


Figura 47: Analisi di sensitività – trasmittanza pareti opache

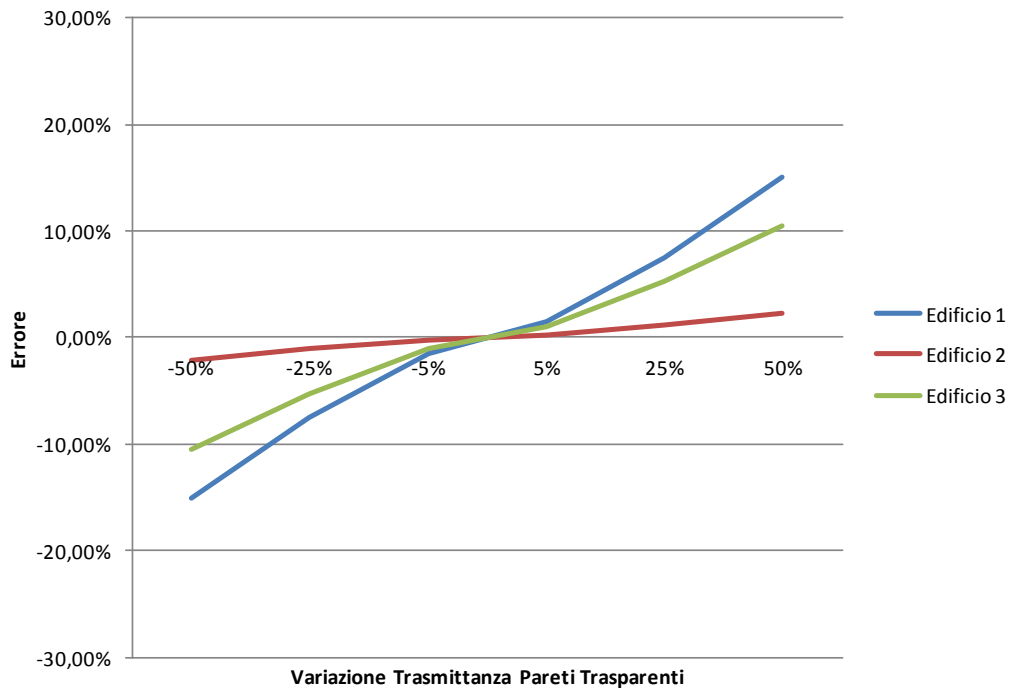


Figura 48: *Analisi di sensitività – trasmittanza pareti trasparenti*

2.4.11 Capacità termica interna

La capacità termica interna, dal momento che la UNI/TS 11300 si basa su un bilancio quasi statico, è praticamente ininfluente – figura 49. Tale parametro infatti viene tenuto in considerazione soltanto per il calcolo del fattore di utilizzazione degli apporti termici totali e, per questo motivo, proprio come gli apporti termici interni dà origine ad un grafico con pendenza negativa.

2.4.12 Rendimento sottosistema di emissione, regolazione, distribuzione, generazione

I rendimenti dei quattro sottosistemi presi in considerazione dalla UNI/TS 11300-2 vengono analizzati contemporaneamente dal momento che la variazione di uno dei parametri influenza la variabile errore nel medesimo modo. Infatti:

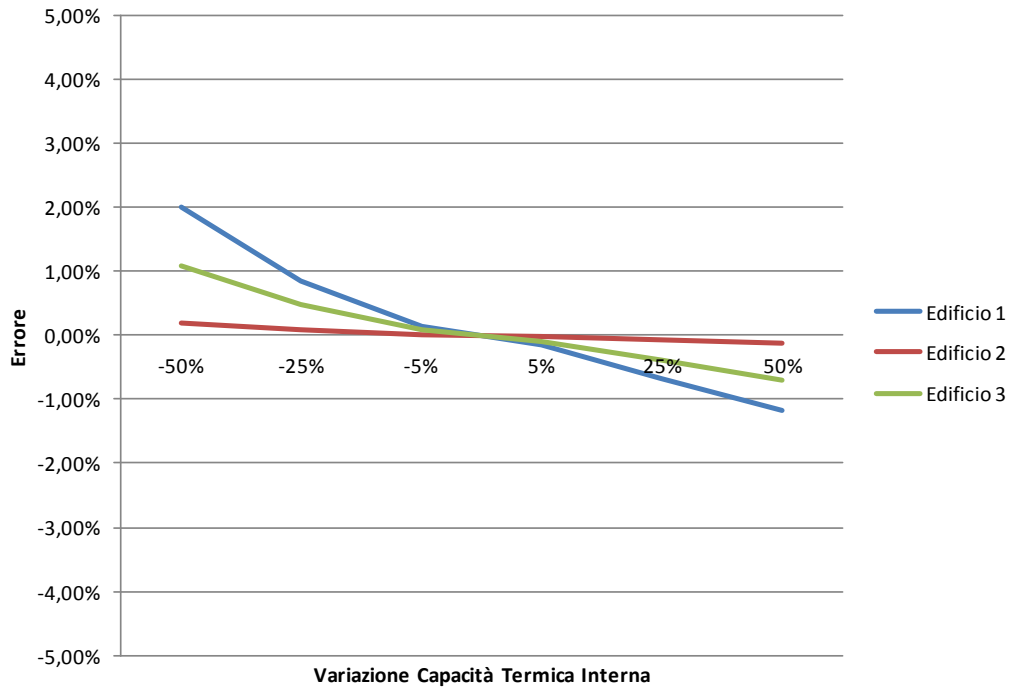


Figura 49: Analisi di sensitività – capacità termica interna

$$\eta_{\text{impianto}} = \eta_{\text{emissione}} \cdot \eta_{\text{regolazione}} \cdot \eta_{\text{distribuzione}} \cdot \eta_{\text{generazione}} \quad (47)$$

Il risultato ottenuto dice che, ovviamente, aumentando il rendimento dell'impianto, diminuisce il fabbisogno di energia primaria. In figura 50 è riportato l'andamento dell'errore in funzione del rendimento totale dell'impianto: le curve relative agli Edifici 1 e 2 sono perfettamente sovrapposte, mentre quella relativa all'Edificio 3 è traslata dal momento che quest'ultimo, nella sua configurazione corretta, ha un rendimento inferiore. Più nel dettaglio, tale fenomeno è dovuto al sottosistema di emissione e al relativo prospetto per il calcolo del rendimento in funzione del carico termico medio annuo, come dettagliatamente descritto nel capitolo precedente.

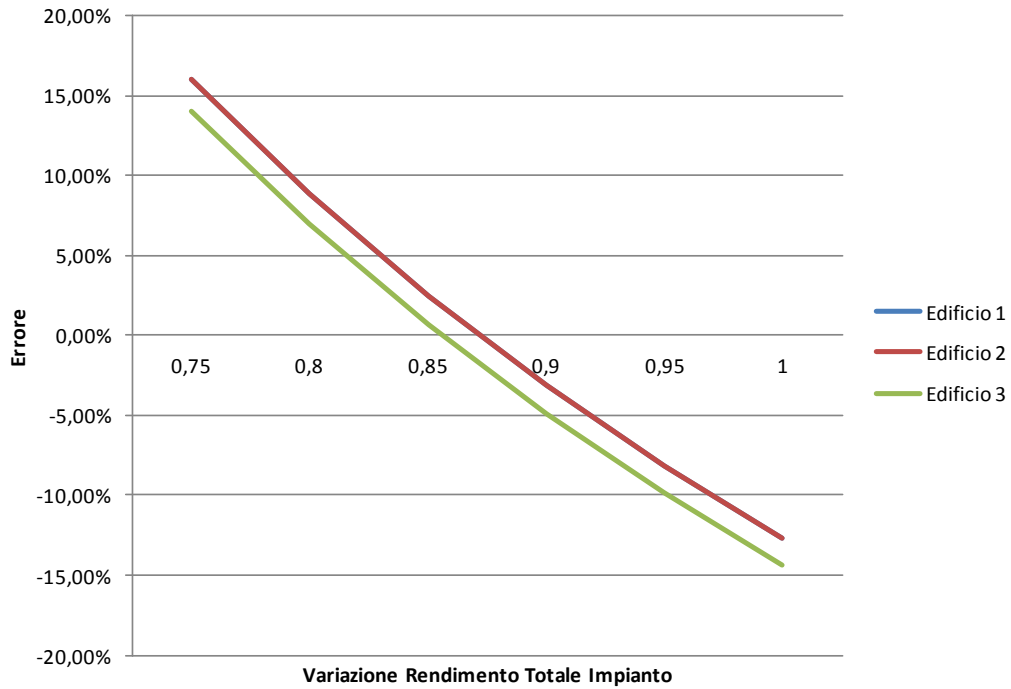


Figura 50: *Analisi di sensitività – rendimento totale dell’impianto*

2.4.13 Ore e giorni di funzionamento

L’analisi di sensitività rispetto alle ore – o, in modo analogo, rispetto ai giorni – di funzionamento ha un obiettivo differente rispetto a quanto fatto finora. Si è infatti detto che con il presente paragrafo si voleva valutare l’influenza di alcuni parametri rispetto al metodo di calcolo fornito dalla UNI/TS 11300 e non al fabbisogno reale di un edificio. A riprova di quanto detto, si è infatti visto che alcuni parametri – in primis il volume lordo riscaldato – hanno un peso trascurabile ai fini del calcolo secondo specifica tecnica, al contrario di quanto invece accade nel mondo reale. Per questo motivo, l’analisi ha assunto talvolta lo scopo di fornire informazioni sull’accuratezza dei parametri da inserire nel foglio di calcolo implementato, altre volte quello di validare alcune ipotesi semplificative aggiuntive, non esplicitamente previste dalla norma.

Il tempo di funzionamento invece, viene stabilito dalla UNI/TS 11300 e, per valutazioni di progetto o standard, deve essere considerato pari all'intera durata del periodo di riscaldamento – senza considerare quindi spegnimenti notturni o durante i giorni di festività. Tale durata è determinata in funzione della zona climatica, come illustrato nel prospetto di figura 51.

Zona climatica	Inizio	Fine
A	1° dicembre	15 marzo
B	1° dicembre	31 marzo
C	15 novembre	31 marzo
D	1° novembre	15 aprile
E	15 ottobre	15 aprile
F	5 ottobre	22 aprile

Figura 51: Durata della stagione di riscaldamento in funzione della zona climatica

Così facendo tuttavia, il fabbisogno di energia primaria calcolato, anche nell'ipotesi ottimistica di aver fornito correttamente tutti gli altri parametri, risulterà sicuramente sovrastimato rispetto al fabbisogno reale dell'edificio: basti pensare che l'articolo 9 del DPR n. 412/93 impone, ad esempio per la zona climatica E, una durata giornaliera massima di attivazione degli impianti termici pari a 14 ore.

Per questo motivo, col fine di fare un confronto tra consumi stimati e consumi reali, occorrerà in qualche modo tenere in considerazione questo aspetto. Ciò è stato fatto in due modi:

- modificando semplicemente la durata del periodo di riscaldamento prevista dalla UNI/TS 11300 con le ore di reale funzionamento degli impianti;
- introducendo alcuni fattori correttivi, descritti nel dettaglio nel prossimo capitolo.

A questo punto si può procedere con l'analisi di sensitività vera e propria. Dai grafici di figura 52 e 53 si può osservare, come del resto era

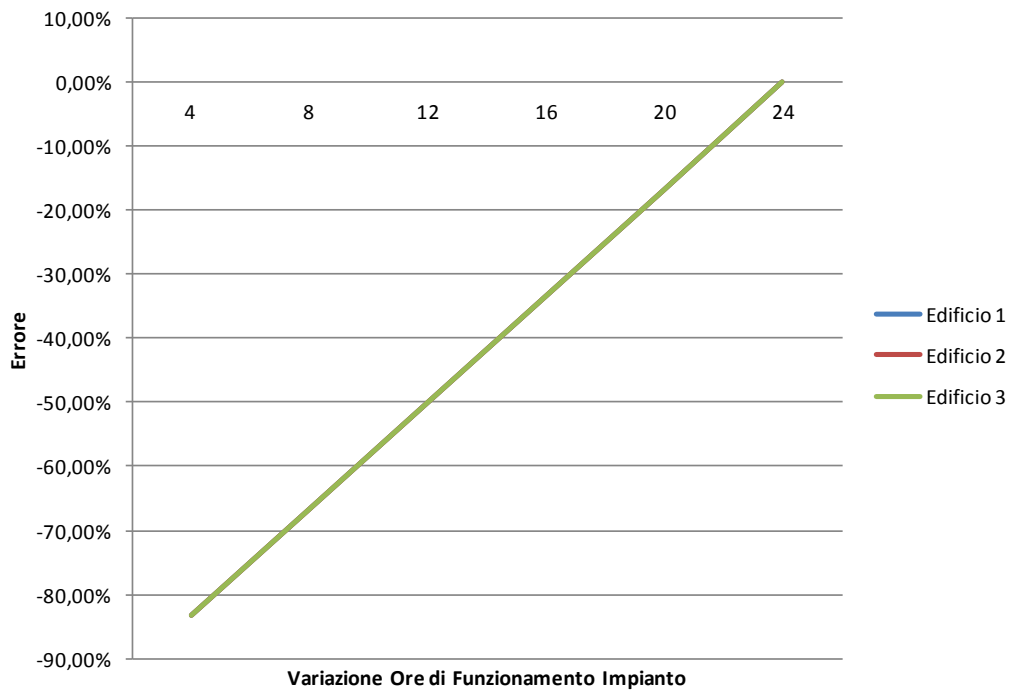


Figura 52: Analisi di sensitività – ore di funzionamento impianto

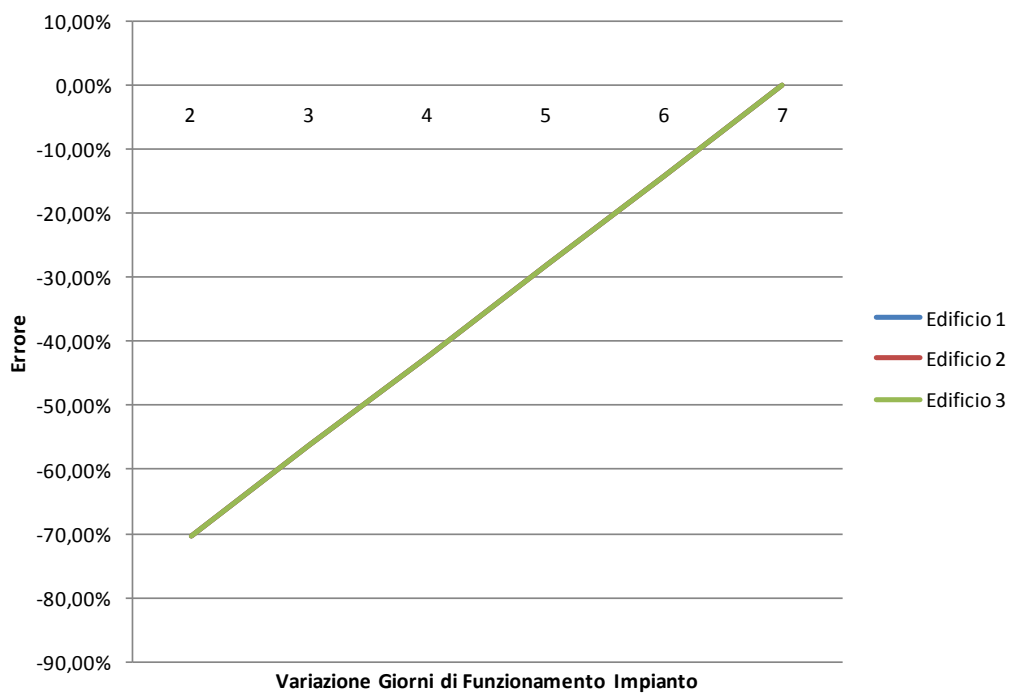


Figura 53: Analisi di sensitività – giorni di funzionamento impianto

prevedibile, che l'errore è linearmente dipendente da tali parametri, dal momento che il bilancio quasi stazionario implementato non è nient'altro che una sommatoria di flussi termici, con opportuno segno, moltiplicati per il tempo totale di funzionamento. In sintesi, quello che dicono i grafici è che se l'impianto funziona per venti ore giornaliere, richiede un fabbisogno di energia primaria doppia rispetto ad un funzionamento di sole dieci ore: se si tenesse conto della dinamica, ciò non sarebbe più vero.

2.4.14 Interazione tra parametri

Col foglio di calcolo implementato per l'analisi di sensitività, è possibile valutare l'influenza di più parametri contemporaneamente. A tale proposito, vengo presentati alcuni casi di studio.

- CASO A - Soluzione Efficiente

In questo caso si ipotizza di poter migliorare l'isolamento dell'edificio, sostituendo le pareti trasparenti ed opache con le migliori soluzioni offerte dai prospetti della specifica tecnica. In aggiunta viene anche considerata la sostituzione della caldaia, con un'altra più efficiente.

- Muratura di mattoni forati intonacati sulle due facce,

$$U_{opaco} = 0,88 \frac{W}{m^2K}$$
- Vetrata tripla, due lastre con trattamento superficiale, $U_{finestra} = 0,8 \frac{W}{m^2K}$
- Generatore di calore a gas a condensazione****, $\eta_g = 0,96$

- CASO B – Soluzione Inefficiente

Soluzione duale rispetto al caso precedente.

- Pannello prefabbricato in calcestruzzo non isolato, $U_{opaco} = 3,59 \frac{W}{m^2K}$

- Vetrata singola con lastra normale, $U_{finestra} = 6 \frac{W}{m^2K}$
- Generatore di calore atmosferici tipo B^{**}, $\eta_g = 0,69$

- CASO C – Soluzione Estetica

In questo caso si è deciso di considerare l'edificio costituito soltanto da pareti trasparenti. Per motivi estetici inoltre sono stati sostituiti i terminali del sottosistema di emissione.

- Percentuale parete trasparente, $T_{\%} = 100\%$
- Vetrata tripla, vetro normale, $U_{finestra} = 2,3 \frac{W}{m^2K}$
- Pannelli isolati annegati a pavimento, $\eta_e = 0,96$

- CASO D – Soluzione Antiestetica

Soluzione duale rispetto al caso precedente

- Percentuale parete trasparente, $T_{\%} = 0\%$
- Parete a cassa vuota con mattoni forati, $U_{opaco} = 1,2 \frac{W}{m^2K}$
- Bocchette in sistemi ad aria calda, $\eta_e = 0,90$

Il pannello di controllo per l'analisi dei quattro casi è rappresentato in figura 54, mentre il confronto tra i fabbisogni di energia primaria in figura 55. In questo secondo grafico sono illustrati anche i risultati che si otterrebbero sommando gli apporti di ciascuna modifica, se fatta singolarmente: come si osserva, il contributo sul fabbisogno totale non è ottenuto come una semplice somma dei singoli contributi dei vari parametri modificati, dal momento si ottengono risultati diversi. Ciò tuttavia era già intuibile dai grafici precedenti dal momento che, ad eccezione di quello relativo al tempo di funzionamento dell'impianto, presentavano tutti un andamento esponenziale.

Nei grafici a torta di figura 56 vengono invece illustrati, caso per caso, i contributi legati a ciascuna variazione di parametro nell'ipotesi di trascurare l'interazione – in realtà non nulla, come appena dimostrato – tra questi. Tali grafici, seppur a carattere indicativo vista l'ipotesi fatta,

permettono di evidenziare quali sono i fattori, tra quelli esaminati, che più incidono sul risultato finale.

	Ripartizione parete Opaca- Trasparente	Trasmittanza pareti opache	Trasmittanza pareti trasparenti	Rendimento di emissione	Rendimento di generazione	EDIFICIO 1	
						Fabbisogno di energia primaria [kWh]	Errore percentuale
OLD: EDIFICIO 1	13%	0,845	3,2	0,95	0,958	438982	0%
Soluzione Efficiente		4%	-75%		0,96	341153	-22,29%
Soluzione Inefficiente		325%	88%		0,69	1953737	345,06%
Soluzione Estetica	100%		-28%	0,96		739779	50,78%
Soluzione Antiestetica	0%	42%		0,9		586516	19,54%
	%	%	%	η	η		

Figura 54: Pannello di controllo per l'implementazione dei quattro esempi

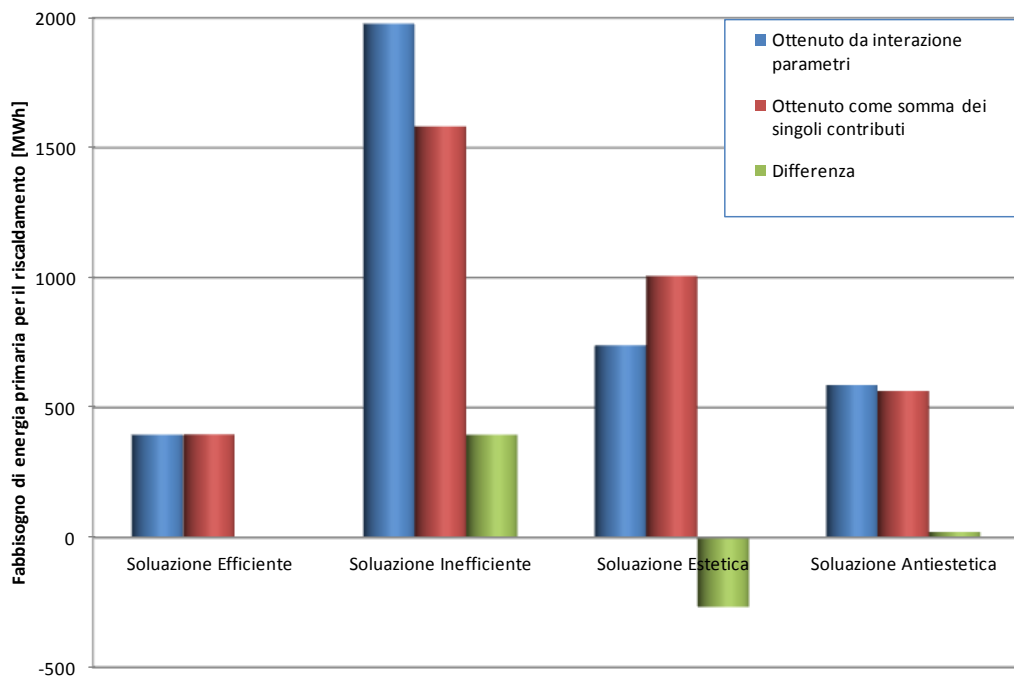


Figura 55: Confronto tra i fabbisogni ottenuti nei quattro esempi

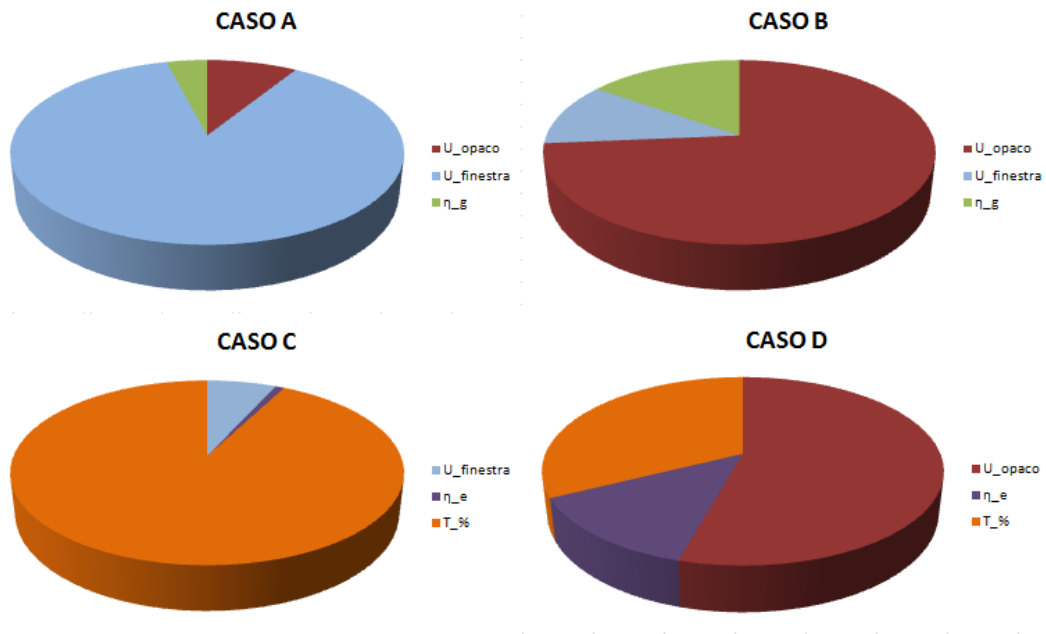


Figura 56: Incidenza dei parametri nei quattro casi, trascurando le interazioni

2.4.15 Confronto tra parametri

Col fine di provare ad estendere quanto fatto per i quattro casi precedenti, si vuole fornire un confronto tra tutti i parametri oggetto di analisi nel presente paragrafo. Si andrà pertanto ad imporre una variazione pari al 2% su ciascun fattore: i risultati di tale prova sono riportati in figura 57.

La validità del grafico ottenuto tuttavia è limitata ai soliti tre edifici considerati e non può assumere un carattere generale data la forte dipendenza che sussiste tra alcuni parametri e che non viene invece presa in considerazione nel confronto. Sarebbe infatti assurdo affermare che, ad esempio, la trasmittanza delle finestre ha sempre una grande rilevanza ai fini del calcolo del fabbisogno di energia primaria, se non specificando almeno la percentuale di superficie trasparente rispetto a quella opaca – a riprova di quanto detto si vede dal grafico come, mentre negli Edifici 1 e 3 la trasmittanza dei componenti vetrati sembra influenzare circa della stessa entità la variabile errore, ciò non vale per l’Edificio 2.

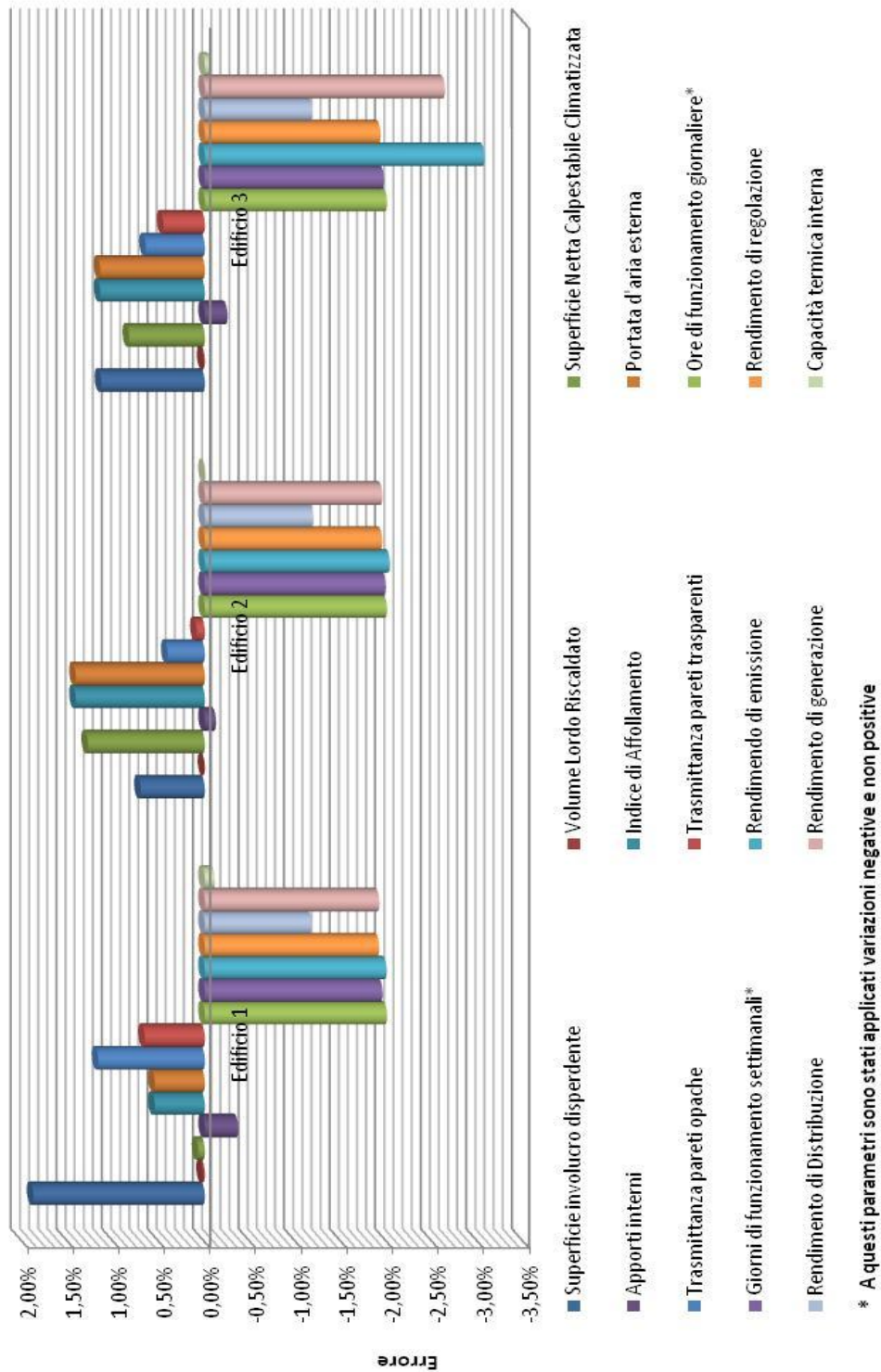


Figura 57: Influenza sulla variabile errore dovuta alla variazione del 2% di ciascun parametro

Nonostante questa fondamentale limitazione, il grafico non è totalmente privo di significato. Infatti, osservando le informazioni che esso fornisce, si riescono comunque a giungere alle seguenti conclusioni:

- Per quanto differenti in valore assoluto, le variazioni di un parametro si propagano sempre con lo stesso verso – positivo o negativo –, indipendentemente dall'edificio analizzato. Per quanto questo possa sembrare banale, permette di definire in maniera universale come agire su una grandezza – aumentandola o riducendola – col fine di diminuire la richiesta di energia primaria per il riscaldamento. Tale discorso può ovviamente essere esteso anche ai due termini relativi al tempo di funzionamento dell'impianto, dopo aver fatto la seguente premessa: dal momento che non avrebbe avuto senso aumentare le ore di funzionamento giornaliero del 2%, oltre quindi la soglia delle 24 ore – e in modo analogo i giorni di funzionamento –, a queste due grandezze si è deciso di fornire variazioni uguali in modulo, ma di segno opposto. Ciò non è di per se problematico perché, come si è detto, le variazioni del tempo di funzionamento si ripercuotono in maniera lineare sui risultati finali: occorre semplicemente ricordarsene quando si osserva il grafico;
- Per giustificare l'effetto differente delle variazioni di alcuni parametri sui tre edifici, si è fatto spesso riferimento al diverso rapporto tra scambio termico per trasmissione e per ventilazione. Ciò lo si può apprezzare ancora meglio da questo grafico. Infatti, come si è detto, nell'Edificio 1 dominano gli scambi per trasmissione e di conseguenza variazioni della superficie dell'involucro disperdente portano ad un errore maggiore rispetto all'Edificio 2. Dualmente, in quest'ultimo edificio, i termini relativi all'indice di affollamento e alla portata d'aria esterna hanno un peso più rilevante;

- Infine, di nuovo in riferimento agli indici di affollamento e alla portata d'aria si osserva che le loro variazioni portano ad errori identici;

2.5 Validazione del foglio di calcolo su altri edifici

Nel prossimo capitolo si andrà ad applicare il foglio di calcolo implementato ad una serie di edifici di interesse per il presente elaborato. Prima di procedere con la discussione dei risultati ottenuti nel caso di studio, tuttavia risulta necessario validare, in qualche modo, i risultati che il file Excel fornisce. Tale operazione è stata ottenuta mediante le seguenti analisi:

- eseguendo il calcolo dettagliato del fabbisogno di energia primaria di uno degli edifici di interesse per mezzo di un software di certificazione conforme con la norma nazionale – e con tutti i decreti regionali – e confrontando i risultati;
- comparando i risultati restituiti dal file Excel con valori di consumo reale;
- applicando il file di calcolo su altri edifici – non di interesse – su cui è già stata eseguita la certificazione energetica conforme alla UNI/TS 11300, e confrontando i risultati.

Per quanto riguarda le prime due analisi, si rimanda al capitolo 3.

Relativamente alla terza invece, sono stati considerati una serie di edifici scolastici presenti nella stessa zona climatica di quelli di interesse. Di questi edifici si dispone di molti dei dati d'ingresso richiesti dal foglio di calcolo. Per tutti gli altri non riportati nell'attestato di certificazione energetica invece, sono stati selezionati dai prospetti della normativa alcuni valori verosimili, talvolta scelti addirittura senza molta accuratezza

visto la robustezza del metodo di calcolo agli errori su alcuni parametri, come mostrato nel paragrafo precedente.

In particolare, i dati disponibili per gli edifici presi in esame sono riportati nella tabella sottostante.

Nome Edificio	Destinazione d'uso	Zona climatica	Superficie involucro disperdente [m ²]	Volume lordo riscaldato [m ³]	Superficie netta calpestabile climatizzata [m ²]	Rapporto superficie Trasparente su superficie Totale [%]	Trasmittanza superficie Trasparente [W/m ² K]	Trasmittanza superficie Opaca [W/m ² K]	Rendimento di Generazione
Edificio 1	Scuola Elementare	E	7.109	17.871	4.231	9%	5,68	0,796	0,933
Edificio 2	Scuola Media	E	3.893	6.148	1.281	10%	5,19	1,149	0,865
Edificio 3	Scuola Media	E	5.524	7.032	1.801	12%	3,98	1,196	0,919
Edificio 4	Scuola Elementare	E	4.963	9.365	2.342	20%	5,75	1,214	0,933

Tabella 3: Parametri per la validazione del file di calcolo su altri edifici

Relativamente ai dati d'ingresso non disponibili, sono state fatte le seguenti ipotesi e approssimazioni:

- l'orientamento delle parete è stato ottenuto a partire dalla pianta dell'edificio, in seguito ad una approssimazione della stessa a parallelepipedo, come illustrato nell'esempio di figura 58 relativa all'Edificio 1 – si è ampiamente documentato come tale approssimazione porta a errori inferiori allo 0,1%.
- il terminale del sottosistema di erogazione è di tipo fan coil, con rendimento $\eta_e = 0,95$;
- il sottosistema di regolazione è di tipo PI, con rendimento $\eta_{rg} = 0,98$;

- il sottosistema di distribuzione è di tipo a distribuzione orizzontale, con rendimento $\eta_d = 0,969$.

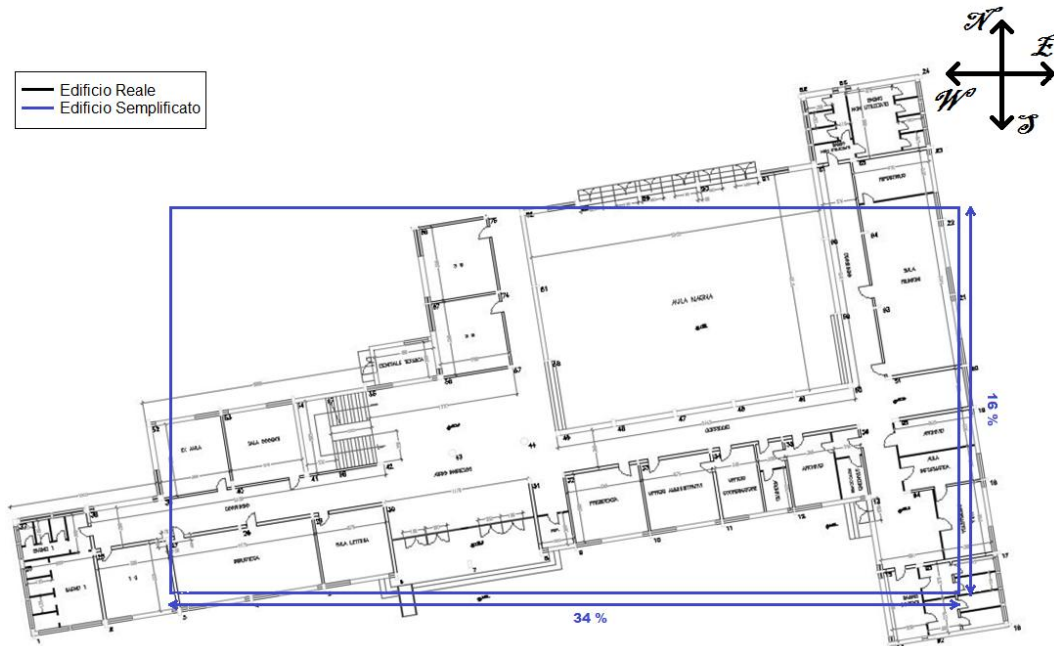


Figura 58: Pianta di un edificio per la validazione del file Excel

Nella figura 59 sono riportati il fabbisogno di energia primaria secondo l’attestato di certificazione energetica e secondo il foglio di lavoro implementato, con relativo confronto. Il risultato è più che soddisfacente – viste anche le approssimazioni sopra citate –, anche se l’errore dell’Edificio 3 sembrerebbe essere abbastanza significativo. Tale discrepanza tuttavia è dovuta alla presenza di un ambiente non climatizzato di dimensioni rilevanti – come si osserva guardando il relativo coefficiente di scambio termico per trasmissione H_D . Si è scelto di trascurare tuttavia questa zona nel calcolo attraverso il file Excel per rimanere fedeli all’ipotesi semplificativa generale, precedentemente descritta, di non considerare questo termine. La differenza relativa allo scambio termico verso il terreno è una logica conseguenza di quanto appena descritto: infatti, nell’attestato di certificazione, buona parte della superficie utile di pavimento a contatto con il terreno non è considerata con quest’ultimo termine, ma appunto con H_D . In questo modo, i coefficienti di scambio termico totale, calcolati nei

due casi, risultano differire in realtà soltanto del 24 % per poi tramutarsi in un errore finale di circa 12%.

Edificio	Tipologia di calcolo	Hd	Hu	Hg	Ha	Totale Fabbisogno Ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: [KWh]
Edificio 1	Attestato di certificazione energetica	5.824	0	976	0	378.245
	Foglio di calcolo implementato	6.129	0	976	0	383.075
	Errore	5,24%	0,00%	0,00%	0,00%	1,28%
Edificio 2	Attestato di certificazione energetica	4.461	0	961	0	303.143
	Foglio di calcolo implementato	4.558	0	961	0	310.260
	Errore	2,18%	0,00%	0,00%	0,00%	2,35%
Edificio 3	Attestato di certificazione energetica	9.933	6.354	362	0	1.631.354
	Foglio di calcolo implementato	10.292	0	2.434	0	1.436.411
	Errore	3,62%	-100%	572,69%	0,00%	-11,95%
Edificio 4	Attestato di certificazione energetica	7.850	0	848	0	1.076.901
	Foglio di calcolo implementato	8.068	0	854	0	1.132.045
	Errore	2,77%	0,00%	0,70%	0,00%	5,12%

Figura 59: Confronto tra il fabbisogno da certificazione e il fabbisogno ottenuto per messo del foglio elettronico implementato

CAPITOLO III

Caso di Studio:

I Campus Bovisa

Nel presente capitolo viene applicato il file di calcolo del fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale implementato, su di un caso di studio costituito dalla sede di Milano Bovisa del Politecnico di Milano. Oltre a presentare i risultati ottenuti, saranno anche descritti una serie di fattori correttivi introdotti, e non esplicitamente previsti dalla UNI/TS 11300, col fine di realizzare un confronto diretto con i dati di consumo reale disponibili.

3.1 Descrizione caso di studio

La sede di Milano Bovisa del Politecnico di Milano è suddivisa in due campus: uno ubicato in Via Durando 10 e l'altro in Via La Masa 34.

Il complesso di Via Durando 10 – figura 60 – si articola in undici edifici aventi volumetria complessiva riscaldata pari a $311.123 m^3$, nei quali sono ospitate le scuole di Architettura e Design oltre ad uffici e laboratori di ricerca.

La sede di Via La Masa – figura 61– è suddivisa in diciassette edifici aventi volumetria complessiva riscaldata pari a $352.924 m^3$, nei quali hanno sede

le facoltà di Ingegneria Industriale, Ingegneria dei Sistemi e Ingegneria Gestionale. Parte delle strutture è poi utilizzata come laboratori di ricerca. Entrambi i campus sorgono su un ex area industriale, riqualificata a partire dal 1998. Fatta eccezione per alcuni edifici in via La Masa, che sono di nuova costruzione, tutti gli atri sono stati oggetto di recupero architettonico e tecnologico.

3.2 Raccolta dati

Vista la quantità di edifici che compongono i due campus si è deciso, in accordo con quanto descritto nel capitolo precedente, di ricorrere ai prospetti forniti dalla UNI/TS 11300 ogniqualvolta se ne fosse presentata l'occasione dal momento che, tra gli obiettivi del presente elaborato, non vi è quello di realizzare certificazioni energetiche ma piuttosto di sviluppare un foglio di lavoro che nel minor tempo possibile, facendo ricorso ad un numero di parametri strettamente necessario, fornisca una stima accettabile del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale.

Fatta questa premessa, viene ora presentata nel dettaglio la metodologia seguita per il recupero dei dati d'ingresso, e di altri fondamentali valori assunti poi costanti, richiesti per il caso di studio.

3.2.1 Superficie Utile Calpestabile Climatizzata e Volume Lordo Riscaldato

In figura 62 sono presentati gli unici dati ufficiali disponibili, relativi agli edifici di Bovisa analizzati. In particolare, oltre ai dati anagrafici di interesse marginale, sono presenti i valori relativi al volume lordo riscaldato e alla superficie utile calpestabile climatizzata: come mostrato

CAMPUS DURANDO						CAMPUS LA MASA					
Num. edificio	Denominazione Edificio	Edificio	Superficie netta calpestabile climatizzata [mq]	Volume lordo riscaldato [mc]	Num. Edificio	Denominazione Edificio	Edificio	Superficie netta calpestabile climatizzata [mq]	Volume lordo riscaldato [mc]		
1	Dipartimento di Progettazione dell'Architettura	Edificio 1	3.653	17.183	11	Pontineria	Edificio 11	263			
2	Aule	Edificio 2	9.815	60.462	12	Enrico Forlanini	Edificio 12	14.470	51.406		
3	Spazio Convegni "Carlo De Carli"	Edificio 3	1.779	12.702	13	Laboratori Didattici "Marzio Falco"	Edificio 13	2.966	23.059		
3A	Laboratorio di Modellistica	Edificio 3A	1.054	4.260	14		Edificio 14	3.676	26.159		
4	Segreteria Studenti	Edificio 4	2.018	7.651	15	Aule	Edificio 15	1.626	7.213		
5	Laboratori del Design	Edificio 5	1.466	2.944	16	Laboratori	Edificio 16	3.042	19.494		
6	Laboratori sulla Sicurezza dei Trasporti (LAST)_Aule	Edificio 6	7.610	39.688	16A	Dipartimento di Energia_Laboratori	Edificio 16A	434	3.361		
7	POLITECA	Edificio 7	2.904	11.907	19	Galleria del Vento	Edificio 19	6.189	19.698		
8	Laboratori del Design_Aule	Edificio 8	19.014	70.513	20	Presidenza	Edificio 20	1.701	6.824		
9	Biblioteca	Edificio 9	12.731	23.082	21	Clup_Associazione Studentesca	Edificio 21	34			
10	Dipartimento INDACO	Edificio 10	17.261	60.521	22	Italo Bertolini	Edificio 22	4.176	17.530		
					23	Ottorino Sesini	Edificio 23	7.576			
					24	Ber Ristore	Edificio 24	1.556	7.676		
					25	Gino Bozza	Edificio 25	4.993			
					25A	Cornelio Cosci	Edificio 25A	2.929	13350		
					26	Dipartimento Ingegneria Gestionale	Edificio 26	14.049			
					27	Aule	Edificio 27	10.413			
Totale			79.296	311.123	Totale			79.090	315.770		

Figura 62: Dati relativi ai due Campus

dall'analisi di sensitività, è importante che quest'ultima grandezza sia fornita in maniera accurata, a differenza del volume lordo riscaldato che, limitatamente al metodo di calcolo descritto, risulta praticamente ininfluenza se riferito ad edifici ad uso diverso da quello abitativo – dove invece, essendo tale parametro utilizzato per il calcolo dello scambio termico per ventilazione, assume importanza assai rilevante.

3.2.2 Superficie involucro disperdente e orientamento pareti

Per quanto riguarda la superficie dell'involucro disperdente, si è calcolato il valore a partire dalle piante degli edifici ottenute attraverso la funzione *cerca aule* disponibile sull'homepage del sito internet di riferimento del Politecnico di Milano. In pratica, misurato il perimetro dell'edificio, nota la scala, si è ottenuto il relativo valore espresso in m : moltiplicando quest'ultimo per l'altezza dell'edificio, si è ricavato, con buona approssimazione, il termine desiderato. In riferimento all'altezza degli edifici, si è deciso di considerare un'altezza lorda del piano – da pavimento del piano a pavimento del piano superiore – pari a $4 m$.

Per quanto riguarda l'orientamento delle pareti, si ancora è fatto ricorso alle medesime piante dello stabile – sotto la solita approssimazione a parallelepipedo –, affiancandole a strumenti di visualizzazione di mappe geografiche per mezzo di immagini satellitari, quali *Google Earth* e *Google Maps*

3.2.3 Percentuale di parete trasparente su parete totale: dimensionamento della finestra significativa dell'edificio

Nota la dimensione della superficie dell'involucro disperdente di un edificio, occorre ripartire la stessa tra parete opaca e parete trasparente.

Tale operazione è stata eseguita con dei rilevamenti sul posto, per mezzo di un telemetro laser – uno strumento di altissima precisione che sfrutta, per il suo funzionamento, l'emissione di un raggio laser di bassa energia col fine di misurare una distanza. In questo modo si è riusciti a determinare le dimensioni della finestra significativa dell'edificio – il più delle volte coincide banalmente con la finestra che si ripete più di frequente – e, attraverso il conteggio, secondo le modalità illustrate nel capitolo precedente, si è ottenuta la percentuale approssimativa di parete trasparente su parete totale. I risultati ottenuti sono riportati in figura 63 e 64 .

3.2.4 Destinazione d'uso prevalente

L'ipotesi di considerare un'unica destinazione d'uso prevalente per ciascun edificio è, come dimostrato, la più critica e ha grande impatto sui risultati finali. Infatti spesso, gli edifici che costituiscono il presente caso di studio, appartengono almeno a due delle classi considerate, riportate in tabella 4. Il più delle volte fortunatamente, è presente una destinazione d'uso nettamente dominante rispetto alle altre e l'ipotesi semplificativa attuata non comporta grandi approssimazioni rispetto al caso reale. Tuttavia, in alcuni edifici, ciò non è più vero è la differenza che si avrà rispetto ai consumi effettivi sarà non trascurabile.

Categoria di edificio	Destinazione d'uso	Denominazione sintetica
E.2	Edifici adibiti ad uffici e assimilabili	Uffici
E.4 (1)	Cinema e teatri, sale di riunione per congressi	Sala Riunioni
E.4 (2)	Mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto	Biblioteca
E.4 (3)	Bar, ristoranti, sale da ballo	Bar
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali ed assimilabili	Libreria
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	Scolastico
E.8	Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili	Laboratori

Tabella 4: Destinazioni d'uso prevalente considerate

Edificio	CAMPUS DURANDO												Totale									
	Parete Nord				Parete Sud				Parete Est				Parete Ovest				Copertura					
	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [%]	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [%]	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [%]	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [%]	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]			
Edificio 1	21	140	161	13%	65	207	272	24%	242	1.029	1.271	284	23%	951	1.235	0	0%	1.655	612	13%	3.981	4.593
Edificio 2	109	582	691	16%	87	603	691	13%	153	376	529	102	19%	427	529	0	0%	7.568	452	5%	9.556	10.008
Edificio 3	22	248	270	8%	81	184	265	30%	35	163	198	35	23%	118	153	0	0%	1.856	172	6%	2.570	2.741
Edificio 4	66	638	704	9%	66	680	746	9%	13	253	266	0	0%	421	421	0	0%	1.363	145	4%	3.353	3.498
Edificio 3A	12	159	171	7%	24	174	198	12%	35	321	357	59	17%	281	339	0	0%	556	129	8%	1.491	1.620
Edificio 5	68	113	181	37%	146	34	181	81%	11	191	203	41	20%	162	203	0	0%	857	266	16%	1.358	1.623
Edificio 6	304	299	603	50%	148	455	603	25%	308	1.445	1.753	384	18%	1.730	2.114	0	0%	3.987	1.144	13%	7.915	9.059
Edificio 7	27	269	296	9%	27	269	296	9%	18	71	89	18	20%	71	89	0	0%	735	90	6%	1.415	1.505
Edificio 8	389	756	1.144	34%	389	756	1.144	34%	60	894	954	327	34%	627	954	0	0%	4.880	1.164	13%	7.912	9.076
Edificio 9	317	871	1.187	27%	317	871	1.187	27%	36	229	265	87	33%	178	265	0	0%	1.231	756	18%	3.380	4.136
Edificio 10	682	1.229	1.911	36%	688	1.510	2.208	32%	448	2.454	2.902	1.116	39%	1.760	2.876	0	0%	2.492	2.944	24%	9.445	12.389

Figura 63: Dati relativi alla superficie dell'involucro disperdente del campus Durando

Edificio	CAMPUS LA MASA																		
	Parete Nord			Parete Sud			Parete Est			Parete Ovest			Copertura			Totale			
	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [mq]	Superficie Opaca [mq]	Superficie Totale [mq]	Superficie Trasparente [%]	Superficie Opaca [%]	Superficie Totale [mq]	
Edificio 11	15	106	121	15	106	121	16	36	51	18	33	51	0	115	115	83	14%	396	459
Edificio 12	269	374	643	514	129	643	981	197	1.178	971	136	1.107	0	3.766	3.766	2.735	37%	4.602	7.337
Edificio 19	108	330	437	0	423	423	0	471	471	117	471	589	0	2.391	2.391	225	5%	4.086	4.311
Edificio 20	128	445	574	65	509	574	4	136	140	0	140	140	0	558	558	197	10%	1.788	1.985
Edificio 24	25	55	80	30	50	80	36	97	132	25	107	132	0	660	660	115	11%	969	1.084
Edificio 13	90	84	174	138	138	270	3	501	504	315	177	492	0	1.728	1.728	540	17%	2.627	3.173
Edificio 14	200	24	224	200	24	224	231	10	241	231	10	241	0	3.164	3.164	880	21%	3.214	4.094
Edificio 15	80	44	124	80	44	124	231	10	241	231	10	241	0	2.520	2.520	640	20%	2.610	3.250
Edificio 16	160	22	182	160	22	182	231	10	241	231	10	241	0	2.742	2.742	800	22%	2.788	3.588
Edificio 18A	0	56	56	0	56	56	60	148	208	60	148	208	0	491	491	120	12%	898	1.018
Edificio 22	240	1.157	1.397	195	1.202	1.397	9	109	118	9	109	118	0	1.184	1.184	453	11%	3.762	4.215
Edificio 23	128	1.020	1.148	128	922	1.048	72	742	814	60	685	745	0	4.587	4.587	384	5%	7.956	8.340
Edificio 25	300	914	1.214	300	914	1.214	100	425	525	100	425	525	0	1.893	1.893	800	15%	4.571	5.371
Edificio 25A	120	309	429	120	309	429	45	78	123	45	78	123	0	2.110	2.110	330	10%	2.883	3.213
Edificio 26	800	2.536	3.336	800	1.991	2.791	150	616	766	150	322	472	0	4.214	4.214	1.900	16%	9.681	11.581
Edificio 27	150	648	798	150	685	835	150	480	630	150	420	570	0	5.510	5.510	600	7%	7.743	8.343

Figura 64: Dati relativi alla superficie dell'involucro disperdente del campus La Masa

3.2.5 Trasmittanza pareti opache e trasparenti

Tali grandezze sono determinate facendo ricorso ai prospetti della UNI/TS 11300, i quali richiedono una descrizione della struttura e delle dimensioni di ciascuna sezione dell'edificio.

Per quanto concerne le superfici opache, si è scelto di considerare, per tutti gli edifici, una muratura a cassa vuota di spessore totale pari a circa 40 cm – figura 65. Tale soluzione univoca, che cerca di essere un buon compromesso tra le varie tipologie di pareti opache costituenti gli edifici dei due campus, per quanto limitativa, risulta strettamente necessaria a causa della mancanza di informazioni abbastanza dettagliate da riuscire ad individuare per ciascuna parete, una trasmittanza opportuna. Il valore così ottenuto, in accordo con la normativa, va quindi incrementato del 10% per tenere conto della presenza di eventuali ponti termici.

Analogamente a quanto fatto per le superfici opache, anche per quelle trasparenti è necessario ricorrere ad una struttura comune a tutti gli

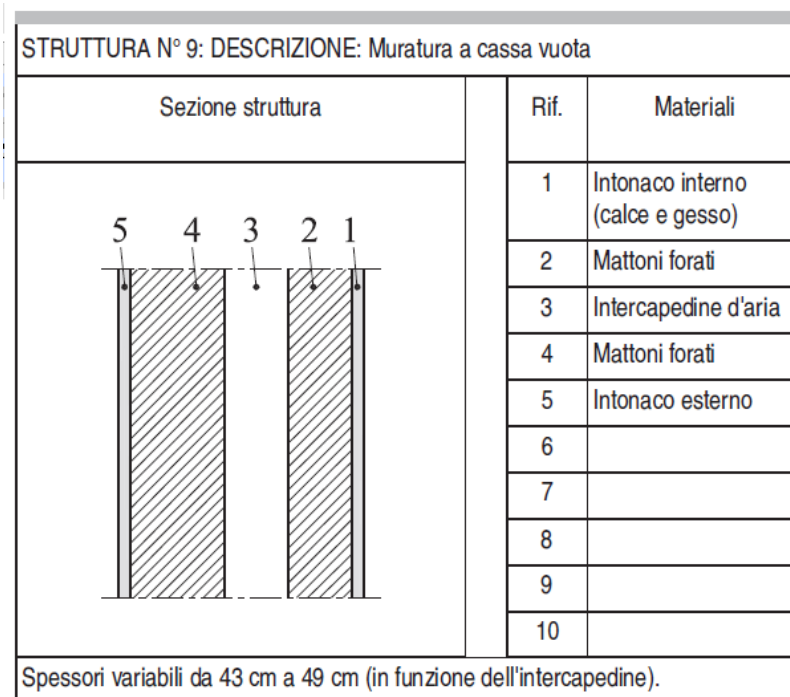


Figura 65: Struttura delle superfici opache degli edifici considerati

edifici: in questo caso si sceglie di considerare finestre composte da una doppia vetrata, con vetro normale, dimensioni $4 - 8 - 4 \text{ mm}$ e aria nell'intercapedine: a differenza di prima tuttavia, non si ottiene la stessa trasmittanza per tutti gli edifici dal momento che, per determinarla secondo i prospetti della specifica tecnica, oltre alla tipologia di vetrata – uguale per tutti gli edifici – occorre utilizzare anche le dimensioni della finestra significativa: dal momento che quest'ultimo valore è stato determinato caso per caso, con misurazioni sul campo, si otterranno trasmittanze anche significativamente diverse.

In figura 66 sono riportate le destinazioni d'uso prevalenti degli edifici e le trasmittanze dei componenti opachi e trasparenti.

3.3 Presentazione dei risultati

A questo punto vengono presentati i risultati ottenuti.

In figura 67 sono illustrati gli scambi termici mensili. Guardando la colonna relativa al mese di gennaio – per gli altri mesi vengono riportati solamente i risultati finali –, si può verificare come sia impossibile stabile a priori un qualche legame tra gli scambi per trasmissione e quelli per ventilazione. Infatti, limitando il confronto ai primi due edifici del Campus Durando, si può osservare come nel primo caso il termine strettamente legato alla destinazione d'uso prevalente vale circa un quinto del totale, mentre nel secondo edificio si raggiunge il 65%. Tali rapporti rimangono ovviamente costante in tutti gli altri mesi.

In figura 68 invece sono riportati i valori relativi agli apporti termici. Tali parametri dipendono, oltre che dalla destinazione d'uso, essenzialmente dalla superficie dell'involucro disperdente – per quanto riguarda gli apporti solari – e dalla superficie utile calpestable climatizzata – per quanto riguarda quelli relativi agli apporti interni gratuiti. Nell'ultima

colonna è rappresentato il fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale di ciascun edificio, calcolato secondo il metodo di calcolo descritto dalla UNI/TS 11300-1 ed espresso in $[MJ]$.

CAMPUS DURANDO													
Edificio	Cod.	Destinazione d'uso prevalente	Scambi termici per trasmissione - PARETI OPACHE					Scambi termici per trasmissione - PARETI TRASPARENTI					
			Descrizione Parete	Spessore Medio Pareti [m]	Trasmittanza Termica media $[W/(mqK)]$	Maggiorazione percentuale relativa alla presenza di ponti termici	Trasmittanza Termica Maggiorata $[W/(mqK)]$	Descrizione Parete	Spessore Medio [mm]	Trasmittanza Termica Vetro $[W/(mqK)]$	Superficie Media Finestra [mq]	Numero Finestre	Trasmittanza Termica Finestre $[W/(mqK)]$
Edificio 1	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,60	288,749	3,2
Edificio 2	E.7	Scolastico	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	7,29	62	3,93625
Edificio 3	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,88	60	3,25
Edificio 4	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	1,50	97	2,95
Edificio 3A	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	5,88	22	3,76
Edificio 5	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,35	10	0,385	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,25	118	3,1125
Edificio 6	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	4,00	286	3,525
Edificio 7	E.4 (2)	Biblioteca	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	9,00	10	4,15
Edificio 8	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	1,50	776	2,95
Edificio 9	E.4 (2)	Biblioteca	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	1,50	504	2,95
Edificio 10	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	1472	3
CAMPUS LA MASA													
Edificio 11	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	3,00	21	3
Edificio 12	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	1,45	1893	2,925
Edificio 19	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	0,96	234	2,8
Edificio 20	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	1,20	164,5	2,9
Edificio 24	E.4 (3)	Bar	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	5,00	23	3,65
Edificio 13	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	3,00	182	3,3
Edificio 14	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	440	3
Edificio 15	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	320	3
Edificio 16	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	400	3
Edificio 16A	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	60	3
Edificio 22	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	1,50	302	2,95
Edificio 23	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	192	3
Edificio 25	E.2	Uffici	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	400	3
Edificio 25A	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	165	3
Edificio 26	E.7	Scolastico	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	950	3
Edificio 27	E.8	Laboratori	Muratura a cassa vuota	0,4	0,845	10	0,9295	Doppio vetro	4;8;4	3,1	2,00	300	3

Figura 66: Trasmittanze relative a pareti opache e trasparenti nei due Campus

A questo punto non rimane che calcolare il fabbisogno di energia primaria andando a considerare i rendimenti dei quattro sottosistemi che costituiscono l'impianto. Come si può osservare da figura 69, i rendimenti sono sempre gli stessi ad eccezione di alcuni casi. In particolare, quello che talvolta cambia è η_e che pur se ottenuto da prospetto, in accordo con quanto già descritto nel capitolo precedente, e riferito allo stesso terminale di erogazione, è anche funzione del carico termico medio annuo, espresso in $[W/m^3]$ e variabile edificio per edificio – si riveda figura 15 per il dettaglio del prospetto.

CAMPUS DURANDO - SCAMBI TERMICI												
Edificio	Gennaio					Febbraio	Marzo	Aprile	Ottobre	Novembre	Dicembre	Totale Scambi Termici [MJ]
	Temperatura Esterna Media: t_e [°C]	Giorni di Funzionamento	Scambio Termico per Trasmissione [MJ]	Scambio Termico per Ventilazione [MJ]	Scambio Termico Mensile: QH-Ht [MJ]	Scambio Termico Mensile [MJ]	Scambio Termico Mensile [MJ]	Scambio Termico Mensile [MJ]	Scambio Termico Mensile [MJ]	Scambio Termico Mensile [MJ]		
Edificio 1	1,7	31	369.826	85.085	454.911	539.996	994.906	1.534.902	2.529.808	4.064.710	6.594.518	2.032.215
Edificio 2	1,7	31	806.090	1.454.784	2.260.874	3.715.659	5.976.533	9.692.192	15.668.725	25.360.917	41.029.642	10.033.460
Edificio 3	1,7	31	214.810	41.436	256.246	297.682	553.928	851.610	1.405.538	2.257.148	3.662.686	1.143.925
Edificio 4	1,7	31	229.072	47.003	276.074	323.077	599.152	922.229	1.521.381	2.443.610	3.964.990	1.233.947
Edificio 3A	1,7	31	115.415	78.112	193.527	271.640	465.167	736.807	1.201.973	1.938.780	3.140.753	862.533
Edificio 5	1,7	31	136.673	108.646	245.318	353.964	599.282	953.246	1.552.528	2.505.774	4.058.303	1.092.180
Edificio 6	1,7	31	722.321	563.979	1.286.300	1.850.279	3.136.580	4.986.859	8.123.439	13.110.298	21.233.737	5.728.541
Edificio 7	1,7	31	111.994	169.098	281.092	450.190	731.282	1.181.473	1.912.755	3.094.228	5.006.984	1.248.836
Edificio 8	1,7	31	721.541	1.409.132	2.130.673	3.539.806	5.670.479	9.210.284	14.880.763	24.091.047	38.971.810	9.458.073
Edificio 9	1,7	31	318.685	741.320	1.060.005	1.801.324	2.861.329	4.662.653	7.523.981	12.186.634	19.710.616	4.705.242
Edificio 10	1,7	31	1.005.853	1.278.476	2.284.329	3.562.805	5.847.134	9.409.940	15.257.074	24.667.013	39.924.087	10.162.517
CAMPUS LA MASA - SCAMBI TERMICI												
Edificio 11	1,7	31	32.633	6.126	38.759	30.403	23.465	8.887	10.743	25.274	35.904	173.435
Edificio 12	1,7	31	760.041	1.072.375	1.832.416	1.432.815	1.094.160	410.359	497.461	1.182.701	1.694.609	8.144.522
Edificio 19	1,7	31	309.349	384.558	693.907	542.566	414.282	155.358	188.340	447.823	641.710	3.083.985
Edificio 20	1,7	31	134.160	39.619	173.780	136.237	104.943	39.676	47.986	113.104	160.930	776.656
Edificio 24	1,7	31	90.431	483.227	573.659	447.781	339.956	126.801	153.960	368.191	530.034	2.540.381
Edificio 13	1,7	31	277.255	219.737	496.992	388.919	297.781	111.957	135.624	321.591	459.806	2.212.671
Edificio 14	1,7	31	397.101	272.429	669.530	523.903	401.047	150.752	182.630	433.146	619.414	2.980.423
Edificio 15	1,7	31	309.280	37.849	347.129	272.081	209.440	79.134	95.726	225.780	321.427	1.550.716
Edificio 16	1,7	31	350.018	225.443	575.461	450.343	344.858	129.673	157.079	372.415	532.415	2.562.244
Edificio 16A	1,7	31	78.234	10.109	88.343	69.275	53.408	20.208	24.435	57.545	81.821	395.034
Edificio 22	1,7	31	289.418	97.243	386.661	303.082	233.343	88.180	106.663	251.534	358.042	1.727.504
Edificio 23	1,7	31	596.280	561.459	1.157.739	905.615	692.457	260.014	315.095	748.167	1.070.887	5.149.974
Edificio 25	1,7	31	407.002	116.296	523.298	410.206	315.874	119.387	144.405	340.478	484.579	2.338.227
Edificio 25A	1,7	31	260.674	217.069	477.743	373.739	285.860	107.370	130.105	308.826	441.925	2.125.568
Edificio 26	1,7	31	900.696	2.082.350	2.983.046	2.330.960	1.776.026	664.687	806.265	1.921.203	2.757.736	13.239.923
Edificio 27	1,7	31	650.560	771.710	1.422.270	1.112.037	849.013	318.352	385.948	917.784	1.315.262	6.320.666

Figura 67: Scambi termici mensili dei due Campus

CAMPUS DURANDO - APPORTI TERMICI													
Edificio	Gennaio					Febbraio	Marzo	Aprile	Ottobre	Novembre	Dicembre	Totale Fabbisogno ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: Q _{H,nd} [MJ]	
	Apporti Termici Interni: Q _{int} [MJ]	Apporti Termici Solari: Q _{sol} [MJ]	Apporti Termici Totali: Q _{gn} [MJ]	YH	Fattore di Utilizzazione degli Apporti Termici: η _{H,gn}	Fabbisogno ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: Q _{H,nd} [MJ]	Fabbisogno ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: Q _{H,nd} [MJ]	Fabbisogno ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: Q _{H,nd} [MJ]	Fabbisogno ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: Q _{H,nd} [MJ]	Fabbisogno ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: Q _{H,nd} [MJ]	Fabbisogno ideale di Energia Termica dell'edificio per il Riscaldamento: Q _{H,nd} [MJ]		
Edificio 1	58.705	15.329	74.034	0,163	0,972	382.982	281.212	184.105	43.710	71.520	225.634	351.077	1.540.240
Edificio 2	105.154	17.276	122.430	0,054	0,987	2.140.091	1.645.026	1.199.687	401.182	522.635	1.337.182	1.971.386	9.217.190
Edificio 3	28.589	6.673	35.262	0,138	0,973	221.938	165.808	113.437	31.586	45.677	133.094	203.727	915.266
Edificio 4	32.430	6.183	38.613	0,140	0,974	238.448	178.963	123.632	35.981	50.337	143.250	218.808	989.419
Edificio 3A	16.938	3.903	20.841	0,108	0,974	173.234	130.601	91.183	26.599	37.788	105.570	159.256	724.231
Edificio 5	23.559	8.145	31.705	0,129	0,969	214.586	159.814	109.512	30.571	43.314	128.617	197.142	883.557
Edificio 6	122.296	27.395	149.691	0,116	0,974	1.140.576	856.820	592.020	167.619	243.385	690.344	1.047.696	4.738.460
Edificio 7	62.225	3.143	65.367	0,233	0,963	218.111	161.598	104.795	30.526	41.738	122.332	197.616	876.715
Edificio 8	305.563	31.932	337.495	0,158	0,976	1.801.116	1.349.469	914.194	270.833	371.669	1.056.677	1.644.662	7.408.619
Edificio 9	272.790	19.966	292.756	0,276	0,960	778.837	567.150	351.861	94.468	132.854	420.872	702.554	3.048.596
Edificio 10	277.230	68.543	345.774	0,151	0,972	1.948.336	1.442.100	962.924	251.743	378.093	1.149.460	1.785.011	7.917.667
CAMPUS LA MASA - APPORTI TERMICI													
Edificio 11	4.227	1.637	5.864	0,151	0,968	33.084	24.304	16.179	3.953	6.230	19.691	30.412	133.853
Edificio 12	232.539	61.071	293.610	0,160	0,971	1.547.363	1.136.671	743.959	181.973	287.201	904.942	1.416.607	6.218.716
Edificio 19	83.389	6.614	90.004	0,130	0,978	605.917	458.690	318.732	98.630	134.081	363.375	554.722	2.534.146
Edificio 20	27.336	5.267	32.602	0,188	0,974	142.030	104.813	69.418	18.308	26.864	82.516	129.848	573.797
Edificio 24	41.676	3.263	44.939	0,078	0,965	530.295	406.728	293.701	100.071	127.472	326.676	487.155	2.272.098
Edificio 13	47.649	14.003	61.652	0,124	0,971	437.121	326.063	222.629	60.559	89.445	262.868	401.536	1.800.221
Edificio 14	59.075	20.934	80.008	0,119	0,970	591.958	440.658	300.226	79.752	120.084	356.667	544.222	2.433.566
Edificio 15	26.114	14.771	40.886	0,118	0,965	307.693	226.588	151.808	36.360	59.647	186.239	283.611	1.251.946
Edificio 16	48.886	18.679	67.565	0,117	0,969	509.995	379.241	257.970	67.612	103.052	307.683	469.055	2.094.608
Edificio 16A	6.975	2.911	9.886	0,112	0,969	78.765	58.488	39.662	9.904	15.982	47.988	72.567	323.354
Edificio 22	67.094	13.189	80.283	0,208	0,973	308.508	225.896	146.841	37.522	55.310	176.418	281.543	1.232.039
Edificio 23	121.749	15.014	136.763	0,118	0,976	1.024.204	775.842	543.636	168.801	228.020	619.312	939.350	4.299.165
Edificio 25	80.240	21.556	101.796	0,195	0,971	424.478	309.310	200.272	48.063	74.696	244.764	388.315	1.689.898
Edificio 25A	47.070	9.784	56.855	0,119	0,974	422.379	317.996	221.025	65.346	90.827	254.991	387.754	1.760.318
Edificio 26	150.515	51.014	201.530	0,068	0,984	2.784.838	2.122.191	1.527.106	486.988	644.494	1.724.250	2.565.200	11.855.067
Edificio 27	167.341	19.182	186.523	0,131	0,976	1.240.147	935.624	647.153	196.048	268.801	742.405	1.135.736	5.165.914

Figura 68: Apporti termici mensili dei due Campus

CAMPUS DURANDO - SCAMBI TERMICI							
Edificio	Totale Fabbisogno Ideale di Energia Termica	Carico Termico Medio Annuo [W/mc]	Rendimento di Emissione	Rendimento di Regolazione	Rendimento di Distribuzione	Rendimento di Generazione [kWh]	Fabbisogno Globale di Energia Primaria [kWh]
Edificio 1	1.540.240	5,669	0,95	0,97	0,988	0,958	1.843.542
Edificio 2	9.217.190	9,642	0,95	0,97	0,988	0,958	11.032.221
Edificio 3	915.266	4,557	0,95	0,97	0,988	0,958	1.095.498
Edificio 4	989.419	7,971	0,95	0,97	0,988	0,958	1.184.254
Edificio 3A	724.231	10,752	0,94	0,97	0,988	0,921	911.688
Edificio 5	883.557	18,982	0,94	0,97	0,988	0,951	1.077.166
Edificio 6	4.738.460	7,549	0,95	0,97	0,988	0,951	5.713.295
Edificio 7	876.715	4,657	0,95	0,97	0,988	0,951	1.057.080
Edificio 8	7.408.619	6,645	0,95	0,97	0,988	0,951	8.932.781
Edificio 9	3.048.596	8,353	0,95	0,97	0,988	0,951	3.675.778
Edificio 10	7.917.667	8,274	0,95	0,97	0,988	0,910	9.976.674
CAMPUS LA MASA - SCAMBI TERMICI							
Edificio 11	133.853	8,454	0,95	0,97	0,988	0,890	172.452
Edificio 12	6.218.716	7,651	0,95	0,97	0,988	0,941	7.580.448
Edificio 19	2.534.146	8,137	0,95	0,97	0,988	0,941	3.089.056
Edificio 20	573.797	5,318	0,95	0,97	0,988	0,941	699.443
Edificio 24	2.272.098	18,721	0,94	0,97	0,988	0,941	2.800.400
Edificio 13	1.800.221	4,938	0,95	0,97	0,988	0,944	2.185.900
Edificio 14	2.433.566	5,884	0,95	0,97	0,988	0,944	2.954.934
Edificio 15	1.251.946	10,978	0,94	0,97	0,988	0,944	1.537.054
Edificio 16	2.094.608	6,796	0,95	0,97	0,988	0,944	2.543.357
Edificio 16A	323.354	6,085	0,95	0,97	0,988	0,944	392.629
Edificio 22	1.232.039	4,445	0,95	0,97	0,988	0,944	1.495.991
Edificio 23	4.299.165	7,477	0,95	0,97	0,988	0,994	4.959.383
Edificio 25	1.689.898	5,198	0,95	0,97	0,988	0,972	1.994.562
Edificio 25A	1.760.318	9,231	0,95	0,97	0,988	0,972	2.077.678
Edificio 26	11.855.067	12,961	0,94	0,97	0,988	0,985	13.953.932
Edificio 27	5.165.914	7,620	0,95	0,97	0,988	0,967	6.125.628

Figura 69: Rendimenti dei quattro sottosistemi e fabbisogno di energia primaria per ciascun edificio dei Campus di Bovisa

3.4 Validazione attraverso Termolog

Prima di procedere con il caso di studio in esame, si vuole fornire un'ulteriore validazione del file di calcolo implementato. Per fare ciò è stata eseguita un'analisi più dettagliata su uno degli edifici appartenenti al Campus Durando: si tratta dell'Edificio 10, noto anche come Dipartimento INDACO.

Tale edificio, situato a qualche centinaia di metri dagli altri che appartengono al medesimo complesso, presenta al suo interno aule scolastiche, laboratori informatici e anche una serie non trascurabile di uffici – tra cui l'Acceleratore di Imprese del Politecnico di Milano. Vista la sua lontananza, è servito da un impianto di generazione autonomo.

La validazione consiste nel confrontare i risultati che il foglio Excel fornisce, con i medesimi valori ottenuti con un software certificato, appositamente creato per realizzare valutazioni energetiche degli edifici e basato anch'esso sulla UNI/TS 11300: si tratta di Termolog la cui precisione con cui esegue la certificazioni è ovviamente controbilanciata da uno grosso svantaggio, ovvero il tempo richiesto per l'inserimento dei numerosi parametri.

Scopo della presente analisi, non è quello di verificare che il fabbisogno calcolato sia effettivamente quello corretto, ma di accertarsi che il risultato ottenuto nel paragrafo precedente, sia circa lo stesso di quello fornito da Termolog: per questo motivo, ove possibile, sono state ripetute tutte le semplificazioni precedentemente discusse anche nel software avanzato. In altre parole, con questa prova si vuole avere la certezza che, a prescindere dalla correttezza dei parametri d'ingresso, il file di calcolo implementato segua le equazioni, eventualmente approssimate, fornite dalla specifica tecnica: se poi il risultato fornito è effettivamente il fabbisogno energetico dell'edificio o meno, sarà verificato soltanto in seguito.

In accordo a quanto detto, in tabella 5 vengono riportati i risultati dei confronti tra le principali grandezze ottenute con i due metodi.

Grandezza calcolata	Excel	Termolog	Errore
Coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno – H_D	17.611	19.032	7,47 %
Coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno – H_g	1.991	1.991	0 %
Coefficiente di scambio termico totale	19.602	21.023	6,76 %
Coefficiente di scambio termico per ventilazione – H_{ve}	52.167	53.151	1,85 %
Scambio termico mensile GENNAIO – $Q_{H,ht}$ [MJ]	3.562.805	3.635.647	2,00 %
Scambio termico mensile FEBBRAIO – $Q_{H,ht}$ [MJ]	2.783.958	2.835.202	1,85 %
Scambio termico mensile MARZO – $Q_{H,ht}$ [MJ]	2.121.106	2.145.627	1,14 %
Scambio termico mensile APRILE – $Q_{H,ht}$ [MJ]	793.809	807.494	1,69 %
Scambio termico mensile OTTOBRE – $Q_{H,ht}$ [MJ]	962.899	985.976	2,34 %
Scambio termico mensile NOVERMBRE – $Q_{H,ht}$ [MJ]	2.294.516	2.326.353	1,37 %
Scambio termico mensile DICEMBRE – $Q_{H,ht}$ [MJ]	3.293.688	3.357.510	1,90 %
Scambio termico mensile TOTALE – $Q_{H,ht}$ [MJ]	15.812.782	16.093.809	1,75 %
Costante di tempo termica – τ [h]	7,68	7,72	0,54 %
Flusso termico prodotto da sorgenti interne – $\phi_{int,mn}$ [W]	69.004	69.004	0,00 %
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento GENNAIO – Q_{hd} [MJ]	3.379.985	3.466.059	2,48 %
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento FEBBRAIO – Q_{hd} [MJ]	2.619.253	2.656.523	1,40 %
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento MARZO – Q_{hd} [MJ]	1.940.510	1.911.909	-1,50 %
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento APRILE – Q_{hd} [MJ]	707.316	689.776	-2,54 %
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento OTTOBRE – Q_{hd} [MJ]	864.572	882.336	2,01 %
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento NOVEMBRE – Q_{hd} [MJ]	2.119.146	2.158.429	1,82 %
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento DICEMBRE – Q_{hd} [MJ]	3.111.110	3.193.313	2,57 %
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento TOTALE – Q_{hd} [MJ]	14.741.892	14.958.345	1,45 %
Fabbisogno di Emissione – Q_e [kWh]	4.328.097	4.373.785	1,04 %
Fabbisogno di Regolazione – Q_{rg} [kWh]	4.604.358	46.529.623	1,04 %
Fabbisogno di Distribuzione – Q_d [kWh]	4.650.867	4.699.963	1,04 %
Fabbisogno Globale di Energia Primaria – Q_p [kWh]	5.536.746	5.595.194	1,04 %

Tabella 5: Confronto tra foglio di calcolo implementato e Termolog su Edificio 10 del Campus di via Durando

Dalla tabella risulta che l'errore più rilevante – 7,47 % – lo si ha in corrispondenza del coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno ma, come si evince dal confronto degli scambi termici mensili, tale incongruenza tra i due risultati si dimostra poco influente ai fini del calcolo. Si può dunque affermare che, limitatamente allo studio dell'Edificio 10 del Campus Durando, il file Excel segue in modo corretto la metodologia di calcolo espressa dalla UNI/TS 11300 e che quindi tale risultato può essere esteso a tutti gli altri edifici del complesso non essendovi alcun motivo evidente che possa dimostrare il contrario. È indubbio, tuttavia, che per una validazione più corretta, il confronto dettagliato andrebbe allargato ad numero maggiore di casi di studio.

3.5 Confronto con consumi reali

A questo punto si passa all'ultima validazione prevista per il foglio di lavoro implementato. Dualmente a quanto fatto nel paragrafo precedente, non si va più a ragionare sul metodo di calcolo, ma si vanno a confrontare i risultati di fabbisogno di energia primaria ottenuti, con i valori di consumo di carburante reali.

Si hanno a disposizione i metri cubi di metano consumati dall'ottobre 2010 ad aprile 2011 riferiti non ai singoli edifici, ma alle centrali termiche che servono i due campus. In prima approssimazione si potrebbe pensare di ripartire il valore totale di combustibile rispetto ai volumi lordi di ciascun edificio in modo da ottenere il consumo del singolo immobile. Tuttavia questa approssimazione porterebbe ad errori non trascurabili.

A riprova di quanto appena detto, si esegue la seguente semplice prova: scelti quattro edifici in modo casuale – in questo caso gli edifici 4, 8, 16 e 20 –, ne si somma il fabbisogno di energia primaria calcolato e lo si ripartisce nuovamente in base al volume lordo relativo a ciascuno di essi.

Edificio	Volume Lordo Riscaldato	Fabbisogno Calcolato	Fabbisogno Calcolato Totale	Fabbisogno Ripartito	Errore relativo
Edificio 4	7.851	1.184.254	13.359.835	1.001.968	-15%
Edificio 8	70.513	8.932.781		8.999.084	1%
Edificio 16	19.494	2.543.357		2.487.884	-2%
Edificio 20	6.824	699.443		870.900	25%

Tabella 6: *Errore ottenibile attraverso la ripartizione dei consumi rispetto al volume lordo riscaldato*

A questo punto si esegue il confronto tra il fabbisogno reale e quello ottenuto ripartendo, in base ai volumi, il fabbisogno totale: come mostrato in tabella 6, si ottengono errori non trascurabili e, soprattutto, non prevedibili. Per questo motivo, si decide di non fare tale approssimazione ma di eseguire un confronto non sui singoli edifici, ma a livello di centrali termiche.

Sono presenti in tutto undici centrali termiche, di cui alcune autonome, di seguito riportate:

- Centrale Termica N per gli edifici 4C, 5, 6, 7, 8, 9;
- Centrale Termica C per gli edifici 1, 2, 3, 4B;
- Centrale Termica E per l'edificio 3A;
- Centrale Termica F per l'edificio 4A;
- Centrale Termica Indaco per l'Edificio 10;
- Centrale Termica Galleria del Vento per gli edifici 12, 19, 20, 24;
- Centrale Termica C3 per gli edifici 13, 14, 15, 16, 16A, 22;
- Centrale Termica ex Origoni per l'edificio 23;
- Centrale Termica Dipartimento di Energia per gli edifici 25, 25A;
- Centrale Termica MIP e DIG per l'edificio 26;
- Centrale Termica ex Broggi per l'edificio 27.

Fatta questa premessa, prima di procedere con il confronto vero e proprio, occorre fare due ulteriori considerazioni inerenti al tempo di

funzionamento dell'impianto e all'ottenimento di consumi mensili a partire dal dato stagionale.

3.5.1 Calcolo dei consumi mensili, giornalieri e orari a partire dal valore totale

Dal momento che si dispone soltanto di valori di consumo stagionale, potrebbe tornare utile ottenere da questi una ripartizione mensile, giornaliera o addirittura oraria.

Al fine di giungere a questo risultato, viene introdotta una grandezza che rappresenta la differenza cumulata della temperatura: il grado-giorno. Per gradi-giorno di una località si intende la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente e la temperatura media esterna giornaliera, ovvero:

$$GG = \sum_{e=1}^n (T_0 - T_e), \quad \text{con } T_e < T_0 \quad (48)$$

dove:

- n numero di giorni del periodo convenzionale di riscaldamento;
- T_0 temperatura ambiente convenzionale, pari a 20 °C;
- T_e temperatura media esterna giornaliera.

In modo analogo si definisce la grandezza GG relativa a ciascun mese, ovvero estendendo il calcolo non al numero di giorni dell'intero periodo di riscaldamento, ma soltanto ai giorni che compongono il relativo mese, ossia:

$$GG_x = \sum_{e=1}^{n_x} (T_0 - T_e), \quad \text{con } T_e < T_0 \quad (49)$$

dove, relativamente alla zona climatica in questione:
 $x \in \{\text{gennaio, febbraio, marzo, aprile, ottobre, novembre, dicembre}\}$

A questo punto, dato il fabbisogno di energia primaria totale Q_p , si ricava il fabbisogno mensile come:

$$Q_{p,x} = Q_p \cdot \frac{GG_x}{GG} \quad (50)$$

In modo del tutto analogo, si può ricavare un'approssimazione del fabbisogno giornaliero sostituendo GG_x in (50), con $(T_0 - T_e)$ del giorno di interesse. Estendendo ulteriormente tale metodo, se fossero disponibili i valori orari di temperatura per ciascun giorno, si potrebbe addirittura ottenere un andamento orario.

I fabbisogni giornalieri ed orari torneranno utili soltanto nel prossimo capitolo, pertanto ora ci si concentrerà su quelli mensili. Si vuole, a questo punto, verificare che il metodo di ripartizione mensile descritto sia una buona soluzione: per fare ciò si farà ricorso ad una prova analoga a quella descritta ad inizio paragrafo. La simulazione viene eseguita sui valori calcolati – al netto delle perdite dei quattro sottosistemi dell'impianto – con il file Excel implementato dal momento che esso fornisce, non solo il fabbisogno di energia primaria globale, ma anche i parziali mensili: in questo modo si potrà realizzare un confronto tra questi ultimi e i valori approssimati ottenuti da quello totale col metodo della ripartizione appena descritto. In tabella 7 sono riportati i risultati ottenuti, relativi all'Edificio 1.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Ott	Nov	Dic	Tot
GG_x	523,6	377,9	308,6	79,4	154,2	329,7	545,7	2319,1
$GG_{x,\%}$	22,58 %	16,30 %	13,13 %	3,42 %	6,65 %	14,22 %	23,53 %	100 %
Fabbisogno [MJ] Edificio 1	382.982	281.212	184.105	43.710	71.520	225.634	351.077	1.540.240
Fabbisogno [%] Edificio 1	24,87 %	18,26 %	11,95 %	2,84 %	4,64 %	14,65 %	22,79 %	100 %

Tabella 7: Validazione del metodo di ripartizione secondo GG

I valori di temperatura utilizzati per il calcolo di GG_x sono stati ottenuti attraverso l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia – nota anche con l'acronimo ARPA – e sono relativi al periodo

che va dal 15 ottobre 2010 al 15 aprile 2011 – ovvero l'intero periodo di climatizzazione invernale. Confrontando la ripartizione percentuale ricavata con il metodo dei Gradi-Giorno appena descritto, con quella relativa ai fabbisogni mensili calcolati tramite il foglio elettronico implementato, si nota come la differenza sia minima. In particolare, tale discrepanza è giustificata dal fatto che, mentre i valori di temperatura utilizzati per il primo metodo sono relativi all'anno 2010/11, quelli del secondo sono attinenti alla UNI 10349, normativa redatta nel 1994 e riferita a misurazioni mediate su più anni. Dal momento che, gli unici parametri mensili richiesti dalla UNI/TS 11300 sono l'irraggiamento medio solare e, appunto, la temperatura media esterna, considerando inoltre che tali grandezze sono identiche in tutti gli edifici appartenenti al caso di studio, si può tranquillamente affermare che la ripartizione percentuale ottenuta con l'Edificio 1 sia la medesima per ciascun altro immobile in modo tale da poter estendere a tutti i casi, la validità del calcolo con i GG effettuato.

3.5.2 Durata effettiva del periodo di riscaldamento

Secondo quanto detto nella specifica tecnica, per valutazione di progetto o standard, il regime di funzionamento dell'impianto di climatizzazione è considerato continuo – per tutti i 183 giorni previsti per la zona climatica E, 24 ore su 24. Ciò ovviamente porta a valori di fabbisogno spropositatamente maggiori di quelli reali, e risulta pertanto utile solo per un dimensionamento in fase di progetto dell'impianto termico e non per confronti successivi con i consumi misurati.

Col fine di fare un raffronto tra il valore di fabbisogno ottenuto dal foglio elettronico e quello ricavabile dai dati di effettivo utilizzo di combustibile, ci si discosta dalla UNI/TS 11300 introducendo dei fattori correttivi previsti invece nella UNI EN ISO 13790. Tuttavia, considerando che la

prima non è altro che la definizione delle modalità per l'applicazione a livello nazionale del metodo di calcolo mensile indicato, a livello europeo, nella seconda, si ritiene tutto sommato sensato procedere con questa variazione.

Secondo la norma europea, sono previste differenti modalità da considerare per il riscaldamento, come:

- Riscaldamento continuo o quasi continuo a valore di regolazione costante;
- Valore di regolazione ridotto o spegnimento notturno e/o nel fine settimana;
- Periodo di non occupazione – per esempio vacanze;
- Situazioni complicate, come periodi in modalità di avviamento con una potenza termica massima durante tale periodo.

Finora si è considerata soltanto la prima: ora si vuole considerare anche la seconda e la terza modalità.

Per riscaldamento intermittente s'intende l'alternanza di periodi di riscaldamento normale a periodi di riscaldamento ridotto o assente: in pratica, tale modalità viene introdotta per considerare lo spegnimento nelle ore notturne degli impianti, piuttosto che durante i sabati e le domeniche. Nel caso di riscaldamento intermittente, l'effetto dell'intermittenza è tenuto in considerazione mediante un fattore di riduzione del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento a partire dal fabbisogno calcolato in funzionamento continuo. Così, in un modo semplificato ma robusto, il fattore di correzione tiene in considerazione che l'impatto dell'intermittenza sul fabbisogno di energia termica per il riscaldamento è funzione della durata del periodo di intermittenza – ore alla settimana –, della quantità di apporti termici in confronto all'entità dello scambio termico – rapporto di bilancio termico – e dell'inerzia dell'edificio. Ciò viene rappresentato dalla figura 70, ed espresso come:

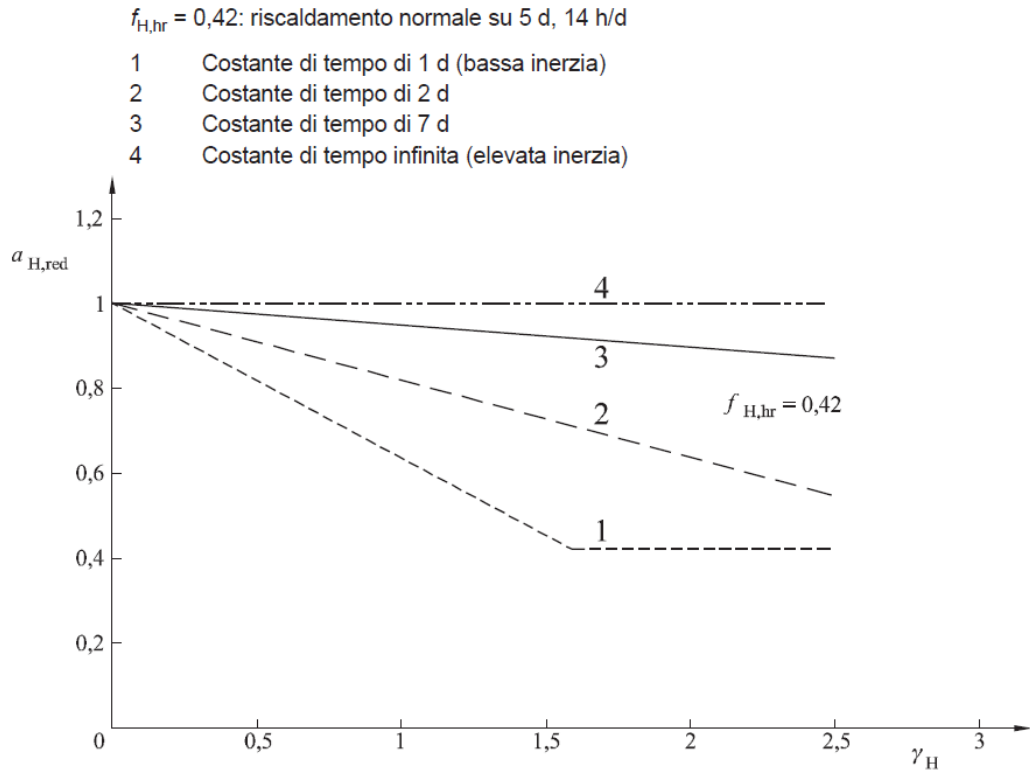


Figura 70: illustrazione del fattore di riduzione per riscaldamento intermittente

$$Q_{H,interm} = a_{H,red} Q_{H,cont} \quad (51)$$

$$a_{H,red} = 1 - b_{H,red} \left(\frac{\tau_{H,0}}{\tau} \right) \gamma_H (1 - f_{H,hr}), \quad f_{H,hr} < a_{H,red} < 1 \quad (52)$$

dove:

- $Q_{H,interm}$ fabbisogno di energia termica per riscaldamento intermittente [MJ];
- $Q_{H,cont}$ fabbisogno di energia termica per riscaldamento continuo [MJ];
- $a_{H,red}$ fattore adimensionale di riduzione per riscaldamento intermittente;
- $b_{H,red}$ fattore di correzione empirico, pari a 3;
- $\tau_{H,0}$ costante di tempo di riferimento per la modalità di riscaldamento [h];
- τ costante di tempo della zona dell'edificio [h];

- γ_H rapporto di bilancio termico per la modalità di riscaldamento;
- $f_{H,hr}$ frazione del numero di ore alla settimana con una normale regolazione del Riscaldamento – per esempio, $(14 \cdot 5)/(24 \cdot 7) = 0,42$.

Per periodo di non occupazione, s'intende un periodo di diversi giorni o settimane senza riscaldamento, per esempio a causa di vacanze – da non confondere con gli spegnimenti settimanali degli impianti durante i sabati e le domeniche, già eventualmente considerati nel fattore correttivo legato al funzionamento intermittente.

I periodi di non occupazione durante la stagione di riscaldamento, frequenti in edifici ad uso scolastico, portano anch'essi ad una riduzione del fabbisogno di energia per il riscaldamento e sono calcolati come segue. Per il mese che contiene un periodo di non occupazione, si esegue il calcolo due volte:

- Per normali regolazioni del riscaldamento in condizione di occupazione;
- Per regolazioni in condizioni di non occupazione.

I risultati ottenuti vengono quindi interpolati linearmente seconda la frazione di tempo della modalità di non occupazione rispetto alla modalità di occupazione, come indicato nelle seguenti equazioni:

$$Q_{H,nd} = (1 - f_{H,nocc})(Q_{H,nd,occ} + f_{H,nocc})Q_{H,nd,nocc} \quad (53)$$

dove:

- $Q_{H,nd,occ}$ fabbisogno di energia termica calcolato al punto precedente [MJ];
- $Q_{H,nd,nocc}$ fabbisogno di energia termica per il riscaldamento, calcolato assumendo per tutti i giorni del mese il controllo e le regolazioni del termostato relativi al periodo di non occupazione [MJ];

- $f_{H, nocc}$ frazione del mese che rappresenta il periodo di non occupazione – per esempio 10/31.

Viene di seguito riportato, a titolo di esempio, il calcolo del fattore di correzione dovuto al funzionamento intermittente – figura 71– e al periodo di non occupazione – figura 72– relativo all’Edificio 1 dove, sono state previste 12 ore di funzionamento giornaliero dell’impianto per 5 giorni alla settimana e sono stati considerati 18 giorni di non occupazione, essenzialmente dovuti alle vacanze di Natale e Pasqua.

Correzioni per intermittenza: metodo mensile										
Fattore di correzione empirico $f_{H, red}$	Ore giornaliere di riscaldamento	Giorni settimanali di riscaldamento	Frazione del numero di ore alla settimana con una normale regolazione del riscaldamento: $f_{H, irr}$	Fattore adimensionale di riduzione per riscaldamento intermittente GENNAIO: $Q_{H, red}$	Fattore adimensionale di riduzione per riscaldamento intermittente FEBBRAIO: $Q_{H, red}$	Fattore adimensionale di riduzione per riscaldamento intermittente MARZO: $Q_{H, red}$	Fattore adimensionale di riduzione per riscaldamento intermittente APRILE: $Q_{H, red}$	Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento intermittente GENNAIO: $Q_{H, red, interm}$ [MJ]	Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento intermittente FEBBRAIO: $Q_{H, red, interm}$ [MJ]	Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento intermittente MARZO: $Q_{H, red, interm}$ [MJ]
3	12	5	0,357142857	0,637606564	0,505969582	0,357142857	0,357142857	244192	142285	65752
								15611		809032

Figura 71: Vista del foglio Excel – correzione per intermittenza

Correzione per periodo di non occupazione: metodo mensile										
Frazione del mese che rappresenta il periodo di non occupazione GENNAIO: $f_{H, nocc}$	Frazione del mese che rappresenta il periodo di non occupazione FEBBRAIO: $f_{H, nocc}$	Frazione del mese che rappresenta il periodo di non occupazione MARZO: $f_{H, nocc}$	Frazione del mese che rappresenta il periodo di non occupazione APRILE: $f_{H, nocc}$	Frazione del mese che rappresenta il periodo di non occupazione OTTOBRE: $f_{H, nocc}$	Frazione del mese che rappresenta il periodo di non occupazione NOVEMBRE: $f_{H, nocc}$	Frazione del mese che rappresenta il periodo di non occupazione DICEMBRE: $f_{H, nocc}$	Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento intermittente corretto con periodo di non occupazione GENNAIO: $Q_{H, red, interm}$ [MJ]	Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento intermittente corretto con periodo di non occupazione FEBBRAIO: $Q_{H, red, interm}$ [MJ]	Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento intermittente corretto con periodo di non occupazione MARZO: $Q_{H, red, interm}$ [MJ]	Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento intermittente corretto con periodo di non occupazione APRILE: $Q_{H, red, interm}$ [MJ]
5/31	0	0	4/15	0	1/30	8/31	204806	142285	65752	11448
										25543
										95659
										160772

Figura 72: Vista del foglio Excel – correzione per periodo di non occupazione

In alternativa a questa soluzione, si è deciso di tenere conto del reale funzionamento degli impianti senza introdurre alcun fattore correttivo, ma semplicemente sostituendo nelle celle relative alle ore e ai giorni di funzionamento del foglio elettronico implementato – pari rispettivamente a 24 h e 183 giorni, in accordo a quanto prescritto dalla UNI/TS 11300 –, i valori reali: in questo modo si otterrà una variazione del fabbisogno proporzionale a quella delle ore e dei giorni di funzionamento, come

mostrato precedentemente in sede di analisi di sensitività rispetto a questi due parametri.

Il risultato ottenuto con questo secondo metodo, differisce da quanto si ottiene applicando i fattori correttivi della UNI EN ISO 13790 – pur considerando lo stesso numero di ore effettive in entrambi i casi –, dal momento che si trascura completamente l'effetto dei transitori, considerati invece in parte nella norma europea. Tuttavia, questa seconda metodologia continua a rimanere legittima dal momento che il metodo di calcolo si riferisce comunque ad un bilancio quasi stazionario: a conferma della validità di tale operazione, è frequente trovare accanto ai documenti di certificazione energetica redatti dai tecnici specializzati, un confronto con consumi reali eseguito esattamente attraverso il metodo del rapporto proporzionale appena illustrato.

3.5.3 Confronto

Come detto, sono noti i volumi di metano utilizzati per la climatizzazione invernale relativa all'anno 2010/2011, ripartiti secondo le centrali termiche. Tali valori possono essere convertiti in energia attraverso il potere calorifico inferiore – PCI, $[MJ/m^3]$ –, ovvero la quantità di energia che si può ricavare convertendo completamente una massa unitaria di un vettore energetico in condizioni standard.

In figura 73 è riportato il confronto tra l'energia termica effettiva e il fabbisogno di energia primaria stimata attraverso il foglio Excel implementato, corretto per tenere conto del funzionamento reale dell'impianto – il confronto è effettuato sia rispetto la correzione proposta dalla UNI EN ISO 13790, sia attraverso la modifica diretta delle ore di funzionamento, secondo quanto descritto precedentemente.

CAMPUS DURANDO											
Edificio	Fabbisogno calcolato a partire dai consumi reali 2010/2011				Fabbisogno di Energia Primaria - Ore di funzionamento Reali [kWh]	Fabbisogno di Energia Primaria - Ore di funzionamento Reali [kWh]	Fabbisogno di Energia Primaria - Correzione 13790 [kWh]	Errore di valutazione - senza correzioni	Errore di Valutazione - Ore di funzionamento reali	Errore di Valutazione - Correzione 13790	Errore di Valutazione tramite metodo basato su 10379
	Cod. Generatore	Consumi metano [mc]	PCI metano [kWh/mc]	Energia Primaria Globale [kWh]							
Edificio 1	C.T. C + C.T. E + C.T. F	180.496	9,593	1.731.498	4.571.093	1.792.300	2.361.191	164%	4%	36%	4%
Edificio 2											
Edificio 3											
Edificio 4											
Edificio 3A											
Edificio 5	C.T. N	197.588	9,593	1.895.462	5.771.907	2.223.978	2.482.923	205%	17%	31%	30%
Edificio 6											
Edificio 7											
Edificio 8											
Edificio 9	C.T. INDACO	69.642	9,593	668.076	2.819.725	879.030	1.100.010	322%	32%	65%	60%
Edificio 10											
CAMPUS LA MASA											
Edificio 12	C.T. Galleria del Vento	113.868	9,593	1.092.336	4.048.342	1.291.562	1.522.316	271%	18%	39%	32%
Edificio 19											
Edificio 20											
Edificio 24											
Edificio 13	C.T. C3	83.258	9,593	798.694	3.252.766	906.760	1.124.969	307%	14%	41%	106%
Edificio 14											
Edificio 15											
Edificio 16											
Edificio 16A											
Edificio 22											
Edificio 23	C.T. ex	50.343	9,593	482.940	1.411.141	511.121	622.539	192%	6%	29%	21%
Edificio 25	C.T. Dip. Di Energia	39.107	9,593	375.153	1.179.842	399.213	484.714	214%	6%	29%	46%
Edificio 25A	C.T. MIP e	132.635	9,593	1.272.368	3.912.903	1.415.968	1.965.122	208%	11%	54%	-18%
Edificio 26											
Edificio 27	C.T. ex	48.899	9,593	469.088	1.737.615	628.259	771.725	270%	34%	65%	51%

Figura 73: Confronto tra consumi reali e: a) fabbisogno ottenuto da 11300; b) fabbisogno con correzione proporzionale alle ore di effettivo utilizzo; c) fabbisogno con fattori di correzione previsti da UNI 13790; d) metodo di calcolo alternativo

Osservando gli errori ottenuti nei vari confronti, si può giungere alle seguenti conclusioni:

- I valori di fabbisogno stimati senza correzioni, sono sempre superiori a quelli reali. Tale conclusione permette di affermare che la specifica tecnica non sottostima mai i valori di consumo e ciò è importante sia perché spesso essa viene utilizzata in fase di dimensionamento – di finestre, termosifoni, pompe, caldaie, ecc. –, dove è importante che sia garantito anche un certo margine di sicurezza – e non è assolutamente ammissibile il contrario –, sia perché, se così non fosse, la differenza tra i risultati sarebbe da ricercarsi in altre grandezze non note a priori: infatti, se si fa

riferimento al fabbisogno ottenuto, considerando le 24 ore giornaliere e i 183 giorni di funzionamento, un errore negativo non sarebbe stato giustificabile attraverso i parametri relativi al tempo di accensione dell'impianto – non potendoli ovviamente aumentare ulteriormente;

- Il fabbisogno di energia ottenuto considerando il funzionamento continuo degli impianti di riscaldamento è, come ampiamente prevedibile, notevolmente sovrastimato rispetto ai consumi reali. Le valutazioni standard o di progetto effettuate secondo UNI/TS 11300 che, a differenza di quella adattata all'utenza, hanno il grosso vantaggio di utilizzare dati d'ingresso provenienti dai vari prospetti della specifica tecnica, non pretendono infatti di riuscire a fornire una stima dei consumi effettivi di carburante ma si limitano alle seguenti funzioni:
 - Valutare il rispetto di regolamenti espressi in termini di obiettivi energetici – in genere per l'ottenimento di permessi di costruire;
 - Confrontare le prestazioni energetiche di varie alternative progettuali;
 - Indicare un livello convenzionale di prestazione energetica degli edifici;
 - Stimare l'effetto di possibili misure di risparmio energetico su un edificio esistente. Tale risparmio però non è espresso in termini di valore assoluto – quanti euro effettivamente risparmio –, ma è riferito ad un'altra soluzione – quale scelta è più vantaggiosa.
- Le due correzioni adottate invece, forniscono una buona stima del reale fabbisogno di combustibile, soprattutto se si tiene in considerazione quanto esplicitamente detto nel paragrafo 3.2

dell'appendice H della UNI EN ISO 13790¹. Più nel dettaglio, se si confrontano le due soluzioni, quella relativa all'utilizzo diretto delle ore reali di funzionamento fornisce risultati migliori – del resto è, come detto, la soluzione adottata anche dai certificatori professionisti –, con errori che vanno da un minimo di 4% ad un massimo di 34 %, ben al di sotto di quanto previsto dalla normativa stessa. Inoltre, va considerato che, col fine di estendere il calcolo ad un numero rilevante di edifici, alcuni parametri – in particolare le trasmittanze delle pareti opache e trasparenti e i rendimenti dei quattro sottosistemi – sono stati scelti in maniera superficiale e pertanto, uno studio più approfondito permetterebbe di ottenere risultati migliori;

- Infine, l'ultima colonna della figura 73, rappresenta il confronto con un metodo di calcolo alternativo alla UNI/TS 11300, descritto nell'Appendice A del presente elaborato. Tale metodo, se da un lato è molto semplice – implementato in Excel facendo ricorso soltanto a 20 celle, a dispetto delle oltre 300 utilizzate per la specifica tecnica italiana –, dall'altro si limita a fornire risultati assai più grossolani, non prevedibili a priori, e soprattutto non diagnosticabili dal momento che risulta difficile capire a quale parametro è dovuto l'errore. Inoltre, tale metodo semplicistico, fa riferimento ad una normativa non più in uso. Si è deciso tuttavia di riportare i risultati ottenuti poiché, il più delle volte, sono prossimi a quelli ricavati con correzione da UNI EN ISO 13790.

¹UNI EN ISO 13790:2005, Appendice H, Paragrafo H.3.2

“Confronto con edifici reali

In particolare, se i calcoli sono effettuati utilizzando valori convenzionali sul comportamento degli occupanti e sulle portate d'aria, possono verificarsi differenze significative rispetto all'energia consumata che è effettivamente misurata. In pratica, questi fattori possono modificare il fabbisogno di energia dal 50% al 150% rispetto al valore medio calcolato, e ancora di più nelle case a schiera e nei blocchi di appartamenti, dove piccole differenze di temperatura tra zone adiacenti spesso portano ad un notevole scambio termico tra le stesse.”

CAPITOLO IV

Dimensionamento di un impianto cogenerativo

L'ultima parte dell'elaborato viene dedicata allo studio di una soluzione cogenerativa da affiancare al caso di studio precedentemente illustrato. L'obiettivo del capitolo è quello di fornire uno strumento – ancora una volta realizzato per mezzo di Excel – che sia in grado, partendo da una certa quantità di informazioni, di dimensionare l'impianto di cogenerazione, e anche la sua modalità di gestione, in modo da ottimizzarne l'uso. Ciò viene fatto per mezzo di un'opportuna funzione obiettivo, massimizzata – facendo ricorso all'algoritmo del Simplexso – rispettando una serie di vincoli adeguatamente imposti.

Prima di procedere con la presentazione del foglio elettronico implementato, e quindi dei risultati ottenuti, è bene fare una introduzione generale sulla cogenerazione e sulle tecnologie attualmente in uso.

4.1 Introduzione alla cogenerazione

GENERAZIONE DISTRIBUITA

Negli ultimi anni è andato crescendo l'interesse verso la generazione distribuita – GD –, per il ruolo che essa potrà avere in un contesto

caratterizzato quasi ovunque da persistenti opposizioni alla realizzazione di grandi impianti di produzione soprattutto per ragioni di impatto ambientale.

Per caratterizzare la GD, che comprende impianti di tipologia molto diversa, alimentati da diverse fonti primarie e con caratteristiche molto diversificate, si può far riferimento alle dimensioni del singolo impianto di produzione ed alla localizzazione nell'ambito del sistema elettrico.

La GD può essere definita come l'insieme degli impianti non direttamente collegati alla rete di trasmissione nazionale e non assoggettati al sistema di disaccoppiamento centrale, dunque non partecipanti alla regolazione di frequenza della rete.

Generalmente quando si parla di GD si comprende una vasta casistica di applicazioni, che hanno in comune due principali caratteristiche:

- l'energia elettrica viene immessa nella rete di media o di bassa tensione, questo perché gli impianti utilizzati nella generazione distribuita sono di una taglia tale da produrre energia elettrica a bassa o media tensione. Quindi per evitare i costi di trasformazione si preferisce immettere l'energia elettrica nelle reti adeguate alla trasmissione generata;
- l'energia elettrica o l'energia termica – entrambe nel caso della cogenerazione – sono generate in vicinanza dell'utenza. In questo modo si evitano le perdite per trasporto che si hanno invece nella generazione centralizzata. Inoltre, nel caso della cogenerazione, si riesce a recuperare buona parte del calore generato.

Certamente, le due tipologie di GD più importanti riguardano:

- la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili – eolico, solare, biomasse e rifiuti, ecc;
- la produzione combinata di energia elettrica e calore da combustibili fossili in motori di taglia medio/piccola – detta cogenerazione.

LA COGENERAZIONE

Gran parte dell'energia elettrica generata in Italia e nel mondo proviene da impianti motori termici, nei quali calore ad alta temperatura viene prima convertito in energia meccanica e quindi in energia elettrica per mezzo di generatori elettrici. Il calore proviene, nel caso delle centrali nucleari da reazioni di fissione – si parla in questo caso di impianti termonucleari – e nel caso delle centrali termoelettriche dalla combustione del combustibile immesso – carbone, gas naturale, frazioni del petrolio, biomasse, ecc. La conversione da calore ad energia meccanica, che è la trasformazione più complessa, avviene sfruttando un ciclo termodinamico. Esistono parecchi cicli termodinamici, ma i più diffusi, nei grossi impianti di potenza, sono i cicli a vapore – cicli Rankine e Hirn – ed il ciclo Brayton-Joule degli impianti turbogas.

In generale, indipendentemente dal ciclo termodinamico sfruttato, il secondo principio della termodinamica stabilisce che non tutto il calore fornito può essere trasformato in lavoro: il limite massimo teorico della quota di calore effettivamente convertibile in lavoro è fissato dal rendimento del ciclo di Carnot. Quello che accade in un generico impianto termoelettrico a combustibile, come quelli presenti in Italia, può dunque essere schematizzato come da figura 74a.

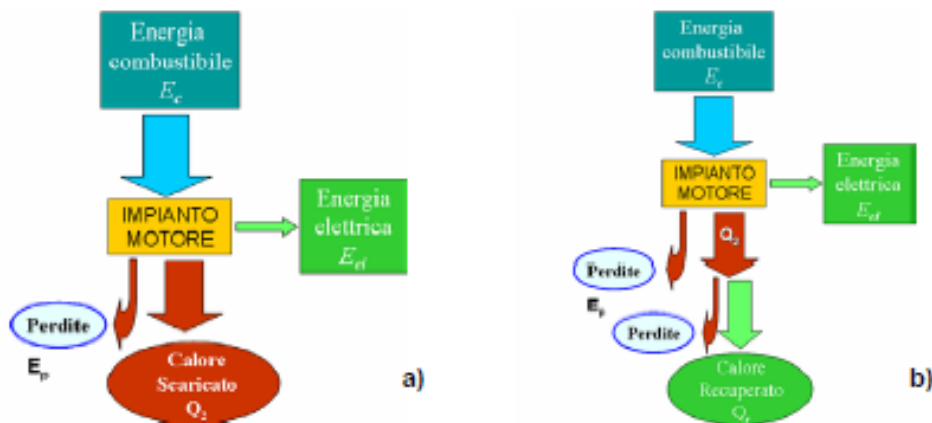


Figura 74: a) Impianto motore a ciclo semplice; b) Impianto motore cogenerativo

L'impianto viene alimentato con un certo quantitativo di combustibile a cui corrisponde un'energia chimica E_c – è l'energia che si libera durante il processo di combustione. L'impianto, attraverso una serie di trasformazioni, fornisce dunque l'energia elettrica E_{el} . Il rendimento globale di conversione dell'impianto η_g misura quanta dell'energia fornita dal combustibile viene effettivamente trasformata in energia elettrica:

$$\eta_g = \frac{E_{el}}{E_c} \quad (54)$$

Un valore indicativo di η_g è 0,35: ciò significa che solo il 35% dell'energia introdotta nell'impianto motore termico è effettivamente convertito in energia elettrica, mentre il restante 65% dell'energia viene di fatto perduta. La maggior parte di questa quota di energia non sfruttata viene persa sotto forma di calore Q_2 scaricato dal ciclo termodinamico: a titolo indicativo si può dire che il calore Q_2 ceduto dall'impianto vale circa il 55% dell'energia introdotta mentre il restante 10% rappresenta altre perdite di vario genere – E_p . La cogenerazione nasce dunque dal tentativo di recuperare in maniera utile tutto o parte di questo calore Q_2 che deve necessariamente essere scaricato da un impianto motore termico. Tale calore in certi casi può essere utilizzato nell'industria, ad esempio sotto forma di vapore, oppure può essere destinato ad usi civili, come per il riscaldamento degli edifici. Qualora l'impianto abbia tali caratteristiche si parla di produzione combinata di energia elettrica e calore – o, semplicemente, produzione combinata. Gli impianti di produzione combinata, dunque, convertono energia primaria, di qualsiasi fonte – solitamente l'energia primaria è quella di un combustibile –, in energia elettrica ed in energia termica, prodotte congiuntamente ed entrambe considerate utili.

La produzione combinata di energia elettrica e calore in uno stesso impianto prende il nome di cogenerazione ed è spesso indicata con l'acronimo inglese CHP – Combined Heat and Power.

È bene tuttavia sottolineare che, in termini rigorosi, le due dizioni “produzione combinata” e “cogenerazione” non sono equivalenti. Infatti, la

normativa vigente in Italia stabilisce che un impianto di produzione combinata può essere considerato impianto di cogenerazione soltanto se soddisfa determinati criteri stabili dall’Autorità per l’Energia Elettrica ed il Gas – AEEG – introdotti al fine di garantire che la produzione combinata di energia elettrica e calore porti ad un effettivo risparmio di energia primaria e che non sia troppo sbilanciata verso la produzione di sola energia elettrica.

Riprendendo lo schema di figura 74a è possibile notare come questo si modifichi nel caso la centrale diventi un impianto di produzione combinata di energia elettrica e calore; la figura 74b mostra infatti come una parte del calore Q_2 scaricato dal ciclo termodinamico su cui si basa l’impianto motore è recuperato per essere sfruttato utilmente – Q_r .

La figura 75 mostra come, a parità di utilizzazione finale – 34 “unità” di energia elettrica e 56 “unità” di energia termica –, la cogenerazione consente un significativo risparmio di energia primaria rispetto alla produzione separata di energia elettrica e calore. Mentre in un impianto CHP l’energia primaria richiesta sottoforma di combustibile è pari a 100 “unità”, con un sistema di produzione separata – SHP, Separated Heat and Power – tale richiesta è assai superiore. In questo caso è infatti necessario fare funzionare una centrale termoelettrica per produrre l’elettricità, dissipando il calore da questa prodotto, ed è inoltre necessario ricorrere ad una caldaia per soddisfare la richiesta termica dell’utenza. Nel caso dunque di sistema SHP l’energia primaria richiesta è pari a 162 “unità”, evidentemente superiore a quella necessaria per soddisfare lo stesso fabbisogno di energia elettrica e termica con un impianto cogenerativo.

La cogenerazione può dunque notevolmente incrementare l’efficienza nell’utilizzo dei combustibili fossili consentendo da un lato di ridurre i costi della bolletta energetica e dall’altro di determinare minore emissioni di sostanze inquinanti e di gas ad effetto serra.

Non va dimenticato infatti che ridurre l’utilizzo di combustibili fossili è un obiettivo prioritario per lo sviluppo sostenibile. Il processo di combustione

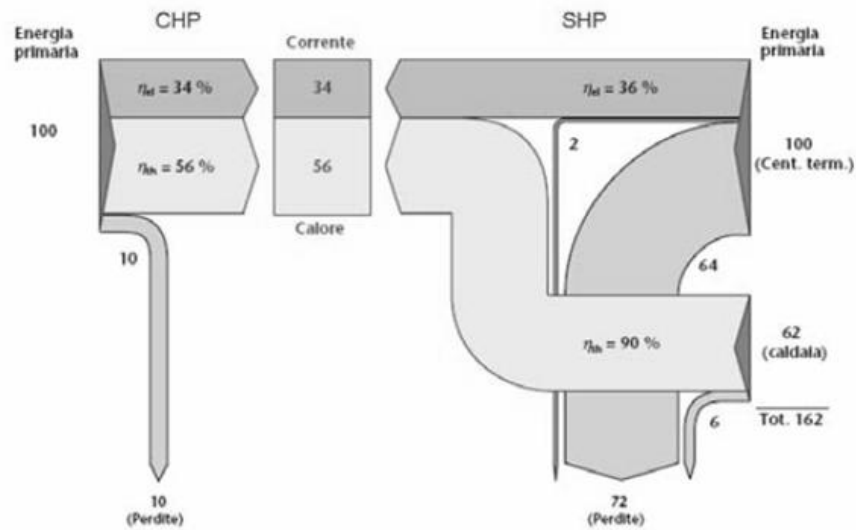


Figura 75: Confronto tra produzione separata di energia elettrica e termica (SHP) e cogenerazione (CHP) – Le grandezze sono espresse in termini di “unità” di energia primaria

che si realizza nelle centrali termoelettriche e nelle caldaie determina sempre emissioni di sostanze inquinanti gassose – ossidi di azoto, ossidi di zolfo, monossido di carbonio, idrocarburi ecc. – e non gassosi – particolato. Tra le altre emissioni di un combustibile fossile – come carbone, derivati del petrolio, gas naturale ecc. – vi è anche il rilascio di anidride carbonica – CO_2 che contribuisce in maniera determinante all’effetto serra. Riduzioni nell’utilizzo di combustibili fossili possono essere ottenute da un lato ricorrendo a sistemi capaci di sfruttare fonti rinnovabili di energia, dall’altro incrementando l’efficienza dei sistemi di utilizzazione e di generazione dell’energia. Tra questi interventi si inserisce certamente anche il ricorso alla cogenerazione. Anche per questo motivo, il Parlamento Europeo ha riconosciuto la cogenerazione come una tecnologia tra quelle necessarie per soddisfare il raggiungimento degli obiettivi del Protocollo di Kyoto e ha pertanto incluso tra le proprie priorità la diffusione progressiva della produzione combinata di energia elettrica e calore.

In generale un sistema cogenerativo è costituito da un impianto motore primo, da un generatore elettrico che, mosso dall’impianto motore, è in

grado di produrre elettricità, e da recuperatori di calore – scambiatori di calore.

Per quanto riguarda i motori primi, le tecnologie di base ad oggi maggiormente impiegate sono:

- impianti turbogas: utilizzati in un ciclo semplice con recupero di calore per la cogenerazione direttamente dai gas di scarico, o in ciclo combinato con recupero di calore per la cogenerazione dopo aver utilizzato i gas di scarico anche per la produzione di vapore di alimento per una turbina;
- impianti a vapore: possono essere a contropressione, se il calore è recuperato dal vapore scaricato dalla turbina, o a spillamento, se il calore è ottenuto da vapore estratto da uno stadio intermedio della turbina;
- motori alternativi a combustione interna: ciclo Diesel o ciclo Otto; in entrambi i casi il calore viene principalmente dai gas di scarico e dal liquido di raffreddamento del corpo motore;

Alle precedenti è possibile tuttavia aggiungere alcune tecnologie innovative, o comunque oggi ancora non pienamente affermate a livello commerciale, quali:

- microturbine;
- motori Stirling;
- celle a combustibile.

Gli impianti di cogenerazione sorgono di solito in prossimità di utilizzatori termici, in quanto, a causa delle elevate perdite di trasmissione, non risulta tecnicamente semplice né economicamente conveniente trasmettere il calore a grandi distanze.

In generale se il calore è prodotto a temperatura relativamente bassa, questo viene utilizzato in ambito civile, come per il riscaldamento di ambienti o il teleriscaldamento urbano. In questo caso il fluido

termovettore è quasi sempre acqua a temperature comprese tra gli 80 e i 120 °C. Se il calore prodotto è a temperatura elevato, il fluido termovettore, che può essere in questo caso vapore in pressione, viene di norma utilizzato nei processi produttivi. Ad esempio l'industria petrolchimica richiede calore a 150 ÷ 200 °C, mentre l'industria alimentare e le cartiere a circa 130 °C.

4.1.1 La direttiva italiana

Si definisce cogenerazione, ai sensi dell'articolo 2, comma 8, del Decreto Legislativo n.79/99 e dell'articolo 2, del decreto legislativo n. 164/00, un sistema integrato di produzione combinata di energia elettrica o meccanica e di energia termica, entrambe considerate energie utili, realizzato dalla sezione di un impianto per la produzione combinata di energia elettrica e calore, che, a partire da una qualsivoglia combinazione di fonti primarie di energie e con riferimento a ciascun anno solare, garantisca un significativo risparmio di energia rispetto alle produzioni separate.

Il paragrafo 2, allegato III, del Decreto Ministeriale del 4 agosto 2011, dà poi la definizione di cogenerazione ad alto rendimento, intesa come la produzione mediante cogenerazione tale per cui si ha un risparmio di energia pari almeno al 10% . Ai fini del riconoscimento della produzione combinata di energia elettrica e calore come cogenerazione ad alto rendimento bisogna dunque, in accordo a quanto prescritto dalla vigente legge italiana, calcolare l'indice di *risparmio di energia primaria – PES* –, così definito:

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{CHP H_{\eta}}{Ref H_{\eta}} + \frac{CHP E_{\eta}}{Ref E_{\eta}}} \right) \cdot 100\% \quad (55)$$

dove:

- $CHP H_{\eta}$ è il *rendimento termico delle produzione mediante cogenerazione*, definito come la quantità annua di calore utile

divisa per l'energia contenuta nell'intero combustibile di alimentazione, impiegato per produrre sia il calore utile che l'energia elettrica da cogenerazione;

- *Ref H_η* è il valore del *rendimento di riferimento per la produzione separata di calore*;
- *CHP E_η* è il *rendimento elettrico della produzione mediante cogenerazione*, definito come energia elettrica annua da cogenerazione divisa per l'energia contenuta nell'intero combustibile di alimentazione, impiegato per produrre sia il calore utile che l'energia elettrica da cogenerazione. Allorché un'unità di cogenerazione genera energia meccanica, l'energia elettrica annua da cogenerazione può essere aumentata di un fattore supplementare che rappresenta la quantità di energia elettrica equivalente a quella di energia meccanica;
- *Ref E_η* è il valore del *rendimento di riferimento per la produzione separata di energia elettrica*.

I valori di rendimento di riferimento per la produzione separata di energia elettrica e di calore sono definiti, rispettivamente, negli allegati IV e V del DM in esame.

4.1.2 Vantaggi e limiti della cogenerazione

Come ogni tipo di tecnologia, anche la cogenerazione presenta vantaggi e svantaggi. In base a quanto visto, indipendentemente dalla particolare tecnologia utilizzata, è possibile sintetizzare i principali vantaggi legati all'utilizzo di un impianto cogenerativo in luogo di un sistema per la generazione separata di calore ed energia elettrica:

- minor consumo di energia primaria grazie alla maggior efficienza del sistema: con impianti cogenerativi è possibile raggiungere indici

EUUF – Energy Utilization Factor – anche superiori a 0.8 - ovvero si riesce a sfruttare utilmente oltre l'80% dell'energia messa a disposizione dell'impianto –, con conseguente minor consumo di combustibile a parità di servizio. In particolare, l'indice EUUF è definito come:

$$EUUF = \frac{E_{el} + Q_r}{E_c} = \eta_{el} + \eta_t \quad (56)$$

- minori emissioni in atmosfera di gas climalteranti ed altre sostanze inquinanti: la migliore efficienza complessiva dei sistemi cogenerativi consente una riduzione nel consumo di combustibili e di conseguenza minori emissioni in atmosfera di gas climalteranti quali ad esempio la CO_2 e di altre sostanze inquinanti che risultano dai processi di combustione;
- riduzione delle perdite per trasmissione: l'applicazione della cogenerazione, essendo l'impianto di norma localizzato vicino all'utente finale, rende minime le perdite per la distribuzione e il trasporto dell'energia;
- possibilità di diminuire i rischi di interruzione del servizio: i sistemi cogenerativi in grado di funzionare anche in modalità "Stand Alone" consentono di ridurre al minimo i rischi di interruzione dell'alimentazione dell'energia per disservizi di rete, condizione di importanza fondamentale in tutti quei contesti in cui sia importante la continuità dell'approvvigionamento dell'energia elettrica.

È bene comunque sottolineare anche i principali limiti di cui tenere conto nella valutazione di un impianto cogenerativo. Il principio della cogenerazione, seppure valido in generale, talvolta non può essere applicato in maniera energeticamente ed economicamente conveniente, se non sono soddisfatte le seguenti condizioni:

- presenza e vicinanza dell'utenza termica: perché un impianto cogenerativo possa essere realizzato è necessario che nelle vicinanze di questo sia presente un'utenza termica, industriale o civile. Tale

necessità di fatto si scontra con la tendenza di collocare in luoghi distanti dai centri urbani o di lavoro gli impianti termoelettrici per la generazione di energia, al fine di limitare l'esposizione della popolazione alle immissioni in atmosfera. L'esigenza dunque di avvicinare ai luoghi frequentati gli impianti di cogenerazione, al fine di non estendere troppo le reti di distribuzione del calore, richiede pertanto che gli impianti cogenerativi siano perlopiù di taglia limitata e comunque dotati di sistemi di abbattimento degli inquinanti emessi dallo scarico assai efficienti;

- contemporaneità delle utenze: un'altra condizione perché un impianto cogenerativo possa essere sfruttato in maniera opportuna è che la richiesta di energia termica ed elettrica siano contemporanee. Un impianto di cogenerazione tipicamente è in grado di mettere a disposizione calore ed energia elettrica simultaneamente, pertanto è necessario che le utenze assorbano tale energia. Per questa ragione spesso gli impianti cogenerativi sono allacciati alla rete elettrica nazionale cedendo a questa l'energia elettrica prodotta in eccedenza e l'impianto viene fatto operare assecondando le richieste di energia termica delle utenze. Qualora poi l'impianto cogenerativo dovesse risultare insufficiente per soddisfare interamente le richieste termiche dell'utenza, in sistema termico ausiliario potrebbe essere introdotto – figura 76;
- compatibilità delle temperature: non tutti gli impianti cogenerativi rendono disponibile calore alla medesima temperatura. Può accadere dunque che un sistema cogenerativo non sia adatto a servire un'utenza termica perché questa richiede calore a livelli di temperatura troppo elevate. È necessario pertanto scegliere correttamente il sistema cogenerativo da accoppiare ad una certa utenza oppure introdurre modifiche all'impianto stesso tali da innalzare la temperatura del calore messo a disposizione;

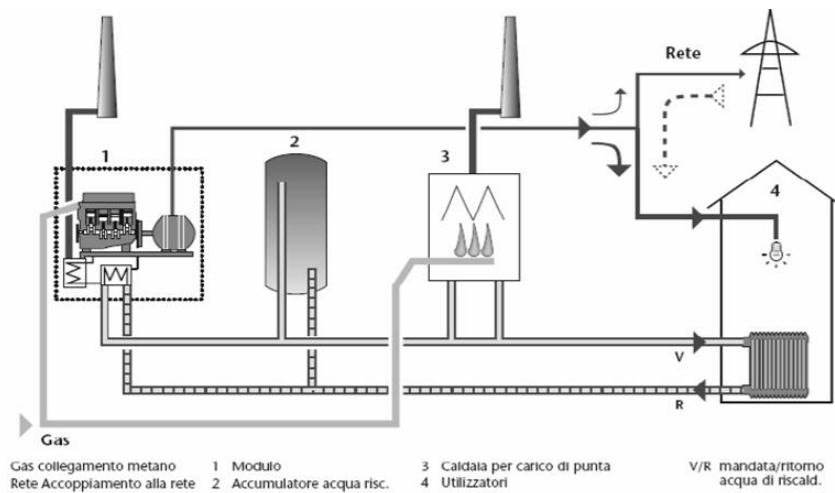


Figura 76: *Impianto cogenerativo basato su un motore a combustione interna a servizio di una utenza con possibilità di cessione alla rete di energia elettrica e caldaia per carico termico di punta*

- flessibilità dell'impianto: pur essendo presenti in maniera contemporanea la domanda di calore ed energia elettrica da parte di una utenza, talvolta il rapporto tra l'energia richiesta nelle due forme può variare. Può accadere dunque che in certi momenti la richiesta di energia elettrica sia proporzionalmente maggiore di quella termica o viceversa. È solitamente apprezzato che un sistema cogenerativo sia in grado di variare il proprio rapporto di cogenerazione; non tutti i sistemi motori su cui basare un impianto cogenerativo offrono tale possibilità, pertanto qualora sia richiesta grande flessibilità certe soluzioni tecniche devono essere abbandonate. Va detto tuttavia che per poter operare con alti rendimenti complessivi che giustifichino gli investimenti di impianto occorre mantenere per quanto possibile entro limiti ben definiti il rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia termica utilizzata.

Da quanto detto si evince che la soluzione della cogenerazione, per risultare tecnicamente ed economica fattibile, deve essere valutata attentamente, con un'analisi approfondita delle utenze – andamento del

tempo dei carichi di energia elettrica e termica – e dei sistemi motori disponibile – ogni utenza può sposarsi meglio con una tecnologia piuttosto che un'altra.

4.2 Soluzioni disponibili

Seguirà ora una descrizione sintetica dei principali impianti motori utilizzati, evidenziando anche le eventuali modifiche che è necessario introdurre per sfruttare anche il cascame termico.

Nella prima parte vengono trattate tecnologie affermate, già impiegate diffusamente. Nella seconda parte è proposta una panoramica delle soluzioni emergenti di cui, pur essendo costituite da tecnologie ormai note, esistono a stento applicazioni cogenerative.

4.2.1 Tecnologie tradizionali

IMPIANTI A VAPORE

I cicli a vapore sono i più sfruttati per la generazione di energia elettrica. Il vantaggio di tale tecnologia sta nella possibilità di utilizzare combustibili di bassa qualità, quale carbone e oli combustibili pesanti. Questo è dovuto al fatto che gli impianti a vapore sono sistemi a combustione esterna, in cui dunque i prodotti della combustione cedono il loro calore ad un altro fluido anziché evolvere direttamente nelle macchine. In figura 77 è proposto lo schema semplificato di un generico impianto a vapore. L'acqua viene portata ad elevata pressione attraverso una pompa – punto 1. Nella caldaia *C* l'acqua vaporizza – punto 2 –, quindi il vapore viene surriscaldato – punto 3 – a spese dell'energia termica rilasciata da una certa massa di combustibile – m_c . Il vapore ottenuto viene inviato ad una turbina dove espande fino alla pressione di condensazione – punto 4 –, cedendo energia agli organi mobili della macchina. La turbina è pertanto

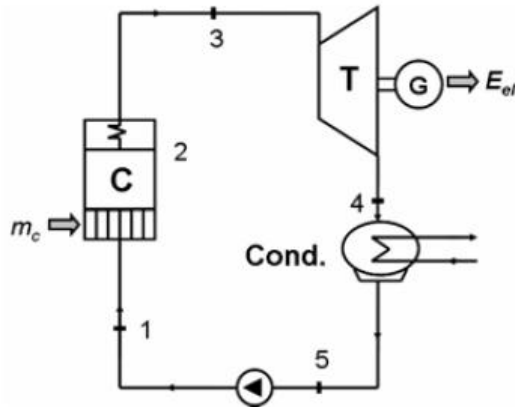


Figura 77: Schema elementare di impianto a vapore con surriscaldamento

in grado di azionare il generatore elettrico G da cui si ottiene l'energia elettrica E_{el} . Per chiudere il ciclo, il vapore deve essere riportato in fase liquida attraverso un condensatore; l'energia sottratta al fluido di processo nel condensatore è proprio il calore Q_2 perso dal ciclo termodinamico. Quello che impedisce lo sfruttamento di tale calore è il fatto che per incrementare il rendimento del ciclo, la pressione e la temperatura di condensazione vengono mantenute al livello più basso possibile – solitamente a temperature dell'ordine dei $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ a cui corrisponde una pressione circa 0.05 bar .

Alcune modifiche al ciclo termodinamico di base devono essere introdotte al fine di rendere l'impianto idoneo alla cogenerazione, così da fornire calore a temperature compatibili con quelle delle utenze. Si realizzano pertanto impianti a contropressione o a spillamento di vapore.

Negli impianti a contropressione – figura 78a – il condensatore di vapore viene by-passato ed il vapore in uscita dalla turbina è inviato ad uno scambiatore di calore dove condensa cedendo calore ad un altro mezzo termovettore che alimenta una utenza termica. La maggiore temperatura a cui avviene la condensazione in questo caso determina maggiori pressioni di condensazione, con perdita di lavoro meccanico e quindi di energia elettrica. Qualora non sia richiesto calore dall'utenza il vapore può condensare in un condensatore normale permettendo dunque al sistema di

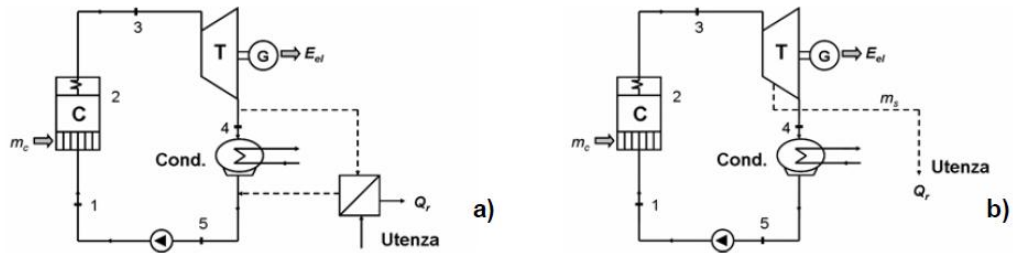


Figura 78: a) Schema di impianto a vapore a contropressione; b) Schema di impianto a vapore di spillamento

operare in sola generazione di energia elettrica. Schemi più semplici di impianti a contropressione sono a circuito aperto e prevedono l'eliminazione del condensatore; sono impiegati quando c'è un assorbimento continuo di vapore da parte dell'utenza.

Negli impianti a spillamento di vapore – figura 78b – la cogenerazione viene fatta prelevando una certa quantità di vapore – m_s – in uno stadio intermedio della turbina – il prelievo potrebbe essere effettuato anche a monte della turbina – per essere inviato ad una utenza termica. Tale configurazione è adottata in larga parte in contesti industriali dove, per necessità tecnologiche e produttive, sono necessari contestualmente energia elettrica e vapore. Variando la quota di portata spillata è dunque possibile variare il rapporto di cogenerazione dell'impianto. Se $m_s = 0$, l'impianto opera in ciclo semplice ed è in grado di fornire solo energia elettrica; aumentando m_s certamente aumenta la quota di energia termica fornita all'utenza ma contestualmente diminuisce l'energia elettrica prodotta. La massa di vapore spillata infatti, dal momento in cui viene sottratta alla turbina, non contribuisce a fornire lavoro meccanico ed anche in questo caso dunque il prelievo di calore va a discapito della resa in energia elettrica.

Da quanto detto si evince pertanto che la cogenerazione con impianti a vapore tradisce il principio di utilizzare unicamente calore che sarebbe scartato dall'impianto: infatti il fluido che viene sottratto per alimentare le utenze termiche sarebbe ancora in grado di compier lavoro utile in turbina.

L'applicazione di cogenerazione da impianti a vapore pertanto si limita perlopiù ad applicazioni industriali in cui sarebbe comunque necessario produrre in maniera continuativa vapore per finalità tecnologiche. Sistemi cogenerativi basati su impianti a vapore si collocano nelle taglie più grandi, con potenze dell'ordine delle decine di MW.

IMPIANTI TURBOGAS

Sistemi turbogas – ciclo Brayton-Joule – sono oggi largamente utilizzati nella propulsione aeronautica in ragione della loro compattezza ma sono sempre più apprezzati per applicazioni stazionarie costituendo la base di impianti cogenerativi ed impianti a ciclo combinato.

Lo schema di base di un impianto turbogas non rigenerato a circuito aperto è mostrato in figura 79a. L'aria viene aspirata dall'ambiente a pressione e temperatura atmosferica – punto 1 – da un compressore – C –, e portata alla condizione 2 con pressione e temperatura aumentate. Questo flusso di aria compressa raggiunge una camera di combustione – CC – dove è introdotta anche una certa massa di combustibile m_c . All'uscita della camera di combustione il flusso di gas compressi si trova ad elevata temperatura – spesso superiore ai 1000°C – ed è nelle condizioni per essere impiegata in una turbina dove espande fino alle condizioni di pressione ambiente – punto 4 –, giacché lo scarico è aperto all'atmosfera. Durante l'espansione il gas cede energia alla macchina che è dunque in grado di trascinare un generatore elettrico – G.

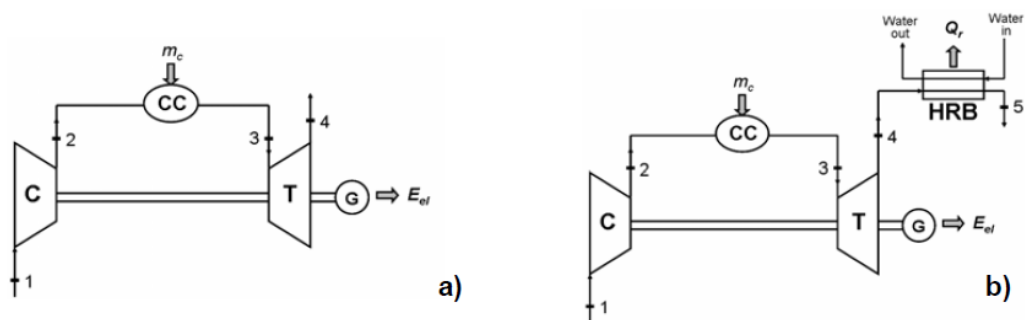


Figura 79: a) Schema di impianto turbogas in ciclo semplice; b) Schema di impianto turbogas cogenerativo

Va osservato come la temperatura dei gas scaricati dalla turbina sia ancora assai elevata – prossima o superiore ai $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ – tale da consentire lo sfruttamento per fini termici.

Il flusso di gas caldi scaricati dalla turbina, la cui energia termica rappresenta il calore Q_2 ceduto dal ciclo, può essere sfruttato direttamente per alimentare una utenza termica – in questo caso il sistema turbogas è in assetto cogenerativo – oppure per alimentare un ciclo a vapore, realizzando così un impianto a ciclo combinato, come descritto nella sezione seguente.

Il modo più semplice di recuperare il calore è quello di posizionare una caldaia a recupero – *HRB*, Heat Recovery Boiler – sul percorso fumi al fine di scaldare un fluido termovettore – ad esempio acqua – da inviare ad una utenza termica, come mostrato in figura 79b.

IMPIANTI A CICLO COMBINATO

Lo schema di impianto turbogas a ciclo semplice di figura 79a può essere ulteriormente modificato portando alla realizzazione di un ciclo combinato, che si ottiene dalla combinazione di due impianti motore in cui uno alimenta termicamente l'altro. Infatti la temperatura dei gas scaricati della turbina a gas sono compatibili con le temperature massime di un impianto a vapore e possono essere usati per alimentare un generatore di vapore a recupero – *HRSG*, Heat Recovery Steam Generator –, con cui produrre vapore per alimentare una turbina a vapore, secondo lo schema di impianto a vapore elementare di figura 77.

In un impianto a ciclo combinato gas-vapore si osserva come, a parità di combustibile impiegato, l'energia elettrica generata è maggiore di quella che si otterrebbe da un turbogas in ciclo semplice, determinando un incremento nel rendimento globale del sistema; proprio per questo motivo i cicli combinati gas-vapore si stanno diffondendo parecchio, con rendimenti elettrici prossimi al 55%.

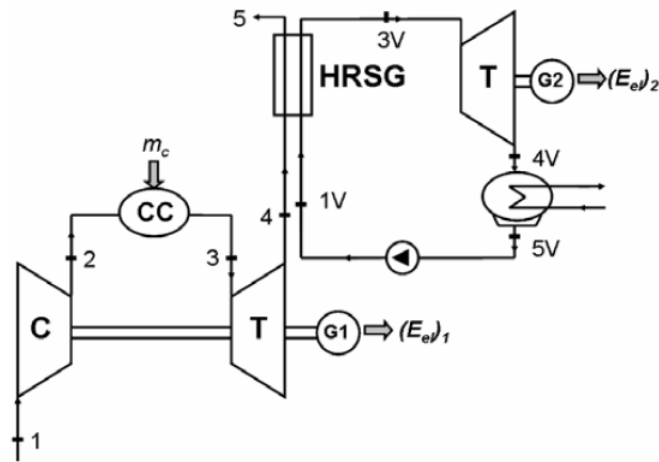


Figura 80: Schema di impianto a ciclo combinato gas-vapore

Un simile sistema si può prestare alla cogenerazione in maniera analoga a quanto visto per un impianto a vapore semplice. Si possono adottare dunque schemi a contropressione o a spillamento.

MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

Motori a Combustione Interna si prestano alla cogenerazione in un campo di potenze piuttosto ampio, con le più piccole unità da poche decine di kW a motori capaci di qualche MW di potenza elettrica.

I motori a combustione interna mettono a disposizione calore a due livelli di temperatura. In un motore diesel ad esempio i gas di scarico vengono rilasciati a temperature dell'ordine dei $450^{\circ}C$, mentre calore a temperature comprese tra 80 e $100^{\circ}C$ può essere recuperato dal liquido del circuito di raffreddamento delle camicie del motore, dal circuito raffreddamento dell'olio motore o sfruttando l'intercooler se il motore è sovralimentato.

In figura 81a è mostrato il diagramma pressione-volume del ciclo teorico Sabathè, che si può ridurre ad un ciclo Diesel e ad un ciclo Otto teorici se la combustione avviene rispettivamente a pressione o volume costante. In un motore a ciclo Otto una miscela di aria e combustibile viene compressa in un cilindro e l'accensione avviene tramite un dispositivo azionato dall'esterno – candela; si parla in questo caso di accensione comandata.

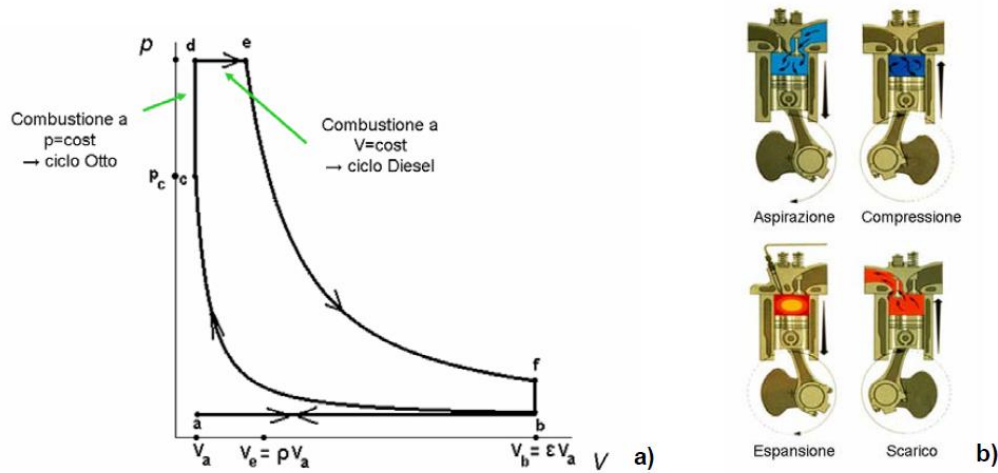


Figura 81: a) Diagramma pressione-velocità del ciclo teorico Sabathè; b) Le quattro fasi di un motore a ciclo Otto

In un motore Diesel solo l'aria è compressa nel cilindro, mentre il combustibile è iniettato al termine della fase di compressione e , a causa dell'elevata temperatura dell'aria compressa, la combustione si avvia in maniera spontanea – accensione spontanea o accensione per compressione.

Motori a ciclo Diesel vengono utilizzati per la cogenerazione quando sono disponibili combustibili idonei all'accensione per compressione, quali gasolio ed oli di vario genere, tra cui anche quelli vegetali. Motori cogenerativi a ciclo Otto utilizzano invece combustibili idonei al funzionamento ad accensione comandata, quale ad esempio il gas naturale, assai impiegato in Italia in quanto largamente disponibile grazie alla rete di distribuzione capillare. Esistono anche versioni *dual fuel* in cui un motore a ciclo Diesel aspira una miscela di aria/metano ma esegue anche una piccola iniezione di gasolio per avviare la combustione.

In figura 81b, dove sono mostrate le quattro fasi di un motore a ciclo Otto, si nota come la fase di espansione sia quella utile, ovvero quella che fornisce lavoro meccanico all'albero che a sua volta è in grado di trascinare il generatore elettrico, mentre nella fase di scarico, con il rilascio dei gas ancora caldi, viene messa a disposizione energia termica ad alta

temperatura. Ponendo una caldaia a recupero sul collettore di scarico, dove confluiscono i gas esausti di tutti i cilindri, tale energia termica può essere recuperata. Osservando con attenzione la stessa figura si possono notare le cavità realizzate nel blocco motore e nella testata dedicate alla circolazione del fluido refrigerante, al fine di limitare la temperatura massima delle componenti meccaniche durante il funzionamento. Il liquido refrigerante che circola in tali condotti costituisce la seconda sorgente principale da cui è possibile estrarre calore in un motore a combustione interna cogenerativo.

4.2.2 Tecnologie innovative

Sistemi cogenerativi basati su soluzioni tecniche differenti da quelle proposte nella precedente sezione si sono recentemente resi disponibili sul mercato, anche se la diffusione e l'industrializzazione di alcuni di questi non ha ancora raggiunto piena maturità. Si tratta per lo più di sistemi adatti ad operare nel campo delle piccole e medie potenze – microturbine, motori Stirling – sebbene tra questi vi siano anche le celle a combustibile in grado di coprire un campo di potenze tra qualche *kW* ad alcuni *MW*.

MICROTURBINE A GAS

Le microturbine a gas sono sistemi del tutto analoghi ai gruppi turbogas descritti nel paragrafo 4.2.1; le limitate potenze richieste alle microturbine – comprese tra 30 e 150 *kW* circa – impongono tuttavia accorgimenti tecnici un po' differenti.

I compressori – e talvolta anche le turbine – sono solitamente di tipo radiale; infatti portate d'aria così basse riescono ad essere elaborate in maniera più efficiente da turbomacchine radiali piuttosto che assiali – che invece vengono impiegate nei più grossi impianti turbogas.

Anche il ciclo termodinamico di riferimento subisce qualche modifica: anziché operare secondo un ciclo Brayton-Joule semplice, il ciclo è quasi

sempre rigenerato. Rigenerare il ciclo termodinamico significa realizzare uno scambio interno di calore; in particolare per i gruppi turbogas si sfrutta l'elevata temperatura dei fumi all'uscita della turbina per preriscaldare l'aria che è stata compressa dal compressore, fornendo dunque maggiore energia al ciclo con l'obiettivo di recuperare maggiore lavoro meccanico a parità di combustibile impiegato.

La pratica della rigenerazione termica risulta particolarmente favorevole per le unità di piccole dimensioni e contribuisce a far raggiungere valori accettabili di rendimento alle microturbine a gas – nell'ordine del 30% – che non sarebbero ottenibili se il ciclo non fosse rigenerato.

La figura 82a mostra dunque il ciclo termodinamico rigenerato in cui è possibile osservare come il calore sottratto ai gas scaricati – area blu – viene fornito all'aria compressa – area rossa. Questo può avvenire tramite un apposito scambiatore aria-gas, chiamato rigeneratore, visibile in figura 82b, dove è mostrato lo schema costruttivo di una microturbina a gas. Nello stesso schema sono riconoscibili anche il compressore, la turbina, la camera di combustione ed il generatore elettrico, posto lungo il condotto di aspirazione aria al fine di essere raffreddato dal flusso di aria fresca che entra nel compressore.

La rigenerazione termica impiegata per le microturbine non penalizza troppo la disponibilità di calore all'utenza termica: la temperatura dei gas di scarico, anche dopo avere attraversato lo scambiatore rigenerativo, sono

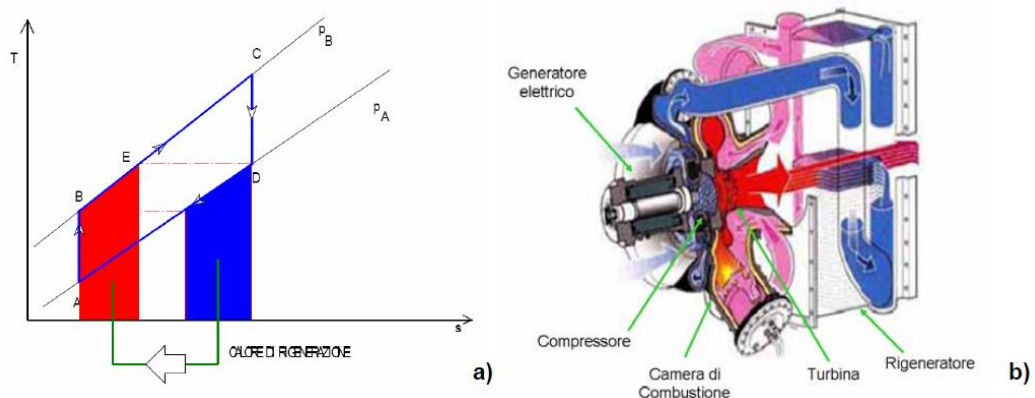


Figura 82: a) Ciclo Brayton-Joule rigenerato; b) Microturbina a gas con rigeneratore

ancora sufficientemente elevate per potere alimentare caldaie a recupero – temperature superiori a 300°C.

Le microturbine a gas sono adatte ad essere impiegate in sistemi di cogenerazione diffusi sul territorio, in competizione con i sistemi basati su piccoli motori a combustione interna. Infatti, la taglia delle microturbine è particolarmente adatta per impieghi nel settore residenziale, terziario – ospedali, centri commerciali, alberghi, ristoranti, ecc. – e nelle piccole industrie. Solitamente sono alimentate a gas naturale e vengono vendute da molti costruttori in moduli completi insonorizzati dotati delle interfacce per i collegamenti alla rete del gas, allo scarico dei fumi, all'ingresso/uscita acqua ed alla rete elettrica.

Il vantaggio delle microturbine rispetto a moduli di analoghe dimensioni basati su motori a combustione interna risiede nelle minori vibrazioni e rumore e nel fatto che non è necessario un sistema ausiliario di smaltimento calore che invece deve essere predisposto per consentire al motore di operare anche quando l'utenza termica non assorbe il carico termico o lo assorbe solo in parte.

Di contro i sistemi basati su microturbine presentano costi di acquisto e manutenzione più elevati rispetto ai motori a combustione interna.

MOTORI STIRLING

La tecnologia del motore Stirling, sviluppata nei primi anni del XIX secolo, sta trovando nuovo interesse in campi quali quello del solare termodinamico e della microcogenerazione.

Il motore Stirling è un motore a ciclo chiuso. Ciò significa che un gas – utilizzato come fluido di lavoro – è confinato all'interno di uno o più cilindri ed è sempre il medesimo gas a compiere il ciclo termodinamico ricevendo e cedendo calore a sorgenti esterne, a differenza di quanto accade nei motori a combustione interna in cui il fluido di processo viene sostituito e ricambiato ad ogni nuovo ciclo del motore. Il motore Stirling

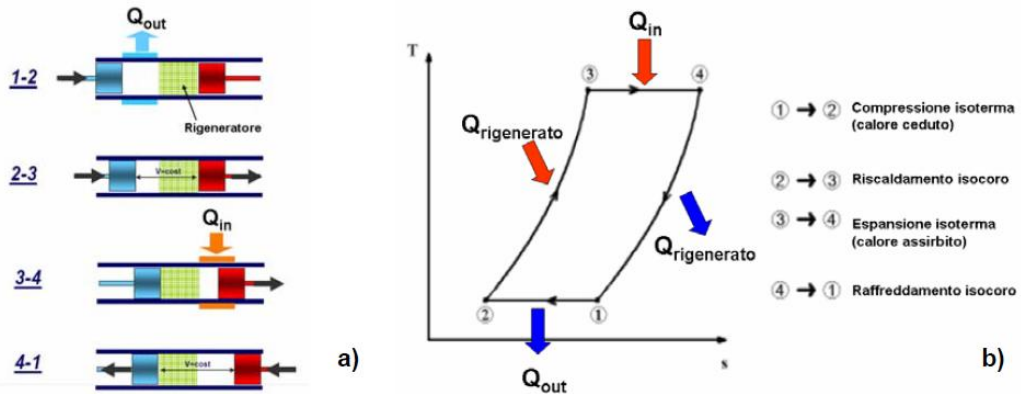


Figura 83: a) Schema concettuale delle fasi di lavoro di un motore Stirling; b) Diagramma sul piano temperatura-entropia del ciclo Stirling ideale

sfrutta le proprietà dei gas di dilatarsi e comprimersi se scaldati o raffreddati.

In figura 83a è mostrato il principio di funzionamento di un motore Stirling. L'introduzione $-Q_{in}$ e la cessione $-Q_{out}$ di calore con l'esterno avviene con continuità nella zona calda e fredda della macchina tramite scambiatori di calore – la zona calda in particolare è mantenuta in temperatura dai gas che derivano da un processo esterno di combustione.

Nel passaggio tra una zona e l'altra della macchina il gas attraversa un rigeneratore – in certi casi si tratta di un agglomerato di fili metallici – cedendogli calore o recuperando calore; questo è uno scambio di calore interno alla macchina – il ciclo è infatti rigenerato.

Il fluido di lavoro viene trasferito avanti e indietro tra le zone calda e fredda mediante il movimento dei pistoni; lo scambio di lavoro con l'esterno avviene durante le fasi di espansione e compressione.

Una caratteristica fondamentale del motore Stirling è il fatto che il calore viene introdotto dall'esterno mediante uno scambiatore di calore e questo consente di utilizzare qualsiasi tipo di combustibile, anche solido, cosa che non sarebbe possibile in un motore a combustione interna. I prodotti della combustione infatti nei motori Stirling non entrano in contatto diretto con le parti mobili della macchina. Inoltre, il processo di combustione continua che si ha in un bruciatore esterno, consente alla macchina di funzionare in

modo estremamente regolare, silenzioso e con bassissime vibrazioni, richiedendo interventi di manutenzione assai ridotti. La vita utile può arrivare anche ad oltre 60.000 ore di funzionamento.

In generale unità Stirling per uso cogenerativo vengono oggi commercializzate nella fascia di potenze 1 - 50 *kWe* ed offrono rendimenti elettrici compresi tra il 12%, per le più piccole unità, e il 30%. L'indice *EUF* è in ogni caso superiore al 90%, pertanto anche le unità che sfruttano poco il combustibile per la produzione elettrica consentono comunque un ampio recupero di energia in forma termica.

CELLE A COMBUSTIBILE

La cella a combustibile, denominata anche FC - *Fuel Cell* -, è un dispositivo elettrochimico che converte l'energia chimica del combustibile direttamente in energia elettrica e calore senza stadi intermedi di combustione. Il fatto dunque che le FC non impieghino un ciclo termodinamico implica che questi sistemi non sono limitati nel valore massimo teorico del rendimento dal limite del ciclo di Carnot. Elevati valori di rendimento elettrico infatti sono stati raggiunti sia da FC sperimentali che commerciali. Il limite alla loro diffusione tuttavia risiede per ora negli elevati costi di realizzazione e nella tecnologia che, per alcune tipologie di FC, ancora non ha raggiunto piena maturità.

Esistono infatti varie tipologie di FC caratterizzate da tecnologie differenti. La natura del principio di funzionamento è comunque la stessa ed è possibile descriverne gli aspetti fondamentali facendo riferimento ad una cella di tipo PEM - Proton Exchange Membrane -, mostrata in figura 84.

Il sistema cella a combustibile si compone di due elettrodi - Anodo e Catodo - ed un elettrolita tra questi disposto. Il combustibile - idrogeno - viene fatto affluire all'anodo, presso il quale ha luogo la sua ossidazione.

Questo processo, di natura elettrochimica, avviene a temperatura relativamente bassa ed è favorito dalla presenza di un catalizzatore

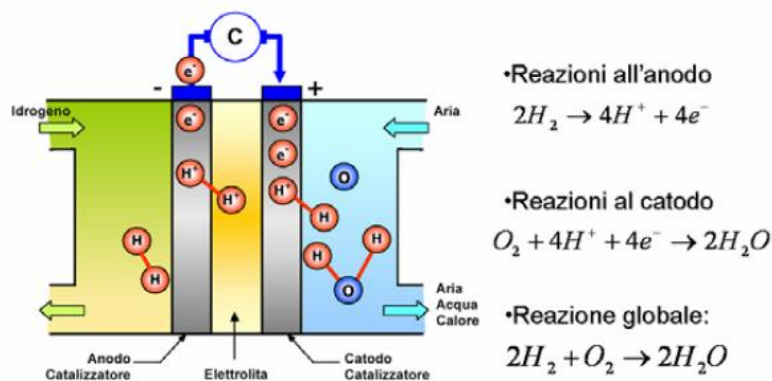


Figura 84: Principio di funzionamento di una cella a combustibile di tipo PEM

disposto sull'elettrodo. L'ossidazione del combustibile provoca la liberazione di elettroni, che possono spostarsi lungo l'anodo – elettrodo negativo.

L'anodo è infatti conduttore e permette la migrazione degli elettroni verso un circuito esterno. Al capo opposto del circuito, su cui è disposto un carico, si trova l'elettrodo positivo. Presso il catodo si ha la riduzione della specie ossidante, aria o ossigeno, fatta affluire al comparto catodico mediante un opportuno compressore. A seguito della liberazione di elettroni, all'anodo si sono venuti a creare ioni positivi; questi ioni, grazie alla presenza dell'elettrolita – conduttore ionico – migrano verso il catodo, dove si ricombinano con gli elettroni e le molecole di ossigeno, dando luogo a molecole d'acqua quale unico prodotto di reazione, se la specie ossidante è ossigeno puro.

Da questo punto di vista dunque si evince come la cella a combustibile sia totalmente esente da emissioni inquinanti e di gas serra – CO_2 – durante il funzionamento. Va tuttavia osservato come l'idrogeno, principale combustibile utilizzato nelle FC, non è direttamente disponibile in natura – non è infatti una fonte primaria di energia. Esso va prodotto mediante processi – reforming, elettrolisi dell'acqua, ecc. – che determinano comunque l'emissione di gas serra – a meno di produrlo sfruttando fonti rinnovabili di energia. Sebbene la FC alimentata ad idrogeno ed ossigeno non dia luogo direttamente ad emissioni climalteranti, la produzione

dell'idrogeno quasi certamente sì, pertanto il problema delle emissioni è solo spostato.

Ogni cella elementare – come quelle mostrate in figura 84 – è in grado di fornire una tensione assai bassa, quindi la cella finale si compone di uno *stack* – ovvero un insieme – di celle elementari elettricamente collegate tra loro.

Per la produzione di energia elettrica le diverse tipologie di FC devono mantenere costante la temperatura e quindi il calore prodotto deve essere smaltito; tale calore può essere recuperato ed utilizzato in maniera utile realizzando in tal modo un sistema cogenerativo.

I limiti principali da superare per una maggiore diffusione delle FC sono i costi di produzione, ancora molto elevati, e alcuni problemi di resistenza alla corrosione e/o agli stress termici per le celle funzionanti ad alta temperatura.

Una caratteristica interessante delle celle a combustibile è che i rendimenti non dipendono dalle taglie di potenza, contrariamente ai sistemi tradizionali di produzione dell'energia elettrica. Una unità domestica da pochi *kW* pertanto presenta medesimi rendimenti di una cella più grande ad uso industriale della stessa famiglia. La cella è infatti costituita da una serie di componenti elementari e la potenza del modulo – *stack* – dipende da quanti di questi sono stati collegati tra loro, ma il rendimento è intrinseco al funzionamento del componente elementare.

Un'altra caratteristica importante è che il funzionamento a carichi parziali delle FC non porta al decadimento delle prestazioni ma anzi si hanno rendimenti lievemente superiori a carichi ridotti, ed anche in questo le FC si antepongono al funzionamento delle tipiche macchine termiche.

4.3 Algoritmo per il dimensionamento e la scelta della modalità di funzionamento di un impianto cogenerativo

Fatta questa breve introduzione sulle tecnologie disponibili – in uso e non –, si passa alla descrizione dell'algoritmo implementato.

Come già espresso in precedenza, solitamente, il sistema elettrico relativo all'impianto di cogenerazione è collegato in parallelo con la rete pubblica e l'energia elettrica può essere scambiata nei due sensi con quest'ultima, disaccoppiando l'andamento della produzione elettrica dell'impianto da quello dei fabbisogni dell'utenza. Il sistema termica dell'impianto di cogenerazione invece, è sempre completato da una o più caldaie di tipo convenzionale, che svolgono funzione di integrazione – quando l'assorbimento dell'utenza supera la potenza termica producibile in cogenerazione – rispetto al sistema cogenerativo. Quanto espresso può essere rappresentato schematicamente in figura 85.

Ogni impianto, in funzione del tipo di motore primo e delle soluzioni impiantistiche adottate, è caratterizzato da un ben determinato rapporto E/Q , dove:

- E energia elettrica producibile;
- Q calore recuperabile.

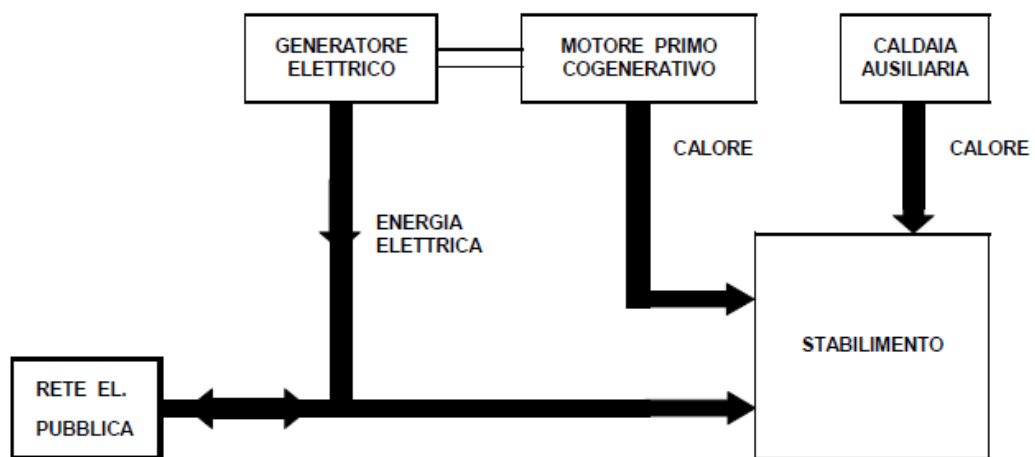


Figura 85: Schema di principio di un impianto di cogenerazione

In modo analogo, anche l'utenza dell'impianto è caratterizzata da un proprio valore del rapporto E/Q , dove stavolta:

- E energia elettrica assorbita;
- Q calore consumato.

L'impianto di cogenerazione, in generale, deve essere progettato in modo che il suo E/Q si avvicini il più possibile al medesimo rapporto relativo all'utenza a regime, o comunque, l' E/Q dell'impianto non deve mai essere inferiore a quello dell'utenza. Infatti normalmente – soprattutto nelle ore di punta –, l'energia elettrica è valorizzata a prezzi maggiori rispetto al calore. Si cerca quindi di ottimizzare il dimensionamento dell'impianto in funzione degli assorbimenti elettrici dell'utenza, e solo secondariamente in base ai fabbisogni termici dell'utenza – con l'obiettivo quindi di evitare un eccessivo spreco di calore cogenerativo non utilizzabile.

L'energia elettrica viene generalmente autoprodotta per autoconsumo, sul luogo stesso di produzione o in luoghi remoti – vettoriamento. È però possibile, ma meno remunerativa, anche la cessione – in tutto o in parte – dell'energia elettrica alla rete pubblica.

Quello che solitamente accade è che il rapporto E/Q dell'utenza, funzione di molti fattori – ora del giorno, giorno della settimana, stagione dell'anno, ecc. – ha variazioni anche molto significative. Per questo motivo, al di là del dimensionamento dell'impianto, vanno previste e gestite le seguenti condizioni operative per la centrale di produzione:

- **esubero di produzione di energia elettrica.** L'esubero viene riversato sulla rete elettrica pubblica: allo stato attuale, può avere due utilizzi ovvero il vettoriamento verso un'altra utenza che appartiene al proprietario dell'impianto, o vendita ad un altro soggetto – tramite apposito contratto;
- **deficit di produzione di energia elettrica.** L'energia elettrica mancante per l'utenza viene approvvigionata dalla rete mediante apposito contratto da stipulare con un produttore/distributore;

- **esubero di produzione di calore.** Normalmente, il calore che l'impianto di cogenerazione produce in esubero rispetto al fabbisogno dell'utenza, viene evacuato all'ambiente esterno – raramente si prevede un sistema di accumulo di calore che consenta di stoccarne l'esubero per poi utilizzarlo nei momenti di punta del carico termico;
- **deficit di produzione di calore.** Il deficit di energia termica viene soddisfatto mediante l'impiego di caldaie semplici di integrazione, installate in centrale o presso l'utenza.

Da quanto descritto, si capisce che l'energia elettrica prodotta trova sempre completo utilizzo e, quindi, le situazioni in cui E/Q dell'impianto supera quello dell'utenza non comportano sprechi energetici. Viceversa, se il rapporto dell'impianto fosse inferiore a quello dell'utenza, si potrebbe avere esubero di calore che normalmente viene evacuato, con conseguente spreco energetico: per questo motivo, nella scelta del tipo d'impianto, si cerca di evitare questo secondo caso.

Fino a qualche anno fa, il criterio di dimensionamento dei cogeneratori in applicazioni civili normalmente utilizzato, prevedeva di soddisfare il così detto "zoccolo termico": la potenza erogata dal cogeneratore copriva cioè il 30-40% del carico termico totale. In questo modo, la dissipazione di parte del calore non era presa in considerazione. Tuttavia, come si mostrerà nel caso di studio preso in esame, l'andamento del costo di produzione di energia elettrica, al netto della valorizzazione del kWh termico risparmiato dalla caldaia tradizionale, continua ad essere conveniente anche con parziale dispersione del calore. Per questo motivo vengono previste le seguenti modalità di gestione:

- funzionamento a carico massimo dell'impianto;
- carico elettrico comanda;
- carico termico comanda.

Nel primo caso – l'unico utilizzato in passato –, l'impianto funziona al proprio carico massimo: se c'è un eccesso di energia elettrica, questa viene venduta alla rete, mentre, l'eventuale calore in esubero, viene dissipato. Nel secondo caso, viene prefissata la potenza elettrica che deve essere prodotta dall'impianto il quale cercherà di seguirla. In questo caso può verificarsi il solito esubero di calore da dissipare nell'aria. L'ultima modalità di funzionamento opera dualmente rispetto alla precedente: gli sbilanciamenti di potenza elettrica – prodotta di conseguenza in funzione del rapporto E/Q dell'impianto – viene compensata dalla rete, per modo che non si verifichino dissipazioni alcune.

Col fine di dimensionare l'impianto di cogenerazione, ma anche di selezionare, di volta in volta, la modalità di funzionamento più efficace, viene realizzata una funzione obiettivo, da massimizzare, in base al criterio del costo evitato, di seguito riportato.

Per prima cosa, occorre valorizzare l'energia termica prodotta da cogenerazione, ossia occorre calcolare il valore – in euro – da attribuire al singolo kWh . La logica con cui ciò viene fatta è la seguente: ogni kWh fornito da cogenerazione, non deve ovviamente essere fornito anche dalla caldaia tradizionale ausiliare, che ha un ben determinato costo di produzione; il costo evitato – risparmio – che se ne ricava da ciò è proprio il valore con cui viene valorizzato il kWh da cogenerazione. In altre parole:

$$\text{Valore } kWh_{\text{cogenerazione}} = \text{Costo } kWh_{\text{caldaia}} \quad (57)$$

Il costo per la produzione di un kWh con un impianto tradizionale, viene così definito:

- calcolo del calore da immettere in caldaia – in base al rendimento di caldaia – per ottenere 1 kWh di energia termica netta;
- calcolo del quantitativo di combustibile da bruciare in caldaia – in base al suo potere calorifico – per ottenere il calore sopra calcolato;

- calcolo del costo di questo quantitativo di combustibile, in base al suo prezzo unitario.

Il calcolo sopra descritto è riportato in figura 86. Il valore di un *kWh* prodotto dall'impianto di cogenerazione è dunque pari a 0,0405 € .

Il prezzo di valorizzazione dell'energia termica per le utenze civili è molto superiore a quello per le utenze industriali – prezzo unitario pari a circa 0,70 €/Sm³ anziché 0,33 €/Sm³ –, sia per le diverse accise sul prezzo del gas, sia per la possibilità, da parte delle utenze industriali, di scaricare l'IVA gravante sul costo del combustibile. Normalmente però la centrale di cogenerazione – qualunque sia l'uso finale del calore – si configura come un'utenza industriale, per cui il valore del calore cogenerato, valutato col criterio del costo evitato, è quello calcolato per le utenze industriali.

In modo analogo a quanto fatto per il calore, occorre valorizzare l'energia elettrica. Come detto, essa può essere di due tipi:

- energia elettrica fornita all'utenza, valorizzata in base al prezzo a cui l'utenza acquisterebbe energia elettrica dalla rete – in realtà tale

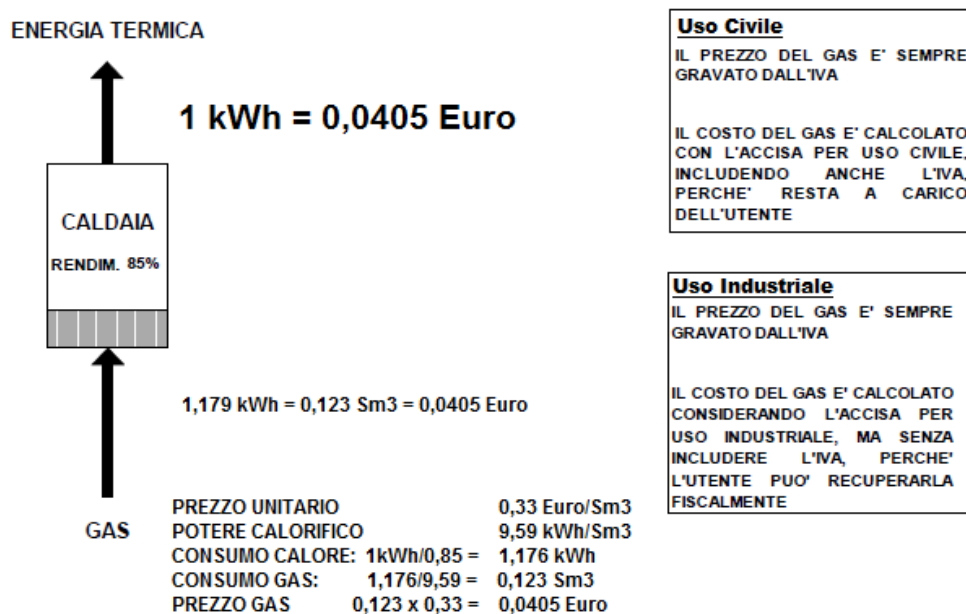


Figura 86: Bilancio economico del funzionamento di una caldaia

valore dipende dalla fascia oraria, ma si è deciso di considerare, in prima approssimazione, un valore medio pari a 0,10 €/kWh;

- energia elettrica fornita alla rete, valorizzata in base al prezzo concordato per la cessione – analogamente al precedente, anche questo è diverso per fascia oraria, e viene approssimato a 0,06 €/kWh.

A questo punto occorre calcolare il costo necessario per produrre un singolo kWh di energia elettrica. Tale valore è ottenuto dalla somma di due componenti:

- costo del combustibile;
- costo delle manutenzioni + lubrificazioni.

Per quanto riguarda il secondo aspetto, esistono parametri che consentono di stimare l'incidenza di questo costo sull'energia prodotta – in figura 87 è rappresentato un esempio. Per l'analisi svolta, si considererà un costo per la manutenzione pari a 0,012 €/kWh.

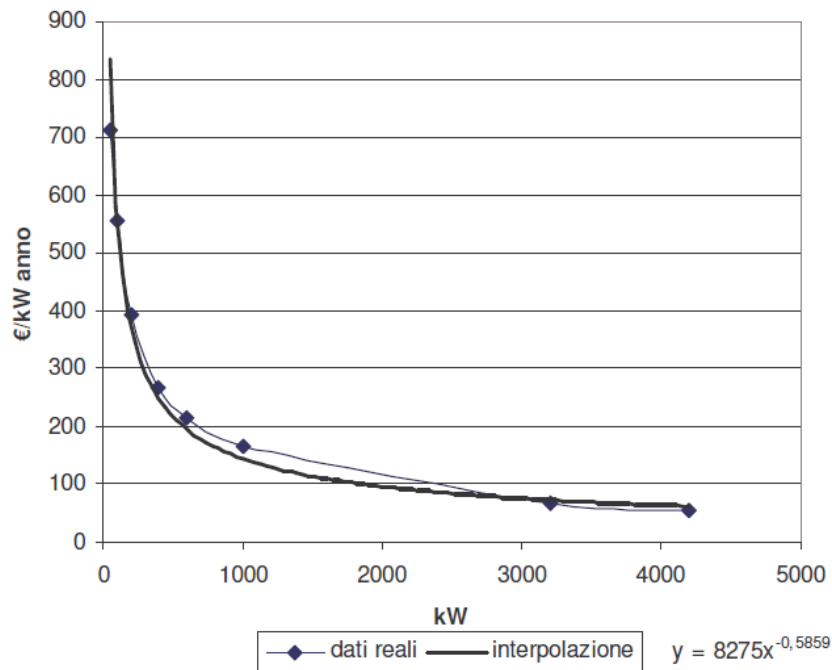


Figura 87: Stima del costo di manutenzione di un impianto cogenerativo in funzione della taglia dello stesso

Per quanto riguarda il calcolo del costo del combustibile, si procede come fatto relativamente al calore, ovvero:

- calcolo del calore da immettere nell'impianto – in base al rendimento elettrico – per ottenere 1 *kWh* di energia elettrica;
- calcolo del quantitativo di combustibile da immettere – in base al suo potere calorifico – per ottenere il calore sopra calcolato;
- calcolo del costo di questo quantitativo di combustibile, in base al suo prezzo unitario.

Di seguito sono riportati i valori utilizzati per il seguente caso di studio:

- costo unitario gas 0,24 €/Sm³
- potere Calorifico 9,59 kWh/Sm³
- costo di 1 kWh_{th} 0,24/9,59 = 0,025 €/kWh_{th}
- rendimento Elettrico 0,40
- costo di 1 kWh_e 0,025/0,40 = 0,064 €/kWh_e

Sommando i due costi, si ricava il costo totale per la produzione del singolo kWh_e, ovvero 0,064 + 0,012 = 0,072 €/kWh_e.

Nella procedura di calcolo sopra citata, appare il termine relativo al rendimento elettrico dell'impianto di cogenerazione – ipotizzato pari al 40%. Tale grandezza è, come si vede, inversamente proporzionale al costo del kWh_e: pertanto, come del resto è lecito aspettarsi, il prezzo diminuisce all'aumentare di η_e . Tale conclusione risulterà assai importante quando si andranno a definire i vincoli della funzione di costo da massimizzare.

4.3.1 Funzione obiettivo

La funzione obiettivo che viene implementata, non è altro che il margine operativo lordo, ottenuto come differenza tra i ricavi e i costi istantanei ed è così definita:

$$J = (P_{el,u} \cdot r_u + P_{el,v} \cdot r_v + P_{th,u} \cdot r_{th}) - P_{el} \cdot c \quad (58)$$

dove:

- J margine operativo lordo, [€/h];
- P_{el} potenza elettrica fornita dal cogeneratore, [kWe];
- $P_{el,u}$ potenza elettrica destinata ad uso utenza, [kWe];
- $P_{el,v}$ potenza elettrica eventualmente venduta alla rete, pari a $(P_{el} - P_{el,u})$, [kWe];
- $P_{th,u}$ potenza termica prodotta da cogeneratore effettivamente utilizzata dall'utenza – non dissipata, [kWt];
- c costo totale per la produzione del singolo kWh_e, [€/kWh_e];
- r_u prezzo di valorizzazione dell'energia elettrica ad uso utenza, [€/kWh_e];
- r_v prezzo di valorizzazione dell'energia elettrica esportata in rete, [€/kWh_e];
- r_{th} prezzo di valorizzazione dell'energia termica, [€/kWh_t].

La funzione obiettivo così definita, viene massimizzata in tutte e tre le modalità di funzionamento previste, dal momento che non esiste una soluzione migliore per definizione ma, a seconda delle condizioni operative, può risultare più efficace una modalità piuttosto che un'altra. A dimostrazione di ciò vengono riportati i seguenti tre casi:

UTENZA		
	Potenza elettrica richiesta [kWe]	Potenza termica richiesta [kWt]
CASO I	1.400	1.700
CASO II	930	1.100
CASO III	900	950
IMPIANTO DI COGENERAZIONE		
	Potenza elettrica massima [kWe]	Potenza termica massima [kWt]
COGENERATORE	1.000	1.128

Tabella 8: Esempi di modalità di funzionamento dell'impianto di cogenerazione

Nel CASO I, i fabbisogni di potenza elettrica e termica dell'utenza superano le rispettive potenze che il motore cogenerativo può fornire a carico massimo e quindi il motore viene fatto funzionare sempre al 100% del carico, con sfruttamento totale delle energie prodotte.

Nel CASO II entrambi i fabbisogni di potenza dell'utenza, sono inferiori alle potenze che il motore cogenerativo può fornire a carico massimo. Per questo motivo si può avere:

- funzionamento ad un carico – 93% – tale da coprire esattamente i fabbisogni elettrici dell'utenza; la potenza termica prodotta risulta però inferiore al fabbisogno di stabilimento e dovrà essere dunque fornita con l'ausilio di una caldaia tradizionale;
- funzionamento ad un carico – 98% – tale da coprire esattamente i fabbisogni termici dell'utenza; di conseguenza la produzione elettrica diviene superiore al fabbisogno dell'utenza e l'eccesso viene esportato sulla rete;
- funzionamento al 100% del carico, dove parte di energia elettrica sarà esportata alla rete e parte di energia termica sarà dissipata.

In questo caso specifico, la modalità di funzionamento migliore è la seconda perché, rispetto alla prima, c'è uno sfruttamento maggiore del carico, sia in termini di energia termica che elettrica e, rispetto alla terza, perché in quest'ultimo caso si alza il carico solo per produrre energia elettrica per asportazione – valorizzata a 0,060 €/kWh mentre il costo di produzione è 0,072 kWh –, senza recuperare l'energia termica.

Infine, nel CASO III, si ha ancora una richiesta di potenze inferiori a quelle che possono essere fornite dall'impianto e quindi si possono avere ancora le tre modalità di funzionamento:

- funzionamento ad un carico – 90% – tale da coprire esattamente i fabbisogni elettrici dell'utenza. In questo caso però – a differenza del CASO II –, la potenza termica prodotta risulta superiore al fabbisogno di stabilimento ed una parte del calore viene evacuato;

- funzionamento ad un carico – 84% – tale da coprire esattamente i fabbisogni termici dell’utenza. Di conseguenza la produzione elettrica diviene inferiore al fabbisogno dell’utenza e la differenza deve essere prelevata dalla rete;
- funzionamento al 100% del carico, massimizzando l’energia elettrica prodotta e quindi creando un eccesso che viene esportato alla rete. Nel contempo, rispetto alla prima modalità, aumenta la parte di calore cogenerato che risulta in eccesso e che deve quindi essere disperso.

In quest’ultimo caso, la modalità di funzionamento elettrico-comanda conviene di più della seconda, dal momento che frutta maggiormente produrre energia elettrica per uso diretto dell’utenza, anche se non si riesce a recuperare l’energia termica, piuttosto che dover acquistare energia dalla rete e, naturalmente, conviene più dell’ultima condizione, dove si aumenta il carico solo per vendere energia elettrica in rete – aumentando inoltre il calore evacuato.

A riprova di quanto detto, in tabella 9 vengono riportati i valori della funzione di costo per i casi II e III: i risultati ottenuti sono concordi con quanto precedentemente riferito.

In figura 88 è riportato, a titolo di esempio, un grafico che illustra il calcolo del margine operativo lordo relativo al CASO II, con modalità termico comanda.

	CARICO MASSIMO	ELETTRICO COMANDA	TERMICO COMANDA
CASO II	65,6	64,6	66,0
CASO III	58,3	59,9	58,4

Tabella 9: Margine operativo lordo nei casi II e III

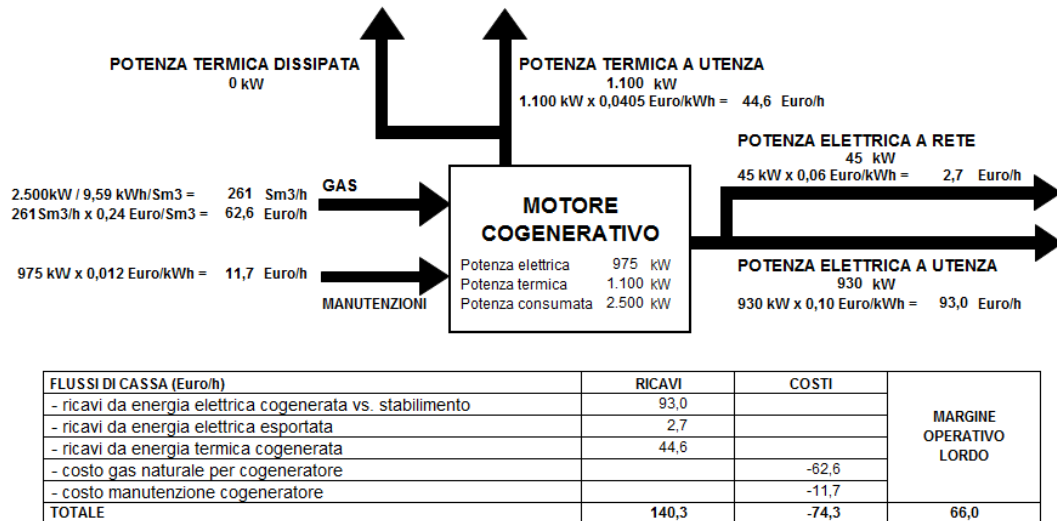


Figura 88: Calcolo del margine lordo operativo relativo al funzionamento termico comanda del Caso II

4.3.2 Vincoli

Definita la funzione obiettivo, occorre spendere due parole sui vincoli ad essa annessi. Questi, scritti ovviamente sotto forma di semplici disequazioni lineari, hanno lo scopo di delimitare un campo di ammissibilità verosimile.

Il primo vincolo riguarda il già citato indice di risparmio di energia primaria. Come detto, il PES, deve essere superiore al 10% per poter garantire – secondo le norme vigenti – una cogenerazione ad alto rendimento.

Un secondo vincolo fondamentale riguarda il rendimento elettrico dell'impianto cogenerativo. In precedenza si è infatti detto che η_{el} è inversamente proporzionale al costo di produzione di un kWh. Per questo motivo, quando si va a massimizzare la funzione di costo, si trova ovviamente il massimo di J in corrispondenza del massimo di η_{el} : appare infatti evidente che, migliore è il rendimento elettrico, maggiore è il ricavo dato dall'autoproduzione. Per rimanere coerenti con le soluzioni

disponibili in realtà ,occorre quindi limitare tale parametro: viene scelto quindi un valore massimo di η_{el} pari al 40%.

L'ultimo vincolo significativo riguarda il numero di ore di funzionamento in cui viene utilizzata contemporaneamente dall'utenza l'energia termica e l'energia elettrica prodotta. Tale parametro risulta essere il più critico dal momento che non esiste, ad oggi, alcuna indicazione su quante ore effettivamente l'impianto debba funzionare: nei vari manuali infatti ci si limita ad affermare, in maniera del tutto arbitraria, che bisogna evitare venga dissipata troppa energia termica. La scelta di tale vincolo varrà discussa nel paragrafo 4.4.

4.3.3 Ricerca dell'ottimo

Definita la funzione obiettivo e i relativi vincoli da rispettare, non rimane che affrontare il problema di ricerca dell'ottimo. Per fare ciò si fa ricorso al Risolutore fornito da Excel stesso, uno strumento che basa la propria analisi su una procedura iterativa nota come "Metodo del Simplex".

Il metodo del Simplex è un algoritmo che permette, attraverso un numero finito di iterazioni, di passare da una soluzione ammissibile di base alla soluzione ottima – ammesso che il problema ammetta soluzione, ossia che i vincoli siano compatibili e quindi l'insieme delle soluzioni ammissibili non sia vuoto.

Non è certo obiettivo del presente elaborato fornire una spiegazione dettagliata del procedimento seguito da tale algoritmo, pertanto ci si limita alla descrizione sintetica dei passi seguiti:

- si determina una prima soluzione ammissibile di base e si calcola il valore z assunto dalla funzione da massimizzare;
- si passa da questa prima soluzione ad una seconda soluzione ammissibile di base che migliori il valore di z , modificando i valori

delle incognite della prima soluzione in modo che una variabile, che prima era nulla, entri nella base e ne esca un'altra;

- si procede iterando i passi precedenti finché non si giunge alla soluzione ottima.

In particolare, poiché un approccio puro “tentativi ed errori” richiederebbe un tempo molto lungo, il Risolvente di Excel esegue analisi dettagliate degli output osservati – ed in particolare delle derivate parziali – in modo da determinare in quale direzione imporre la successiva modifica.

In figura 89 è rappresentato un esempio di interfaccia del risolutore appena descritto.

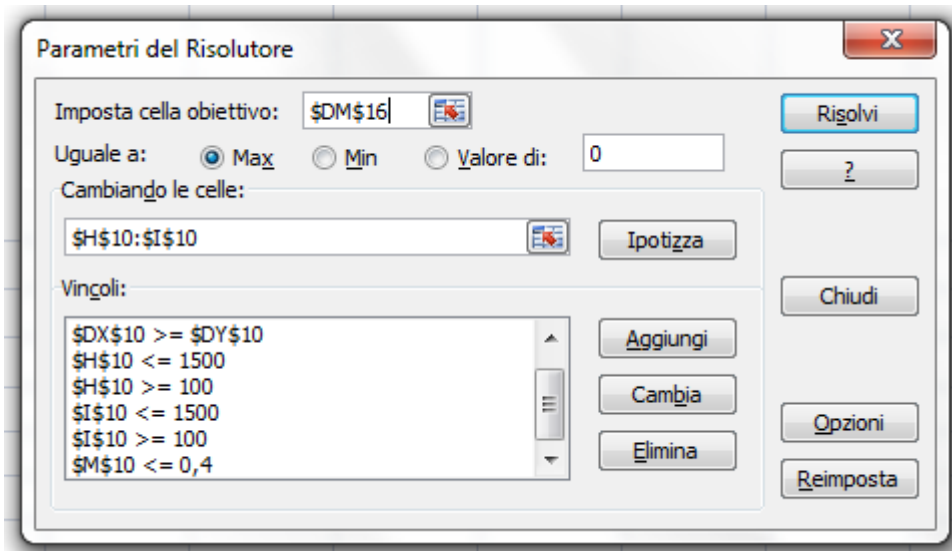


Figura 89: Interfaccia del Risolutore di Excel

4.4 Esempio applicativo: Campus Bovisa

La funzione di costo precedentemente descritta viene implementata attraverso Excel e applicata al caso di studi descritto nel capitolo precedente. In figura 90 sono riportati i carichi di energia termica ed elettrica dei due Campus di Bovisa.

Mese	Giorni	Settimane	Stima ore di funzionamento giornaliero	Potenza assorbita - Durando				Potenza assorbita - La Masa			
				Fabbisogno energia elettrica [kWh/mese]	Fabbisogno energia termica [kWh/mese]	Potenza elettrica media [kWe]	Potenza termica media [kWt]	Fabbisogno energia elettrica [kWh/mese]	Fabbisogno energia termica [kWh/mese]	Potenza elettrica media [kWe]	Potenza termica media [kWt]
Gennaio	31	4,43	13	598.079	722.062	1.732	1.792	369.366	382.286	917	949
Febbraio	28	4,00	13	464.463	521.079	1.276	1.432	392.608	275.879	1.079	758
Marzo	31	4,43	13	363.908	425.615	903	1.056	379.696	225.336	942	559
Aprile	30	4,29	13	377.547	109.440	968	281	366.784	57.942	940	149
Maggio	31	4,43	13	396.432	0	984	0	501.753	0	1.245	0
Giugno	30	4,29	13	390.792	0	1.002	0	564.518	0	1.447	0
Luglio	31	4,43	13	340.304	0	844	0	637.630	0	1.582	0
Agosto	31	4,43	13	372.652	0	925	0	440.243	0	1.092	0
Settembre	30	4,29	13	324.561	0	832	0	545.030	0	1.398	0
Ottobre	31	4,43	13	431.414	212.668	1.071	528	255.799	112.594	635	279
Novembre	30	4,29	13	538.267	454.714	1.380	1.166	392.608	240.743	1.007	617
Dicembre	31	4,43	13	641.119	752.465	1.591	1.867	369.366	398.383	917	989
Totale	365			5.339.538	3.198.043	13.508	8.121	5.215.401	1.693.164	13.200	4.299
I/Q							1,66				3,07

Figura 90: Carichi di energia termica ed elettrica dei due Campus di Bovisa

Gli unici dati di ingresso da fornire al foglio elettronico sono i consumi di energia termica ed elettrica, ripartiti mese per mese. In particolare, dal momento che non sono stati forniti i consumi mensili delle centrali termiche, è stato utilizzato il metodo di ripartizione mensile secondo i gradi-giorno descritto nel precedente capitolo.

Per un primo dimensionamento si fa riferimento ad un grafico come quello di figura 91 dove sono illustrati i campi di applicazione delle differenti tecnologie di cogenerazione².

In base al rapporto E/Q e alle potenze elettriche, si decide di fare affidamento su due impianti con motori a combustione interna, che permettono di avere un rendimento elettrico fino al 45% circa.

La funzione obiettivo precedentemente descritta è funzione delle due sole variabili P_{el} e P_{th} dal momento che le potenze elettriche, destinate ad utilizzo in loco piuttosto che alla vendita alla rete, e la potenza termica non

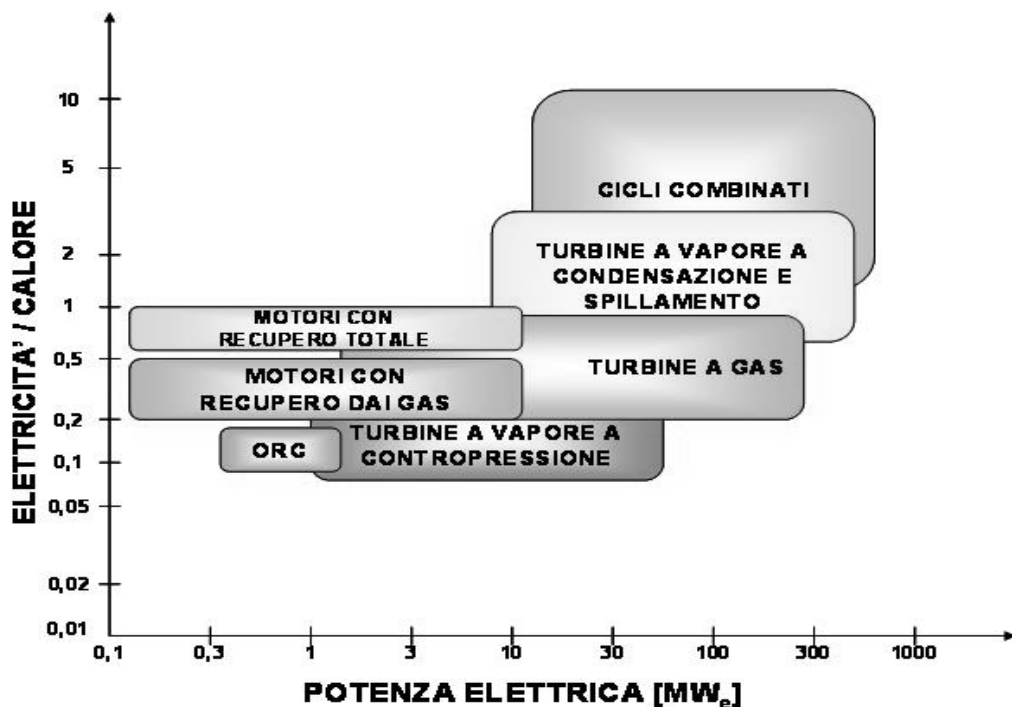


Figura 91: Campi di applicazione delle differenti tecnologie di cogenerazione

² Fonte: Libro Bianco sulla Cogenerazione, ATIG, 1997

dissipata – ovvero $P_{el,u}$, $P_{el,v}$ e $P_{th,u}$ - sono dipendenti dalle due potenze totali e dai carichi dell'edificio – dati di ingresso. Massimizzando tale funzione di costo, rispetto alle due variabili, si ottengono i seguenti valori di potenza massima mensile con cui devono essere dimensionati i due cogeneratori.

In figura 92 e 93 sono poi riportati i calcoli del margine operativo lordo nei tre casi di funzionamento.

Campus	Potenza Elettrica [kWe]	Potenza Termica [kWt]
Durando	1.500	1.167
La Masa	719	559

Tabella 10: *Fabbisogno di Energia termica ed elettrica totale dei due Campus*

Capitolo IV. Dimensionamento di un impianto cogenerativo

CAMPUS DURANDO									
CARICO MASSIMO									
Funzionamento Cogeneratore [%]	Potenza Cogeneratore [kW]	Potenza Elettrica Cogeneratore [kWe]	Potenza Termica Cogeneratore [kWt]	Costo produzione En. El. Cogeneratore [€/h]	Ricavi En. El. Cogenerata ad uso Utenza [€/h]	Ricavi En. El. Cogenerata Esportata [€/h]	Ricavi En. Term. Cogenerata [€/h]	Potenza Termica dissipata [kW]	Margine Operativo Lordo [€/h]
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	150,00	0,00	47,23	0	95,81
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	127,60	13,44	47,23	0	86,85
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	90,30	35,82	42,76	111	67,45
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	96,81	31,92	11,36	886	38,66
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	98,37	30,98	0,00	1.167	27,93
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	100,20	29,88	0,00	1.167	28,66
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	84,44	39,33	0,00	1.167	22,36
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	92,47	34,52	0,00	1.167	25,57
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	83,22	40,07	0,00	1.167	21,87
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	107,05	25,77	21,36	639	52,76
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	138,02	7,19	47,20	1	90,99
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	150,00	0,00	47,23	0	95,81
ELETTRICO COMANDA									
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	150,00	0,00	47,23	0	95,81
85%	2.836	1.276	992	-86,27	127,60	0,00	40,18	0	81,50
60%	2.007	903	702	-61,05	90,30	0,00	28,43	0	57,68
65%	2.151	968	753	-65,45	96,81	0,00	11,36	472	42,71
66%	2.186	984	765	-66,51	98,37	0,00	0,00	765	31,86
67%	2.227	1.002	779	-67,75	100,20	0,00	0,00	779	32,45
56%	1.877	844	657	-57,09	84,44	0,00	0,00	657	27,35
62%	2.055	925	719	-62,52	92,47	0,00	0,00	719	29,95
55%	1.849	832	647	-56,27	83,22	0,00	0,00	647	26,95
71%	2.379	1.071	833	-72,38	107,05	0,00	21,36	305	56,03
92%	3.067	1.380	1.073	-93,32	138,02	0,00	43,46	0	88,16
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	150,00	0,00	47,23	0	95,81
TERMICO COMANDA									
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	150,00	0,00	47,23	0	95,81
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	127,60	13,44	47,23	0	86,85
91%	3.017	1.358	1.056	-91,81	90,30	27,29	42,76	0	68,54
50%	1.667	750	583	-50,71	75,00	0,00	11,36	303	35,65
50%	1.667	750	583	-50,71	75,00	0,00	0,00	583	24,29
50%	1.667	750	583	-50,71	75,00	0,00	0,00	583	24,29
50%	1.667	750	583	-50,71	75,00	0,00	0,00	583	24,29
50%	1.667	750	583	-50,71	75,00	0,00	0,00	583	24,29
50%	1.667	750	583	-50,71	75,00	0,00	0,00	583	24,29
50%	1.667	750	583	-50,71	75,00	0,00	0,00	583	24,29
50%	1.667	750	583	-50,71	75,00	0,00	21,36	56	45,65
100%	3.331	1.499	1.166	-101,36	138,02	7,13	47,20	0	90,99
100%	3.333	1.500	1.167	-101,42	150,00	0,00	47,23	0	95,81

Figura 92: Margine operativo lordo mensile del Campus Durando nelle tre diverse modalità di funzionamento dell'impianto

CAMPUS LA MASA									
CARICO MASSIMO									
Funzionamento Cogeneratore [%]	Potenza Cogeneratore [kW]	Potenza Elettrica Cogeneratore [kWe]	Potenza Termica Cogeneratore [kWt]	Costo produzione En. El. Cogeneratore [€/h]	Ricavi En. El. Cogenerata ad uso Utenza [€/h]	Ricavi En. El. Cogenerata Esportata [€/h]	Ricavi En. Term. Cogenerata [€/h]	Potenza Termica dissipata [kW]	Margine Operativo Lordo [€/h]
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	6,01	411	29,30
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	63,47	5,05	11,31	280	31,23
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
ELETTRICO COMANDA									
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	6,01	411	29,30
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	0,00	559	23,28
88%	1.411	635	494	-42,92	63,47	0,00	11,31	214	31,87
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
TERMICO COMANDA									
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
50%	799	359	280	-24,30	35,95	0,00	6,01	131	17,66
50%	799	359	280	-24,30	35,95	0,00	0,00	280	11,64
50%	799	359	280	-24,30	35,95	0,00	0,00	280	11,64
50%	799	359	280	-24,30	35,95	0,00	0,00	280	11,64
50%	799	359	280	-24,30	35,95	0,00	0,00	280	11,64
50%	799	359	280	-24,30	35,95	0,00	0,00	280	11,64
50%	799	359	280	-24,30	35,95	0,00	11,31	0	22,95
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92
100%	1.598	719	559	-48,61	71,89	0,00	22,64	0	45,92

Figura 93: Margine operativo lordo mensile del Campus Durando nelle tre diverse modalità di funzionamento dell'impianto

In figura 94 sono invece riportati i soli margini operativi lordi: dal loro confronto si individua la modalità di funzionamento ottimale.

Dal confronto tra i due casi di studio si nota come, relativamente al Campus Durando, si ha una funzione obiettivo mediamente maggiore. Questo perché, la maggiore richiesta termica rispetto al Campus di La Masa, permette di dimensionare un motore di potenza totale maggiore, mantenendo fisso il vincolo relativo alle ore di funzionamento dell'impianto senza dissipazione di calore.

Quanto appena detto è confermato anche dal confronto dei vari rapporti E/Q . Relativamente a La Masa, non è possibile rispettare quanto definito altamente consigliabile nel paragrafo precedente, ovvero di avere un rapporto relativo all'impianto maggiore o uguale di quello relativo all'utenza. Infatti, il forte sbilanciamento tra consumo di energia elettrica e consumo di energia termica – nettamente a favore della prima – è, in

CAMPUS DURANDO					CAMPUS LA MASA				
Margine operativo lordo - CARICO MASSIMO	Margine operativo lordo - ELETTRICO COMANDA	Margine operativo lordo - TERMICO COMANDA	Funzionamento Cogeneratore [%]	Modalità di funzionamento ottimale	Margine operativo lordo - CARICO MASSIMO	Margine operativo lordo - ELETTRICO COMANDA	Margine operativo lordo - TERMICO COMANDA	Funzionamento Cogeneratore [%]	Modalità di funzionamento ottimale
95,81	95,81	95,81	100%	CAR MAX	45,92	45,92	45,92	100%	CAR MAX
86,85	81,50	86,85	100%	CAR MAX	45,92	45,92	45,92	100%	CAR MAX
67,45	57,68	68,54	91%	TERM. COM.	45,92	45,92	45,92	100%	CAR MAX
38,66	42,71	35,65	65%	EL. COM.	29,30	29,30	17,66	100%	CAR MAX
27,93	31,86	24,29	66%	EL. COM.	23,28	23,28	11,64	100%	CAR MAX
28,66	32,45	24,29	67%	EL. COM.	23,28	23,28	11,64	100%	CAR MAX
22,36	27,35	24,29	56%	EL. COM.	23,28	23,28	11,64	100%	CAR MAX
25,57	29,95	24,29	62%	EL. COM.	23,28	23,28	11,64	100%	CAR MAX
21,87	26,95	24,29	55%	EL. COM.	23,28	23,28	11,64	100%	CAR MAX
52,76	56,03	45,65	71%	EL. COM.	31,23	31,87	22,95	88%	EL. COM.
90,99	88,16	90,99	100%	CAR MAX	45,92	45,92	45,92	100%	CAR MAX
95,81	95,81	95,81	100%	CAR MAX	45,92	45,92	45,92	100%	CAR MAX

Figura 94: Scelta della modalità di funzionamento ottimale

generale, difficilmente ottenibile da un impianto cogenerativo e, in particolare, non lo è con i motori a combustione interna scelti per il caso di studio – con rendimento elettrico non superiore a 45%. Per rispettare tale condizione, occorrerebbe aumentare, di molto, la taglia degli impianti ma, così facendo, il calore dissipato diventerebbe assai dominante rispetto a quello effettivamente utilizzato: in questa situazione, non si starebbe più cogenerando. Viceversa, il rapporto è rispettato nel caso di Durando, come si evince dalla tabella 11. Ciò mostra, ancora una volta, come la soluzione adottata per il campus che ospita le scuole di Architettura e Design, risulta essere più efficace.

Campus	E/Q utenza	E/Q impianto
Durando	1,66	2,14
La Masa	3,07	2,64

Tabella 11: Confronto tra rapporti E/Q

Per quanto concerne l'indice di risparmio di energia primaria, come si può osservare dalla tabella 12, in entrambi i casi si ha un valore abbondantemente superiore al PES_{limite} fissato dal DM del 4 Agosto 2011 – pari al 10%.

Come si è precedentemente affermato, il vincolo più critico è quello relativo alle ore minime di funzionamento senza dissipazione di calore. Se tale limite non fosse stato imposto, il risultato dell'algoritmo sarebbe stato quello di dimensionare l'impianto con una taglia tale da riuscire a soddisfare tutto il fabbisogno elettrico richiesto dall'utenza, a prescindere da quello termico. Ciò è dovuto al fatto che, il costo di produzione dell'energia elettrica, al netto della valorizzazione del kWh risparmiato dall'impianto tradizione in funzione della dissipazione percentuale del

Campus	PES
Durando	27,1%
La Masa	27,5%

Tabella 12: Indice PES relativi alle soluzioni implementate

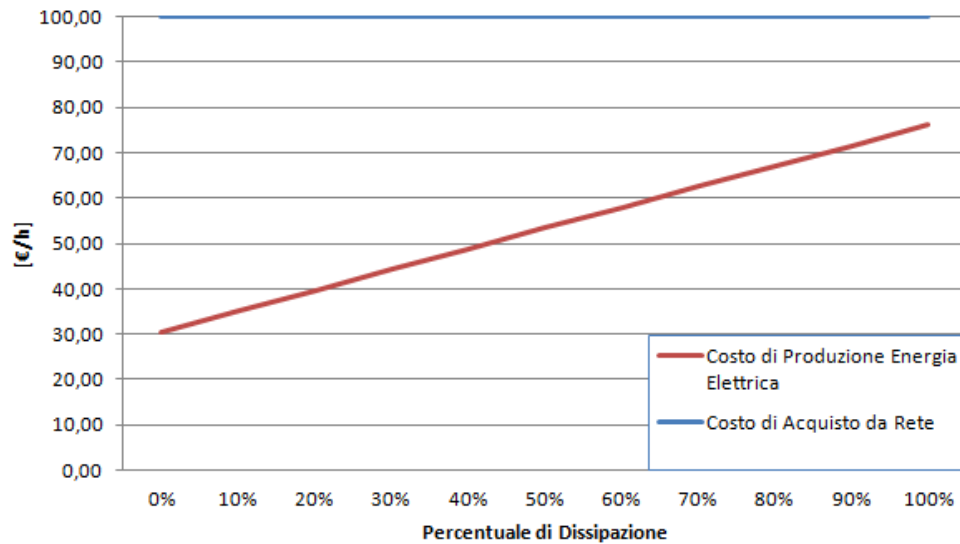


Figura 95: Costo di produzione netto del KWh_e in funzione della percentuale di dissipazione del calore

calore, risulta sempre minore rispetto al caso di acquisto diretto di energia da rete – anche nel caso di dissipazione del 100% di calore. Ciò è rappresentato in figura 95.

Per questo motivo, visto che non si è interessati ad esaminare i vantaggi dell'auto produzione di energia elettrica ma quelli di un impianto di cogenerazione, viene imposto il numero minimo di ore di funzionamento dell'impianto senza dissipazione di calore pari a 1.900 h, che corrisponde a oltre l'80% delle ore di funzionamento relative alla sola stagione di riscaldamento – circa il 45% dell'intero anno.

In figura 96 vengono espressi i fabbisogni termici attraverso diagrammi cumulati su base annua. In pratica tali grafici illustrano quanto ore annue può funzionare un impianto cogenerativo senza dissipare calore, in funzione della potenza termica che esso eroga. Come si vede, l'ottimo della funzione obiettivo implementata si trova proprio in corrispondenza della massima potenza termica che rispetta il vincolo delle 1.900 h.

In modo analogo viene ricavato il diagramma cumulato su base annua relativo ai fabbisogni elettrici – figura 97. Questi non presentano analoghi problemi relativi alla dissipazione di energia dal momento che è prevista la

vendita alla rete dell'eventuale energia in eccesso – più frequente nel caso del Campus Durando il quale, come detto, è alimentato da un impianto di taglia maggiore.

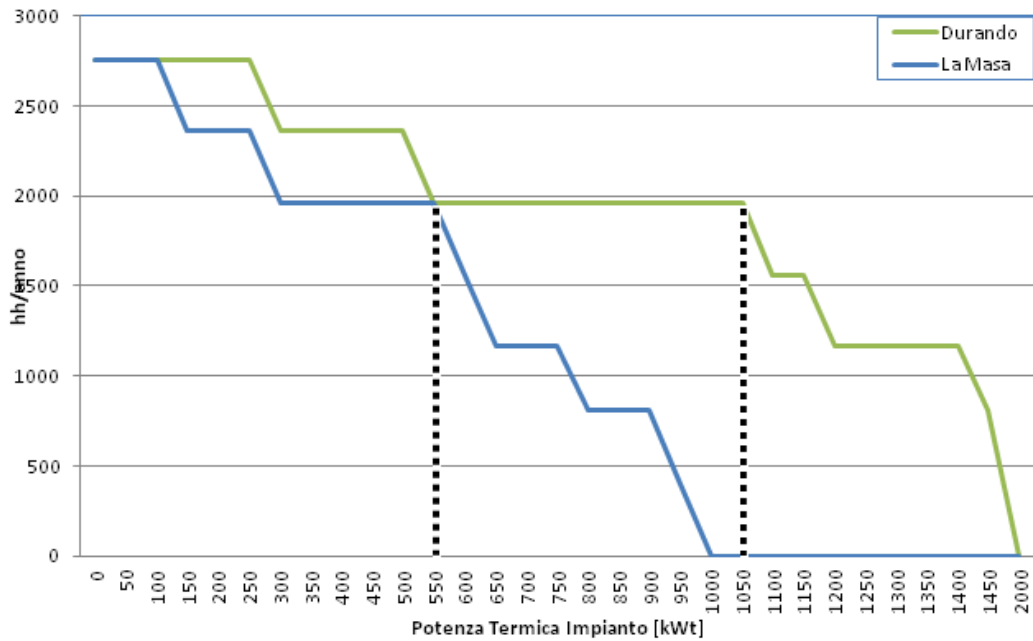


Figura 96: Potenza termica cumulata per i Campus di Durando e La Masa

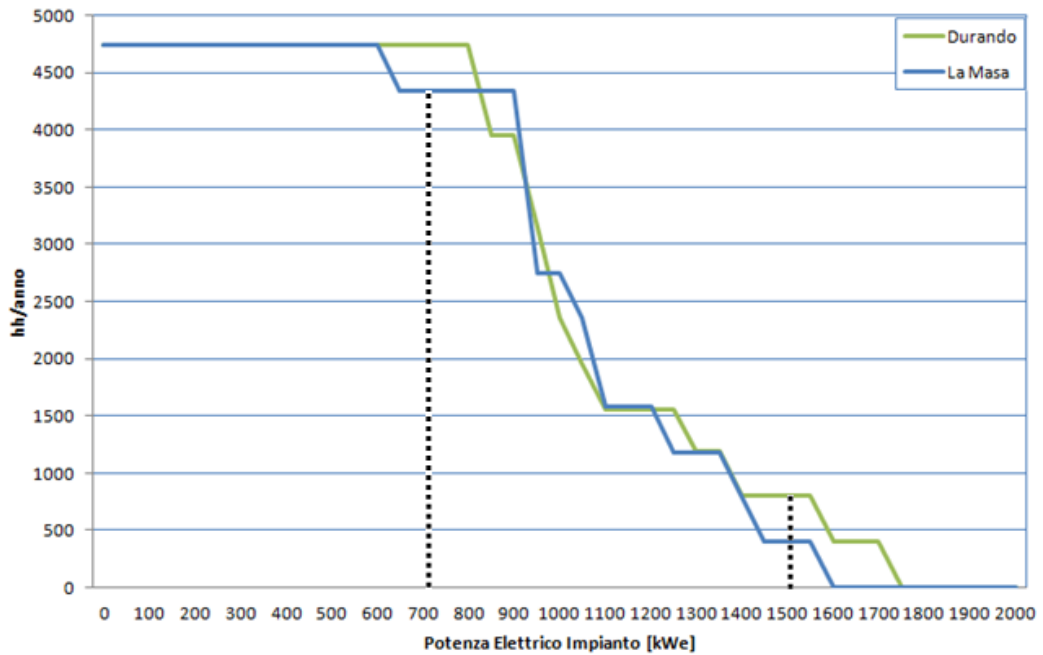


Figura 97: Potenza elettrica cumulata per i Campus di Durando e La Masa

Il dimensionamento fatto va validato attraverso simulazioni di funzionamento giornaliero. Per fare ciò occorre ricavare i valori di consumo termico giornalieri ed orari attraverso il metodo della ripartizione gradi-giorno implementato. A questo punto si può procedere con il confronto della potenza termica media erogata dall'impianto di cogenerazione e le richieste dell'utenza. Di seguito, vengono riportati i grafici relativi soltanto al Campus di La Masa per non rendere eccessivamente ridondante la verifica.

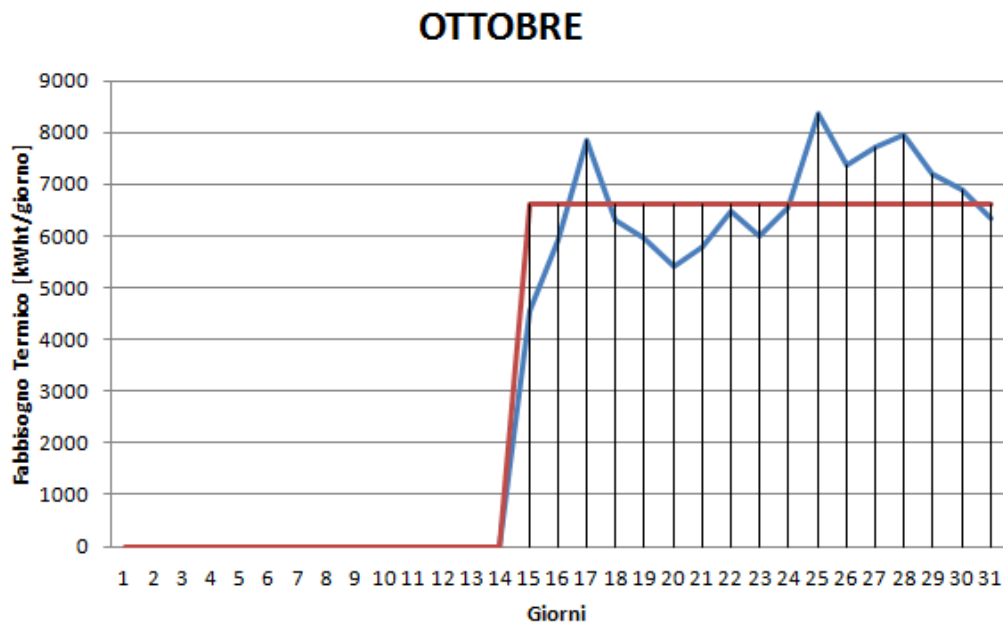


Figura 98: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Ottobre, per il Campus La Masa

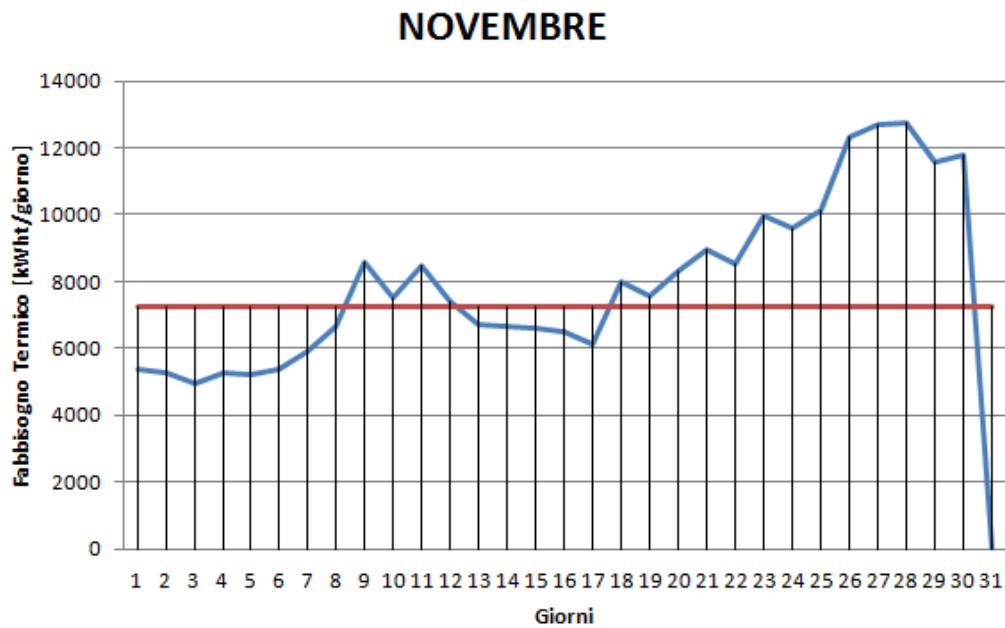


Figura 99: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Novembre, per il Campus La Masa

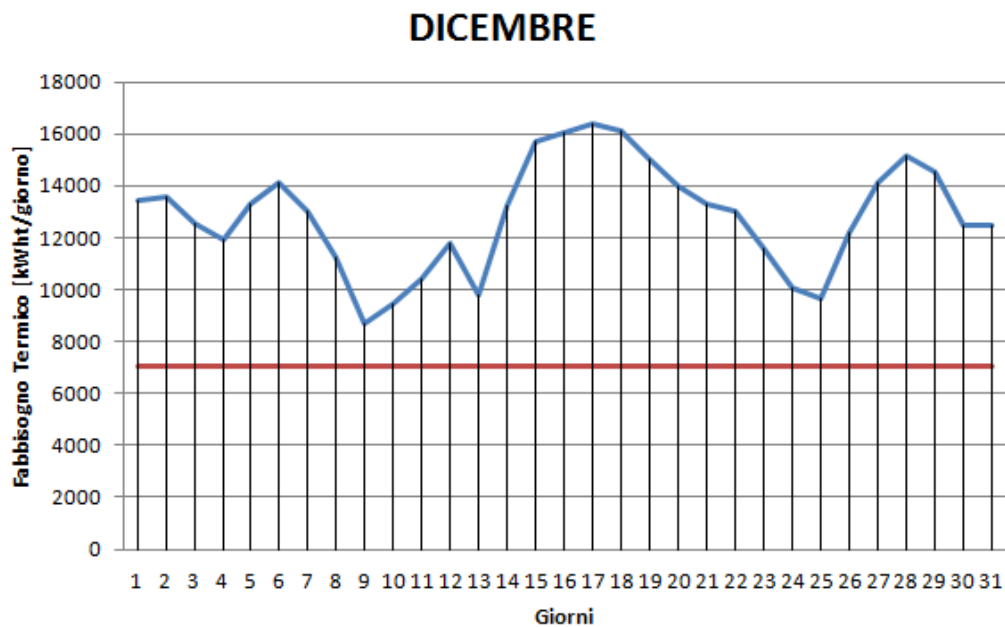


Figura 100: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Dicembre, per il Campus La Masa

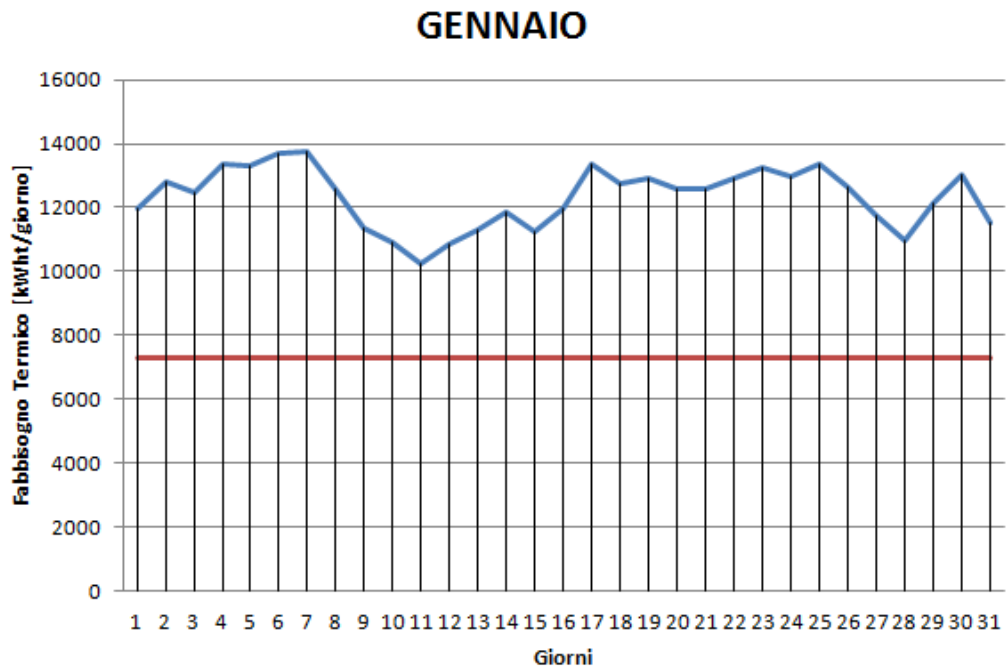


Figura 101: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Gennaio, per il Campus La Masa

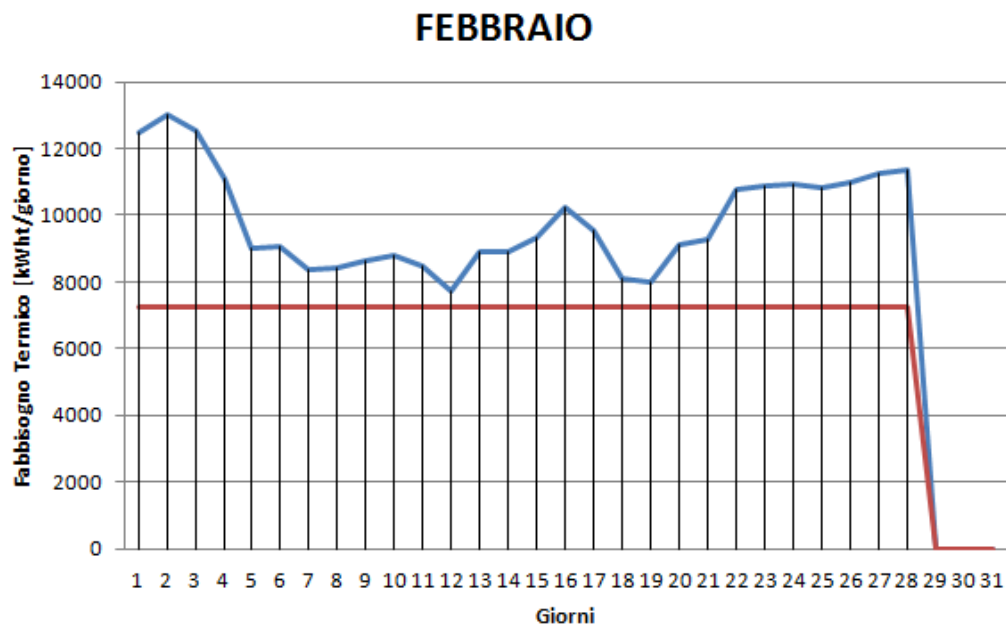


Figura 102: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Febbraio, per il Campus La Masa

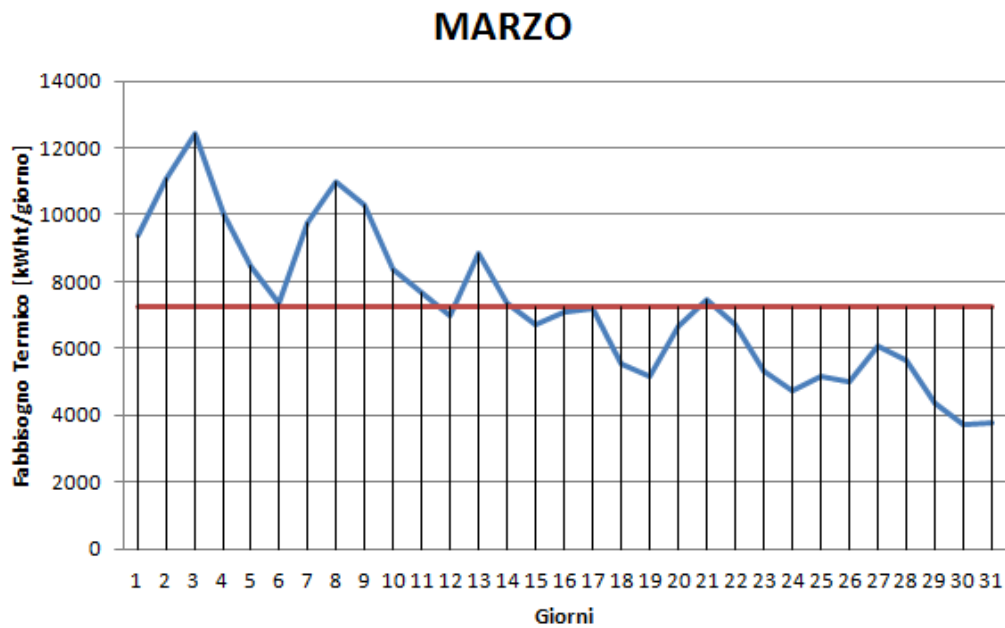


Figura 103: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Marzo, per il Campus La Masa

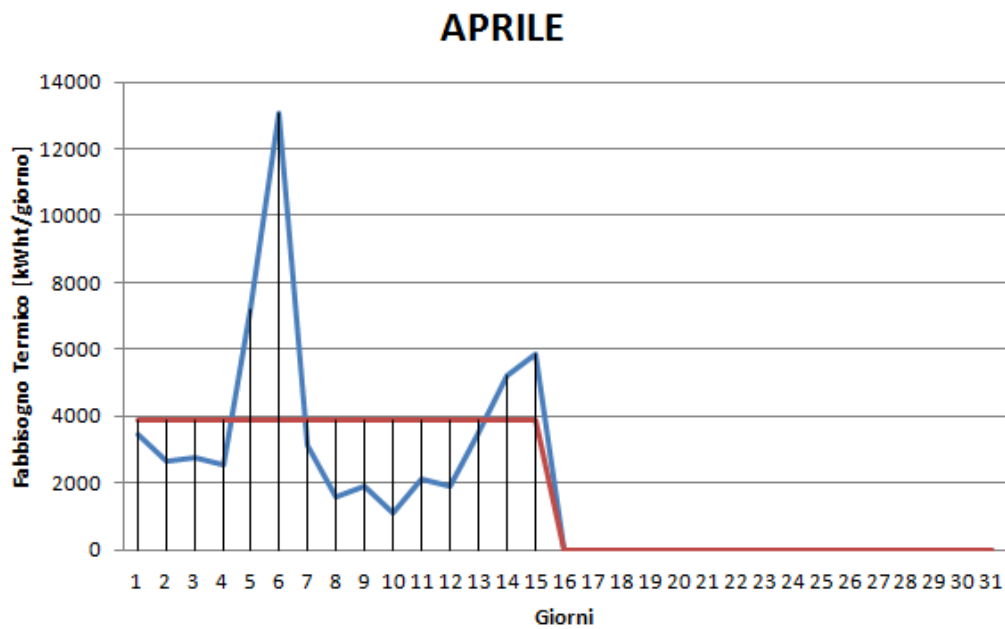


Figura 104: Carico termico La Masa (blu) ed Energia Media Erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad Aprile, per il Campus La Masa

Dai grafici precedenti si nota come per la maggior parte del tempo, il calore fornito dall'impianto è inferiore a quanto richiesto dall'utenza in modo da riuscire a ridurre l'energia termica dispersa: i mesi, in tal senso, più problematici sono ovviamente i mesi più caldi – ottobre, marzo ed aprile. Facendo poi riferimento alla figura 104, si nota un picco di fabbisogno termico difficilmente giustificabile come una giornata di Aprile particolarmente fredda: in realtà tale picco è semplicemente dovuto all'essenza di misure di temperatura per quella giornata, che si traduce in un errore nell'algoritmo di ripartizione implementato.

Un'ultima verifica va fatta in riferimento ai fabbisogni orari medi di ciascun mese. Analogamente a quanto fatto in precedenza, vengono di seguito riportati i grafici relativi al solo Campus La Masa.

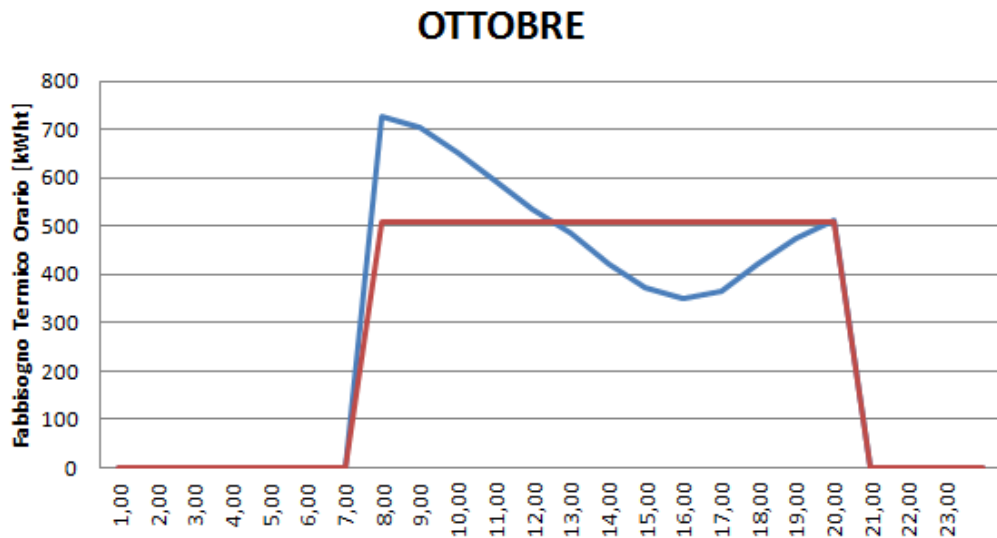


Figura 105: *Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad ottobre, per il Campus La Masa*

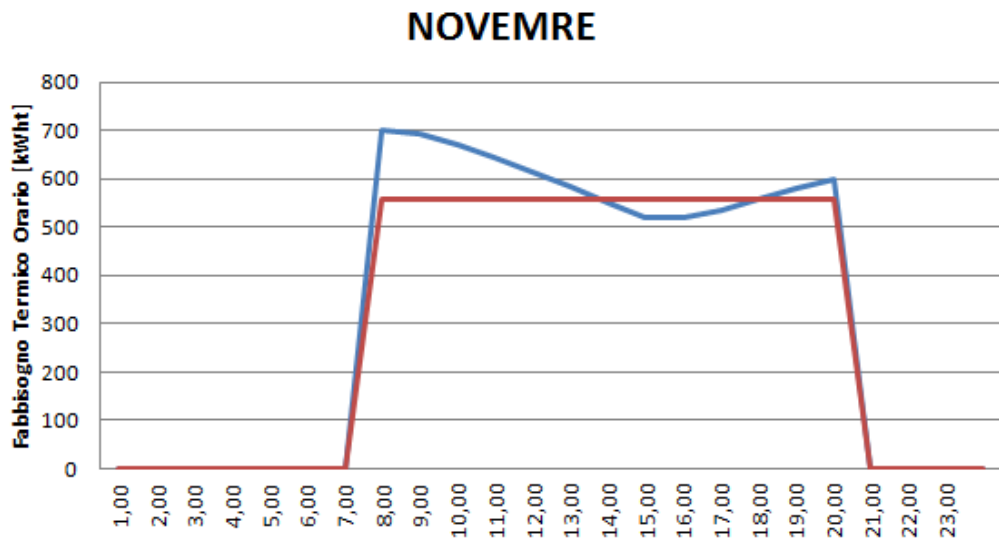


Figura 106: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad novembre, per il Campus La Masa

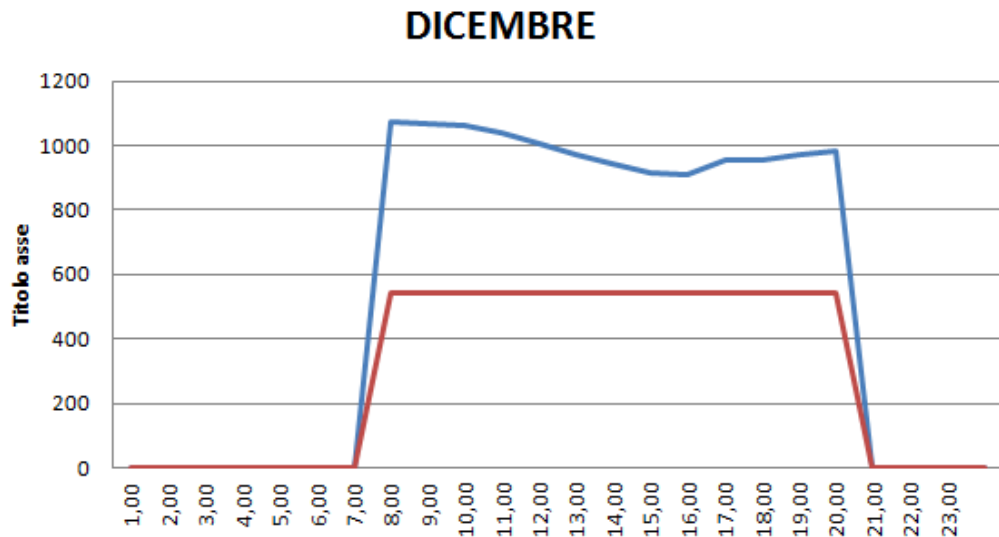


Figura 107: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad dicembre, per il Campus La Masa

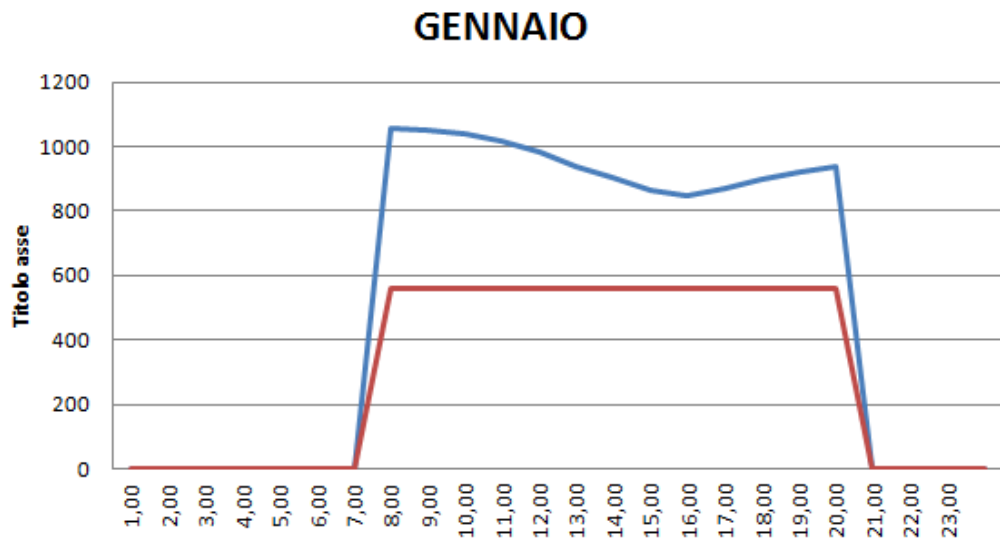


Figura 108: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad gennaio, per il Campus La Masa

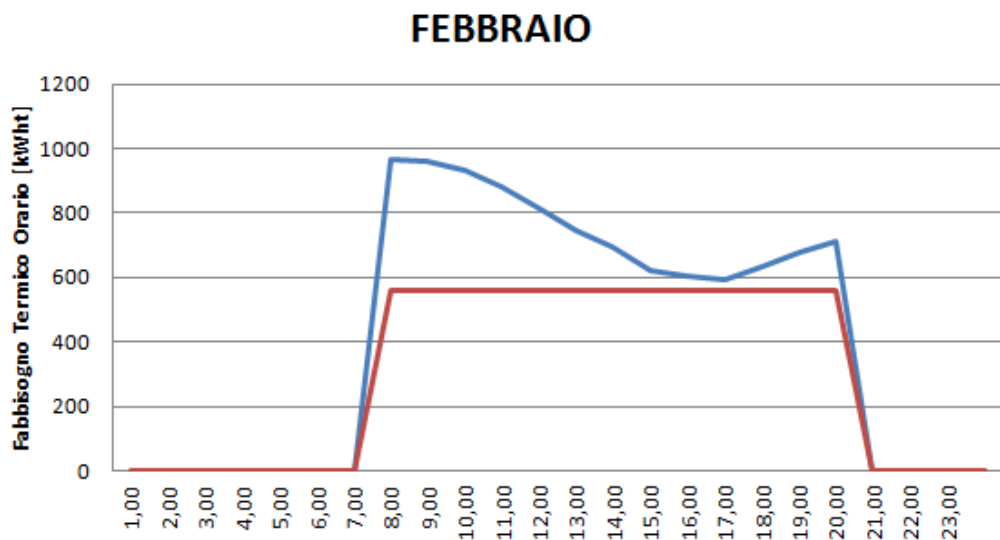


Figura 109: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad febbraio, per il Campus La Masa

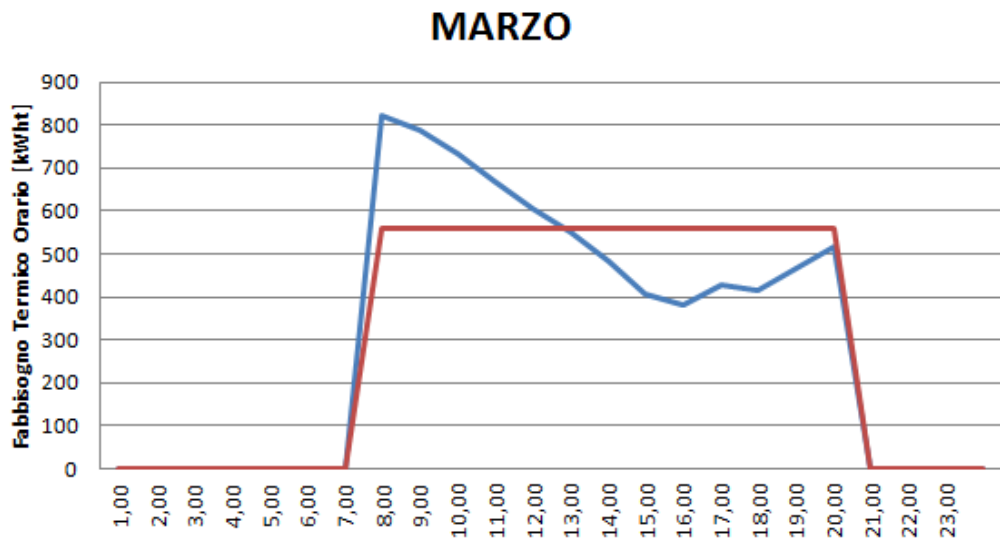


Figura 110: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad marzo, per il Campus La Masa

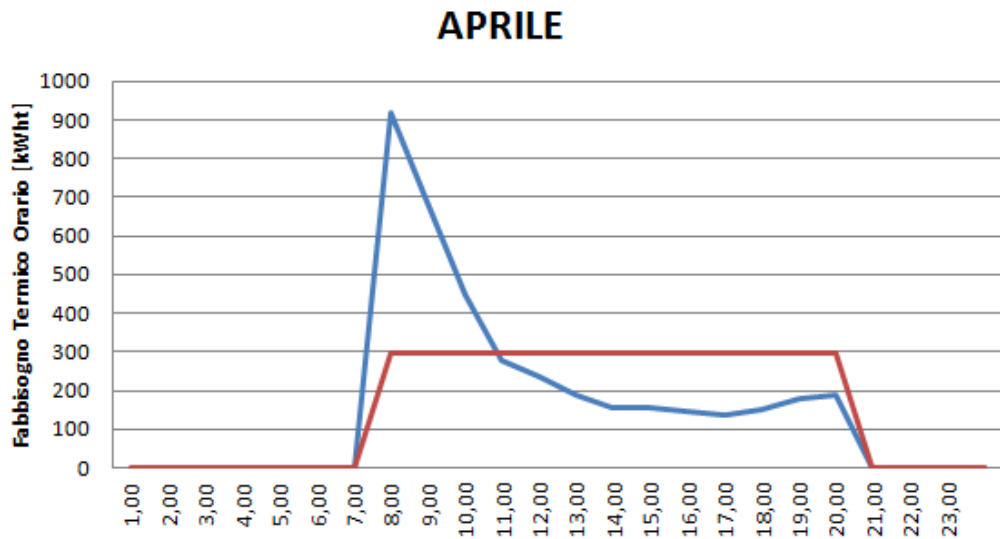


Figura 111: Fabbisogno medio orario La Masa (blu) ed energia media oraria erogata dal Cogeneratore (rosso) relativa ad aprile, per il Campus La Masa

Dai grafici relativi al confronto orario si vede ancora una volta come l'impianto scelto sia in grado di funzionare per un buon numero di ore. In riferimento alla figura 111, si nota ancora l'influenza del dato di temperatura mancante che falsifica il calcolo del fabbisogno di calore dell'utenze nelle prime ore di funzionamento.

CAPITOLO V

Conclusioni

Il lavoro svolto ha permesso di ottenere due strumenti di calcolo, destinati rispettivamente al:

- fabbisogno di energia termica e di energia primaria per la climatizzazione invernale di un edificio;
- dimensionamento e scelta della modalità di funzionamento ottimale di un impianto cogenerativo.

In entrambi i casi, lo spirito con cui si è arrivati alle soluzioni presentate è stato quello di fornire delle metodologie di calcolo semplificate che, partendo da una quantità minima di informazioni e dati di ingresso, fossero in grado di restituire una stima più che accettabile delle grandezze di interesse.

Relativamente alla prima parte dell'elaborato, sono stati individuati i parametri che maggiormente influenzano i risultati del metodo di calcolo prescritto nella UNI/TS 11300 e di conseguenza, quelli che, in prima approssimazione, possono essere considerati universali, se non altro relativamente ad una casistica assimilabile a quella rappresentata dal caso di studio esaminato. È stato inoltre sottolineato come la significatività di una grandezza all'interno del metodo di calcolo semplificato può non avere

riscontro nella realtà – in particolare, per quanto riguarda il volume lordo riscaldato che, se limitatamente alla procedura mostrata della specifica tecnica non ha influenza alcuna sul risultato, lo stesso non può dirsi se ascritto ad una situazione concreta.

La precisione dei risultati ottenuti fa, ragionevolmente, da contraltare alla semplicità con cui, una volta implementato il file Excel, può essere valutato il fabbisogno energetico di un edificio. Ciò è stato evidenziato con un confronto diretto rispetto i dati di consumo reale di metano disponibili per le centrali termiche dei due campus di Bovisa. Tuttavia, è stato dimostrato attraverso tre tipologie di validazione differenti che l'errore ottenuto è solo in parte imputabile alle semplificazioni adottate. Infatti, le cause che maggiormente deteriorano il risultato sono ascrivibili a:

- utilizzo, per quanto riguarda valutazioni di tipo standard o di progetto, di un periodo di riscaldamento molto differente da quello reale;
- errori intrinseci al metodo di calcolo nazionale che portano, secondo quanto riferito dalla normativa europea a cui la UNI/TS 11300 fa riferimento, a discrepanze comprese tra il 50% e il 150%;
- mancanza di alcuni parametri critici per gli edifici oggetto di analisi – in particolare delle trasmittanze delle pareti opache e trasparenti.

Nonostante questi aspetti, si è visto come i risultati ottenuti possano essere considerati più che soddisfacenti, dal momento che si ottengono, in genere, errori di molto inferiori al 50% precedentemente citato.

In riferimento al secondo foglio di calcolo implementato, sono stati illustrati i passi che portano, a partire dai carichi termici ed elettrici di un'utenza, alla scelta, al dimensionamento e all'ottimizzazione della modalità di funzionamento di un impianto cogenerativo. Questi obiettivi sono stati perseguiti facendo ricorso ad un'unica funzione di costo appositamente creata e basata sul concetto di costo evitato. Si è inoltre visto che il vincolo più critico, al momento di utilizzare il metodo del

simplesso per la ricerca di una soluzione ottima, è quello relativo alle ore di funzionamento dell'impianto senza dissipazione di calore. Infatti, se da un lato risulta conveniente autoprodurre energia elettrica piuttosto che acquistarla dalla rete pubblica, anche in condizione di totale dissipazione di quella termica, dall'altro c'è da tenere in considerazione che la cogenerazione nasce proprio con lo scopo di sfruttare contemporaneamente le due energie, minimizzando le dispersioni di calore in ambiente. Per questo motivo, è risultato necessario individuare un valore limite per il suddetto vincolo, che fosse un buon compromesso tra queste due opposte esigenze.

5.1 Sviluppi futuri

In sede di implementazione del foglio di calcolo semplificato del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale, sono stati individuati due aspetti che possono rivelarsi interessanti in luogo di sviluppi futuri.

Il primo è inerente all'analisi di sensitività rispetto al metodo di calcolo, svolta in maniera indipendente su alcuni parametri significativi. Questa modalità di lavoro è stata necessaria per non dilungarsi troppo su aspetti non strettamente affini e poter giungere ad una conclusione che permettesse di individuare, come precedentemente riassunto, l'accuratezza con cui fornire un dato parametro al foglio Excel. È tuttavia indubbio che, in realtà, molti dei parametri non sono indipendenti l'uno dall'altro e che quindi, da un punto di vista pratico, non ha senso, ad esempio, modificare la superficie dell'involucro disperdente di un edificio senza modificarne anche il volume lordo riscaldato e/o la superficie netta calpestabile climatizzata. Per questo motivo, col fine non solo di migliorare il file implementato ma anche di spostare l'analisi di sensitività ad un livello superiore – ossia non più rispetto allo specifico metodo di calcolo del

fabbisogno, ma rispetto al fabbisogno stesso –, potrebbe essere interessante studiare l'interazione che sussiste, innanzitutto, tra le grandezze che costituiscono i dati d'ingresso del foglio elettronico e, in secondo luogo, rispetto anche a quelli considerati costanti e poco significativi.

Il secondo aspetto, per molti versi legato al primo, è da vedere nell'ottica di estremizzare ulteriormente il concetto di facilità e di semplicità di calcolo, approssimativo, del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale. In tal senso, partendo sempre dal programma implementato, si potrebbe pensare di realizzare una serie di curve rappresentati l'energia termica richiesta da un determinato edificio, in funzione dei parametri principali: in questo modo, si potrebbe fare una prima valutazione energetica semplicemente utilizzando un righello ed un grafico, più o meno complesso, contenente un fascio di curve, opportunamente ottenute.

APPENDICE A

Metodo alternativo per il calcolo approssimativo del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale di un edificio

Il procedimento descritto fa riferimento alla UNI 10379, normativa valida fino a qualche anno fa nella Regione Lazio, e sostituita oggi dalla UNI/TS 11300.

La logica su cui si basa il calcolo del fabbisogno secondo la suddetta normativa è tanto semplice quanto imprecisa.

Viene definito il fabbisogno energetico normalizzato (FEN) come:

$$FEN = \frac{Q}{(\theta_i - \theta_{em}) \cdot N \cdot V} \quad (A.1)$$

- Q fabbisogno convenzionale stagionale di energia primaria richiesto per il riscaldamento dell'edificio, [MJ];
- θ_i temperatura interna di progetto, [°C];
- θ_{em} temperatura media stagionale dell'aria esterna, [°C];
- N numero di giorni del periodo di riscaldamento;
- V volume lordo riscaldato dell'edificio, [m^3].

Ovviamente il FEN non può essere calcolato dal momento che il fabbisogno è incognito. La normativa tuttavia garantisce che il FEN è sempre minore di un certo valore limite calcolato come:

$$FEN_{limite} = \left[(CD_{lim} + 0,34n) - K_u \left(\frac{0,01l}{\Delta\theta_m} + \frac{a}{\Delta\theta_m} \right) \right] \frac{86,4}{\eta_{g,lim}} \quad (A.2)$$

dove:

- CD_{lim} coefficiente di dispersione volumica limite per trasmissione dell'involucro edificio, [$\frac{W}{m^3 \cdot K}$];

- n numero dei volumi d'aria ricambiati in un ora, $[1/h]$;
- K_u coefficiente adimensionale di utilizzazione degli apporti gratuiti;
- 0,01 fattore dimensionale che esprime un rapporto medio tra area equivalente e volume dell'edificio, $[1/m]$;
- I irradianza media solare, $[\frac{W}{m^2}]$;
- $\Delta\theta_m$ differenza tra la temperatura interna e quella esterna, $[^\circ C]$;
- a apporti interni, $[\frac{W}{m^3}]$.
- $\eta_{g,lim}$ rendimento globale medio stagionale limite.

A questo punto, noto il FEN_{limite} , se ci si accontenta di considerare il FEN incognito pari al rispettivo valore limite, dall'inversione dell'equazione (A.1) si può ricavare il fabbisogno Q incognito: tuttavia, sotto questa ipotesi, non si sta più calcolando il fabbisogno dell'edificio, ma un non ben precisato fabbisogno limite Q_{lim} che sovrastimerà, in maniera non determinabile a priori, il valore reale.

L'unico parametro nuovo rispetto a quelli descritti nel capitolo 1 è il coefficiente di dispersione volumica limite per trasmissione dell'involucro CD_{lim} . Tale grandezza rappresenta la potenza termica dispersa per trasmissione ogni unità di volume di edificio riscaldato per ogni grado Celsius di differenza di temperatura tra la temperatura interna e la temperatura esterna minima di progetto: in altre parole, costituisce un indice del grado di isolamento dell'edificio.

Il CD_{lim} viene calcolato come doppia interpolazione, prima in funzione dei GG e, in seguito, del rapporto S/V, dei valori del prospetto riportato in figura 112.

		Zona climatica										
S/V		A		B		C		D		E		F
	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	gradi-giorno	
		fino a 600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	oltre 3000	
$\leq 0,2$		0,49	0,49	0,46	0,46	0,42	0,42	0,34	0,34	0,30	0,30	
$\geq 0,9$		1,16	1,16	1,08	1,08	0,95	0,95	0,78	0,78	0,73	0,73	

Figura 112: Cd_{limite} in funzione di S/V e GG

Nonostante tale metodo si basi su una normativa non più in uso, facendo un'approssimazione - $FEN = FEL_{lim}$ - che porta ad errori non determinabili a priori e non diagnosticabili, vengono comunque riportati i risultati ottenuti vista la rapidità e la semplicità con cui viene eseguito il calcolo. A riprova di quanto detto, in figura 113 sono riportate tutte le celle necessarie per l'ottenimento di una stima del fabbisogno di energia termica secondo il metodo alternativo appena descritto.

APPENDICA A. Metodo di calcolo alternativo del fabbisogno energetico

CAMPUS DURANDO													
Giorni periodo di riscaldamento effettivi	Gradi Giorno Località	Rapporto S/V	CD limite [W/mck]	n: numero volumi d'aria scambiati in un'ora [1/h]	Ku: coefficiente di utilizzazione degli apporti gratuiti	Temperatura interna di regolazione per il riscaldamento [°C]	Valore medio stagionale temperatura esterna [°C]	Differenza temperatura [°C]	t: irradiazione media solare su piano orizzontale	a: valore degli apporti gratuiti interni [W/mc]	Rendimento globale medio	Fen Limite [k/(mc*giorno*°C)]	Energia Primaria Annuia [kWh]
120	2404	0,36	0,326517	0,5	0,9004	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,835479	36,46927	286182,2628
120	2404	0,29	0,326517	0,5	0,8868	20	6,3	13,7	68,9	1	0,835479	40,03997	1105586,879
120	2404	0,36	0,326517	0,5	0,9001	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,835479	36,47427	211580,359
120	2404	0,62	0,326517	0,5	0,9478	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,835479	35,6851	127946,5494
120	2404	0,51	0,326517	0,5	0,9277	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,794385	37,88065	73695,9587
120	2404	0,84	0,326517	0,5	0,9893	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,82026	35,64956	47930,13511
120	2404	0,33	0,326517	0,5	0,8939	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,829374	36,84584	667995,7423
120	2404	0,19	0,326517	0,5	0,87	20	6,3	13,7	68,9	2	0,829374	33,93581	184534,3527
120	2404	0,20	0,326517	0,5	0,87	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,829374	37,24342	1199320,944
120	2404	0,23	0,326517	0,5	0,876	20	6,3	13,7	68,9	2	0,829374	33,8124	356423,2524
120	2404	0,25	0,326517	0,5	0,8785	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,793618	38,7732	1071653,478
CAMPUS LA MASA													
120	2404	#DIV/0!	0,326517	0,5	#DIV/0!	20	6,3	13,7	68,9	1,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
120	2404	0,22	0,326517	0,5	0,873	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,820363	37,60261	882771,8681
120	2404	0,34	0,326517	0,5	0,896	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,820363	37,21434	334771,9412
120	2404	0,37	0,326517	0,5	0,9021	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,820363	37,113	115659,6064
120	2404	0,23	0,326517	0,5	0,8751	20	6,3	13,7	68,9	2,5	0,811348	31,18349	109314,12
120	2404	0,21	0,326517	0,5	0,8723	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,82356	37,46736	394557,3835
120	2404	0,28	0,326517	0,5	0,8844	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,82356	37,26523	445186,0961
120	2404	0,80	0,326517	0,5	0,9814	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,82356	35,63868	117396,2381
120	2404	0,32	0,326517	0,5	0,8932	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,82356	37,11818	330448,8828
120	2404	0,45	0,326517	0,5	0,9162	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,82356	36,73147	56379,78656
120	2404	0,31	0,326517	0,5	0,89	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,82356	37,17029	297573,6908
120	2404	0,36	0,326517	0,5	0,8989	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,866875	35,17246	584121,2024
120	2404	0,35	0,326517	0,5	0,8985	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,847253	35,9936	337960,5176
120	2404	0,44	0,326517	0,5	0,9148	20	6,3	13,7	68,9	1,2	0,847253	37,77002	208039,4908
120	2404	0,27	0,326517	0,5	0,8836	20	6,3	13,7	68,9	1	0,849586	39,41624	1041357,226
120	2404	0,32	0,326517	0,5	0,8929	20	6,3	13,7	68,9	1,5	0,843328	36,25306	709904,0884

Figura 113: Vista del foglio Excel – Calcolo del fabbisogno come metodo alternativo

Bibliografia

Agenzia per il Risparmio Energetico di Ancona, 2009. *Campagna di informazione, comunicazione ed educazione a sostegno delle fonti rinnovabili, del risparmio e dell'uso efficiente dell'energia: La Cogenerazione*, Vercelli

Agenzia per l'Energia Sostenibile della Provincia di Oristano, 2009. *Relazione tecnica di certificazione – Certificazione Energetica dell'Istituto Tecnico Statale per Geometri "F. Brunelleschi"*, Oristano

Cappelletti, Stefano, 2010. *Modellistica e controllo di impianti termici ad uso residenziale e terziario*. Tesi di laurea e in Ingegneria dell'Automazione, Politecnico di Milano

Edizioni ENEA, 2000. *Noi per lo sviluppo sostenibile*. In: opuscoli sviluppo sostenibile

Edizioni ENEA, 2000. *Risparmio energetico con gli impianti di riscaldamento*. In: opuscoli sviluppo sostenibile

Edizioni ENEA, 2009. *Rapporto energia e ambiente, analisi e scenari 2008*

Loschi, Roberto, 2002. *Valutazione tecnico-economiche sulla gestione del servizio energie e della cogenerazione in un complesso ospedaliero*. Seriate

Prisinzano, Domenico, 2008. *Prestazione Energetica degli Edifici: Calcolo del fabbisogno di energia primaria*. 9 luglio 2008, Reggio Calabria

ISO 6946	Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method
UNI 10339	Impianti aeraulici ai fini di benessere – Generalità, classificazione e requisiti – Regole per la richiesta d’offerta, l’offerta, l’ordine e la fornitura
UNI 10349	Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici
UNI 10355	Murature e solai – Valori della resistenza termica e metodo di calcolo
UNI 10379	Riscaldamento degli edifici – Fabbisogno energetico convenzionale normalizzato – Metodo di calcolo e verifica
UNI EN ISO 13790:2008	Prestazione termica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento
UNI/TS 11300-1:2008	Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
UNI/TS 11300-2:2008	Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e del rendimento per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria

AEEG, Deliberazione 19 marzo 2002, n° 42/02 dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas, in materia di "Condizioni per il riconoscimento della produzione combinata di energia elettrica e calore come cogenerazione ai sensi dell'articolo 2, comma 8, del decreto legislativo 19 marzo 1999, n° 79"

D.M. 4 agosto 2001, in materia di "Misure per la promozione della cogenerazione – Integrazione del D.l.g.s. 20/2007 "

D.M. 5 settembre 2001, in materia di "Regime di sostegno per la cogenerazione ad alto rendimento"

D.P.R. 26 agosto 1993, n° 412, in materia di "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n° 10"

EPBD, Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002, in materia di "Rendimento energetico nell'edilizia"

Materiale disponibile su <<http://www.agenziacasaclima.it>>

Materiale disponibile su <<http://www.antainrete.org>>

Materiale disponibile su <<http://arpalombardia.it>>

Materiale disponibile su <<http://www.autorita.energia.it>>

Materiale disponibile su <<http://www.cened.it>>

Materiale disponibile su <<http://www.gse.it>>