



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea in “Domotica ed uso razionale dell’energia elettrica”

BUILDING AUTOMATION ED EFFICIENZA ENERGETICA

Metodologia di valutazione del risparmio energetico derivante dal controllo integrato dell’illuminazione e delle protezioni solari

Relatore : Prof. Luigi Martirano

Laureando: Marco Cecconi

Anno accademico 2006/2007

Argomento

Studio del **comportamento energetico di un locale** adibito ad uso **non residenziale**, in relazione ai parametri che lo caratterizzano e alla presenza di **sistemi di controllo automatico dell'illuminazione e degli schermi solari**

Obiettivi

- Creazione di una **metodologia** pratica di facile fruizione per la valutazione del **fabbisogno energetico d'illuminazione e di climatizzazione in dipendenza dai parametri**, da utilizzare come **indicazione progettuale** e come strumento per la **certificazione energetica**
- **Valutazioni sull'efficacia** energetica dei **sistemi proposti**



Stato dell'arte

Normativa:

Riguardo ai **fabbisogni elettrici** la **prEN13790** fornisce una metodologia di calcolo che porta alla valutazione dell'indice energetico **LENI** ("Lighting **E**nergy **N**umeric **I**ndicator")

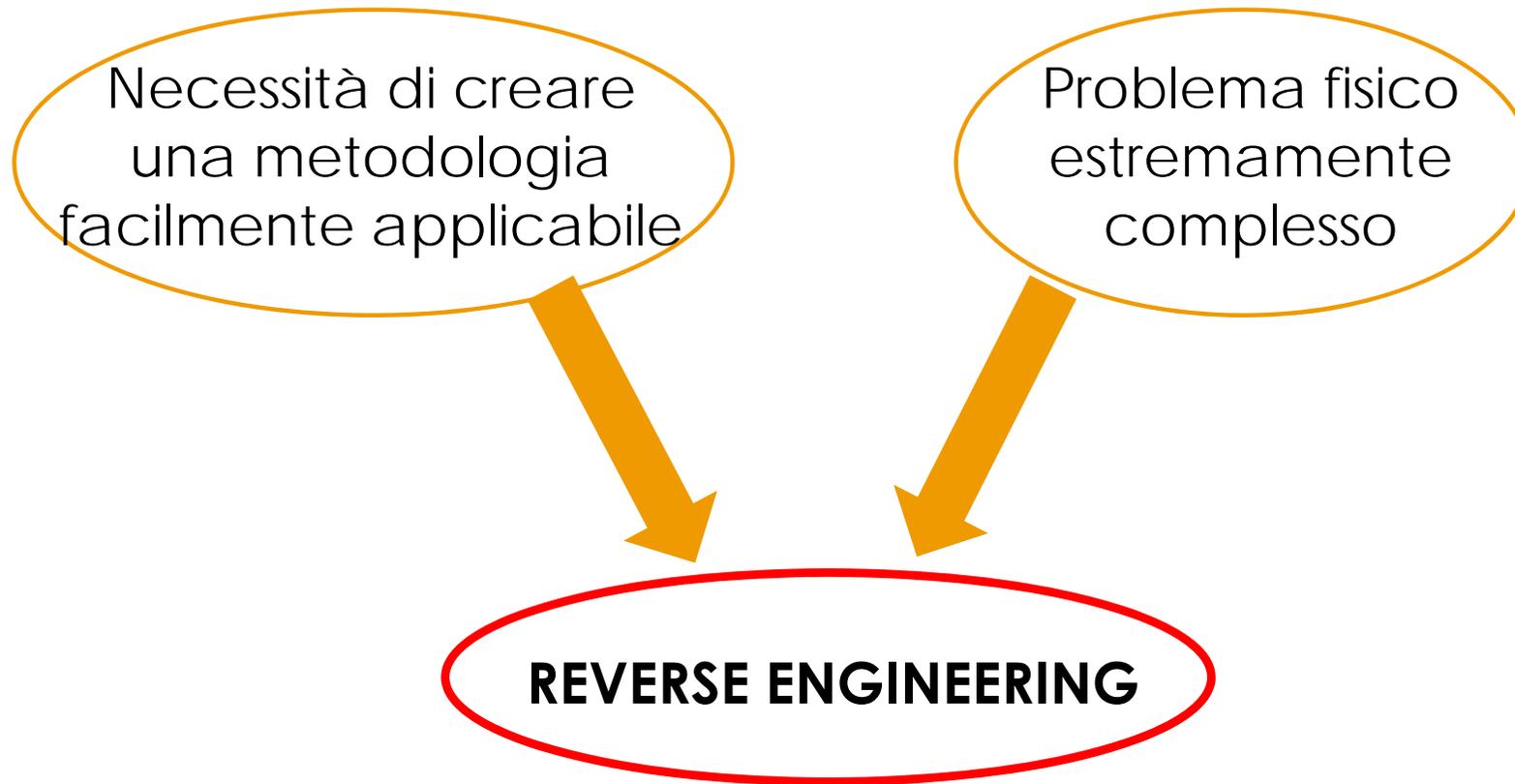
Pregi:

- Vengono considerati i controlli elettronici dell'illuminazione sia in relazione alla disponibilità di luce diurna che all'occupazione locali

Difetti:

- Non vengono considerati gli aspetti termici
- La presenza di schermi solari viene trattata in modo semplicistico
- Si trascura l'effetto di parametri importanti come l'esposizione dell'edificio

Caratterizzazione del problema e soluzione proposta



Si sono effettuate un **gran numero di simulazioni** variando i parametri fondamentali, dai risultati si è risalito alle equazioni che legano le variabili attraverso un processo di **regressione parametrica**

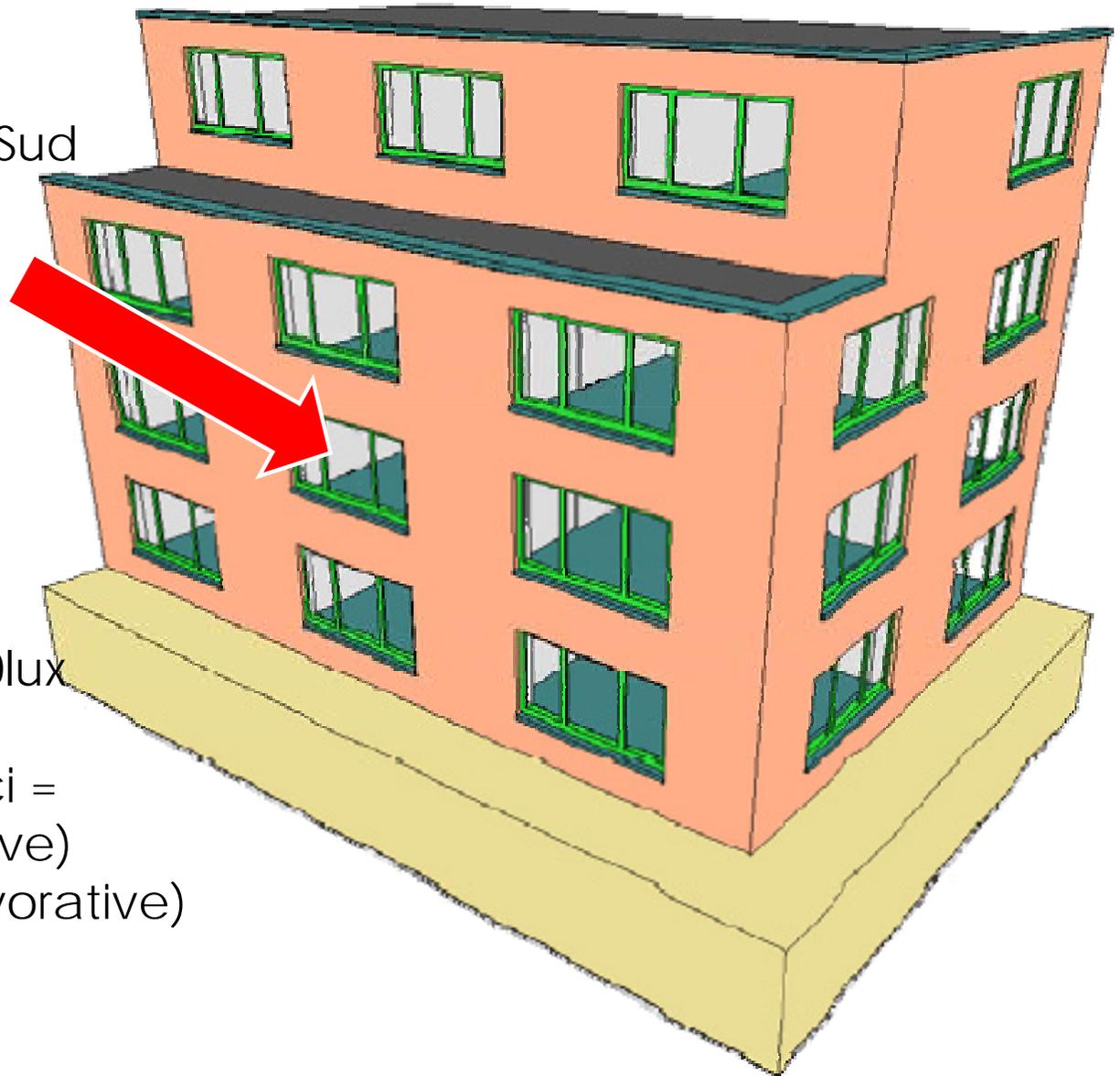
Il software di simulazione *EnergyPlus*



- Simulazione delle grandezze ambientali ad intervalli orari e sub-orari
- Simulazione dell'andamento solare e del cielo mediante un modello anisotropo della volta celeste
- Simulazione termica degli ambienti e dei sistemi di climatizzazione
- Calcolo dettagliato di finestrate complesse munite di protezioni solari
- Calcolo dettagliato dell'illuminamento dei locali
- Possibilità di controllo degli schermi solari e dell'illuminazione in base all'illuminamento interno
- etc etc ...

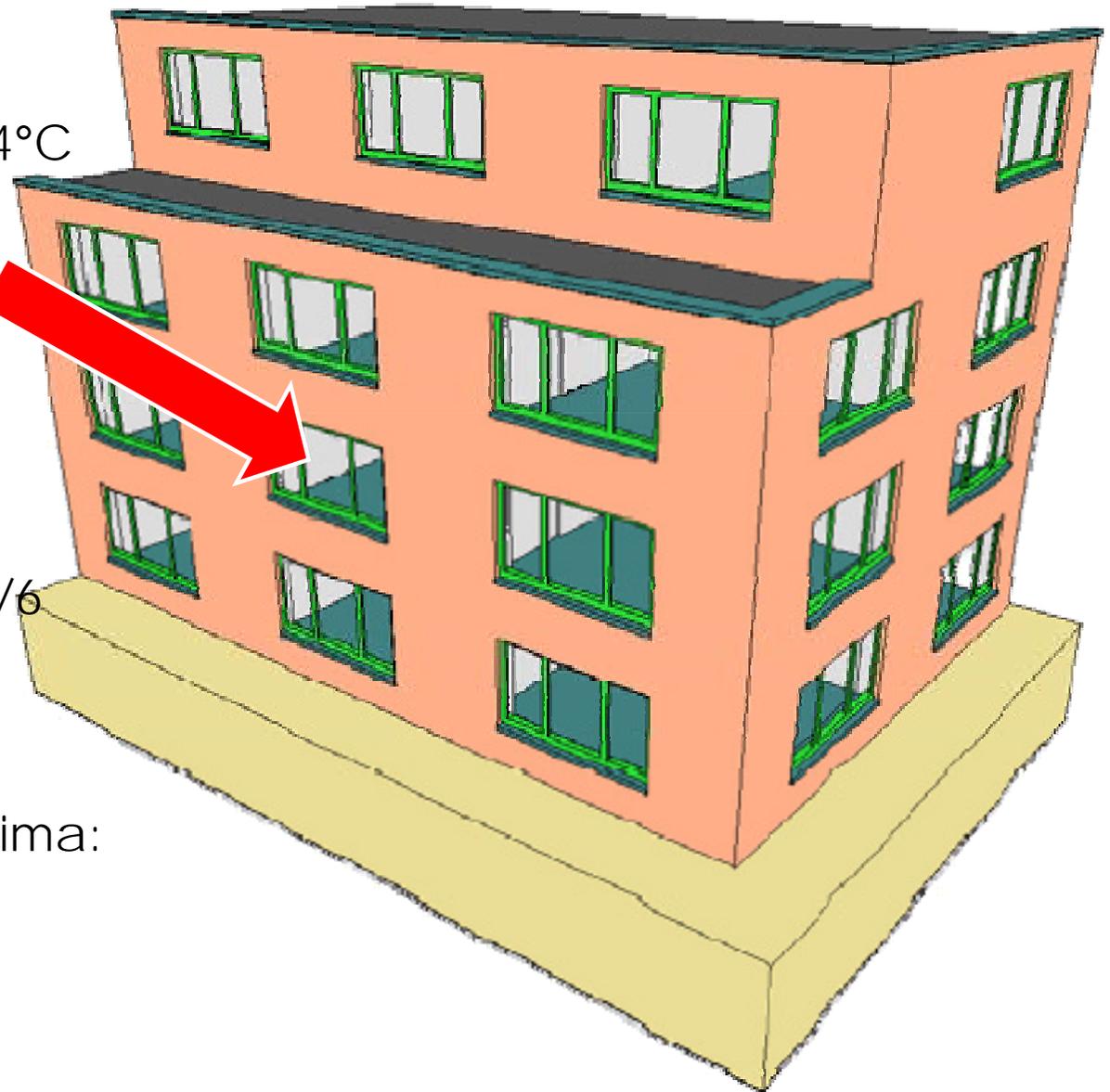
Ambiente di prova: dati comuni ad ogni simulazione

- Ubicazione: Roma
- Una facciata vetrata verso Sud
- Locale rettangolare
- Uso non residenziale
- Potenza luce = $16\text{W}/\text{m}^2$
(nelle ore lavorative)
- Set-point illuminazione = 400lux
- Potenza apparecchi elettrici =
 $10\text{W}/\text{m}^2$ (ore lavorative)
 $0.2\text{W}/\text{m}^2$ (ore non lavorative)



Ambiente di prova: dati comuni ad ogni simulazione

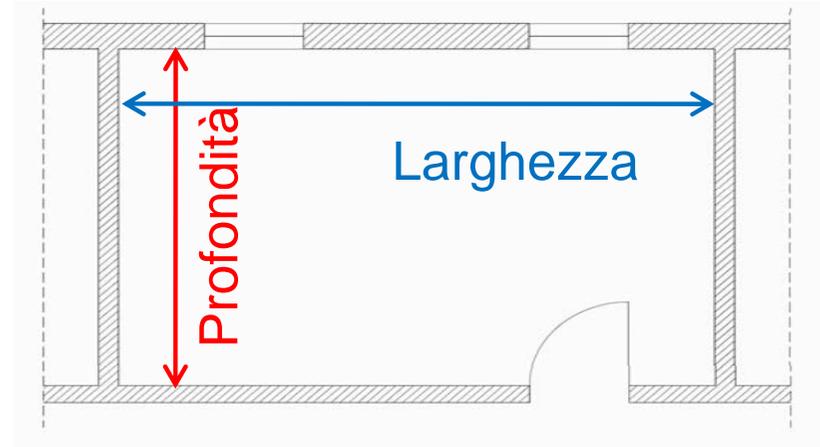
- Set-point riscaldamento = 20°C (nelle ore lavorative)
- Set-point raffrescamento = 24°C (nelle ore lavorative)
- Ventilazione: 0.9 ricambi/ora
- Trasmittanza delle pareti in accordo col Dlgs 192/2005
- Finestre a vetrocamera 6/10/6 con telaio in legno in accordo col Dlgs 192/2005
- Occupazione dei locali massima: 0.08 persone/m²
- Orario di ufficio: 8:00 – 18:00
- etc etc...



Ambiente di prova: parametri variabili e relativi valori

1. **Larghezza** → 3m, 4m, 6m, 10m

2. **Profondità** → 3m, 4m, 6m, 8m



3. **Percentuale di vetratura** → 20%, 30%, 40%, 50%

4. **Angolo (α) dell'ostacolo ombreggiante** → 0°, 15°, 30°, 45°, 60°

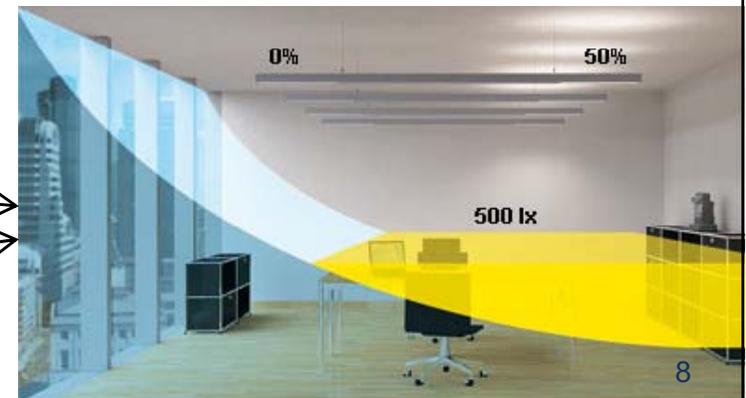
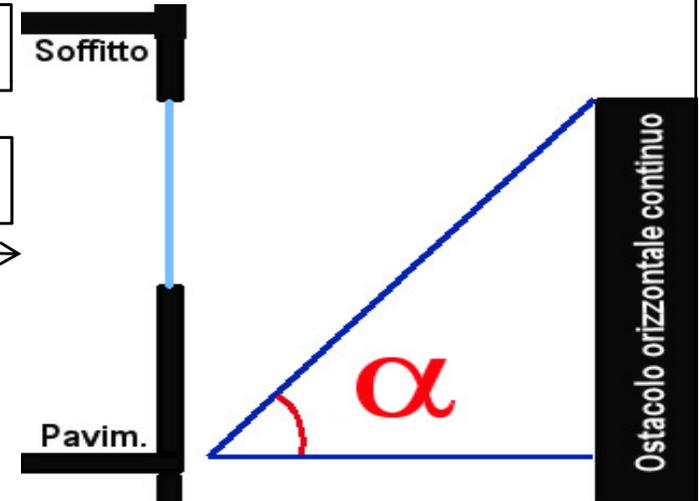
5. **Tipo di controllo dell'illuminazione**



- *OFF* (Luci sempre accese in orario di lavoro)

- *Cont/Off* (Dimming continuo con spegnimento automatico)

- *Step* (Dimming a gradini)

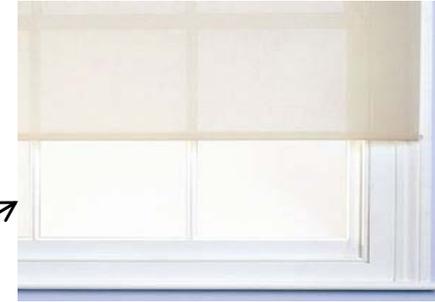


Ambiente di prova: parametri variabili e relativi valori

6. Tipo di protezione solare

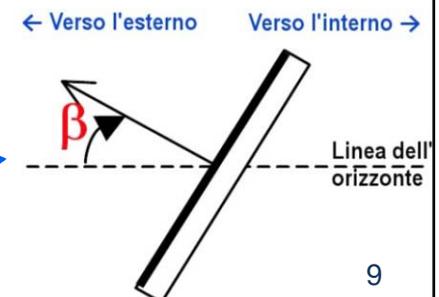


- *NoShad* (Nessuno schermo)
- *Tenda* (Tenda chiara traslucida)
- *VenIntBlock* (Veneziana interna chiara automatizzata con algoritmo di bloccaggio della radiazione diretta)
- *VenEstBlock* (Veneziana simile a "VenIntBlock" ma esterna)
- *VenArch* (Brise-soleil a veneziana, con lamelle fisse ad angolo β)
- *VenArchBlock* (Come "VenArch" ma con algoritmo bloccante)
- *Rete* (Rete metallica esterna)
- *Electro* (Vetratura elettrocromica)



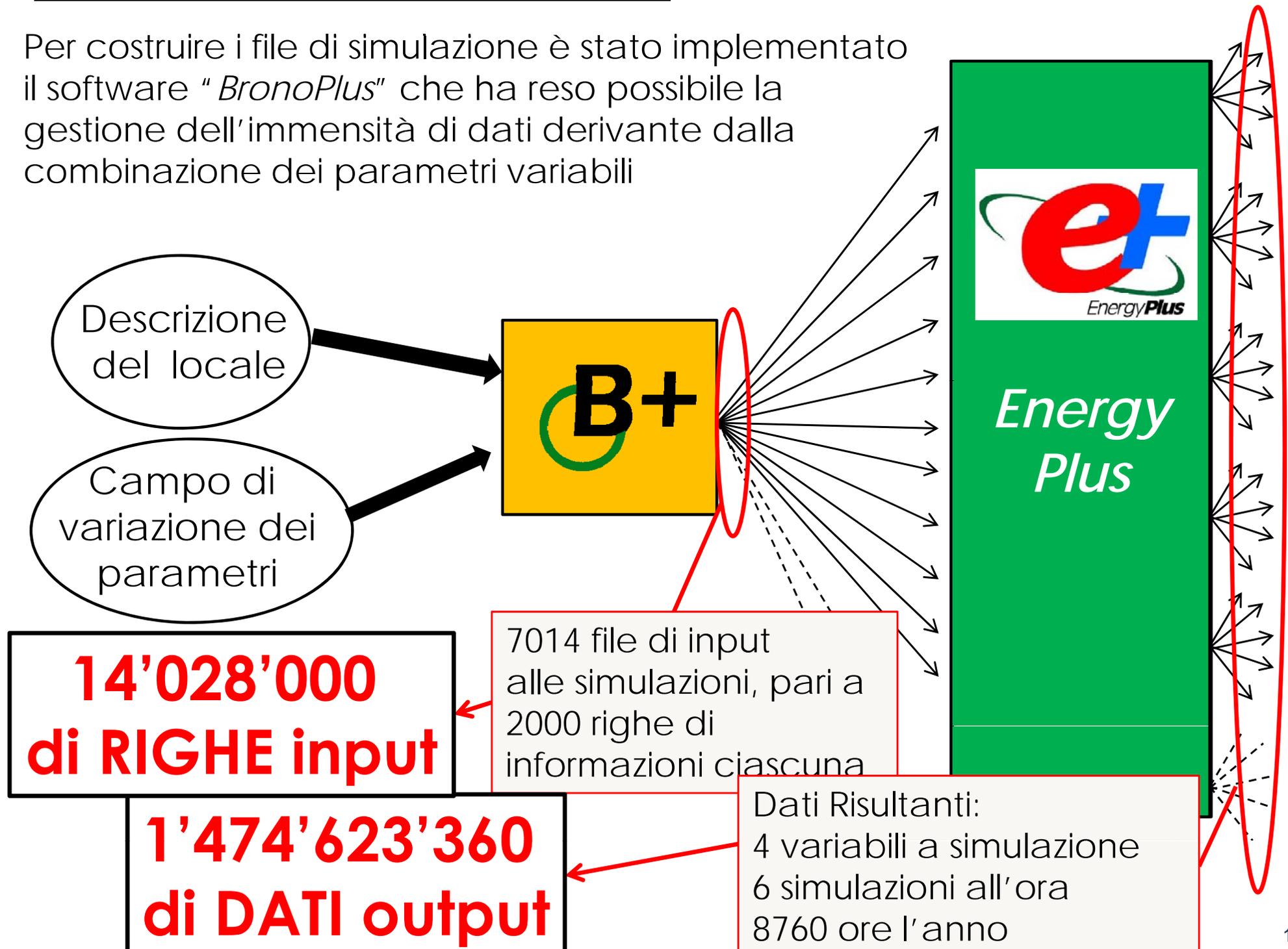
7. Angolo (β) di rotazione delle lamelle della veneziana fissa (*VenArch*)

30°, 45°, 60°

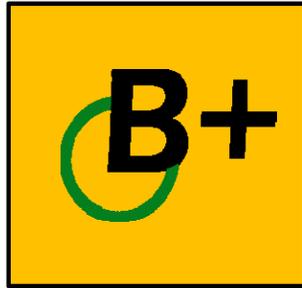


Procedimento di simulazione

Per costruire i file di simulazione è stato implementato il software "BronoPlus" che ha reso possibile la gestione dell'immensità di dati derivante dalla combinazione dei parametri variabili



Interfaccia di "BronoPlus"



BronoPlus è un software scritto in C++ con un'interfaccia grafica user-friendly

La schermata riporta tutti i parametri variabili ed alcuni parametri fissi di cui si necessita un'agevole modifica

Spingendo "Vai!" il programma produce tutti i file corrispondenti alle combinazioni selezionate di parametri

Senza B+ la scrittura dei 7014 file di simulazione (pari a 14 milioni di righe) avrebbe richiesto mesi di lavoro

BronoPlus v1.8 clima (5 Gen-2008)

Parametri Fissi

Spazio a persona <spazio_a_persona>: 13 mq/pers
Potenza specifica illuminazione <potenza_luce_mq>: 16 W/mq
Potenza specifica apparecchi <potenza_app_mq>: 10 W/mq
Numero di ricambi d'aria <cambio_aria>: 0.9 1/h

Punti di riferimento per il Daylighting:

X: Ass 0.5 m Ass 0.5 m Prop 0.5 adim Prop 0.5 adim F1 m prof 2.5
 Prop resto m prof

Y1: Ass 1.5 m Prop resto prop 3
 Prop 1.5 adim Z: 0.8 m F2 resto

Usa DElight

Parametri Variabili

Ubicazione: Milano Roma Palermo

Orientazione: Est Sud-Ovest Sud-Est Ovest Sud

Ombreggiamento: 0° 45° 15° 60° 30°

Larghezza stanza: 3m 6m 4m 10m UNISCI

Profondità stanza: 3m 6m 4m 8m UNISCI

Percentuale vetratura: 20% 40% 30% 50% UNISCI

Schermi solari (sempre presenti se scelti):

Nessuno schermo Param fissi venez
Tenda interna chiara: Fissa Angolo default 7° Angolo max 170°
Veneziana interna chiara: Blocco automatico luce diretta
Veneziana intermedia chiara: Blocco automatico luce diretta
Veneziana esterna chiara: Blocco automatico luce diretta
Veneziana architettonica chiara: Fissa a 30° Fissa a 45° Fissa a 60° Blocco automatico luce diretta
Rete metallica esterna: Fissa
Vetro elettrocromico: Illuminamento ottimale UNISCI

Dimming: No Dimming Continuo 3 Step UNISCI

Esegui

Sottodirectory di lavoro: _____

Directory di origine dati: BASE - Clima

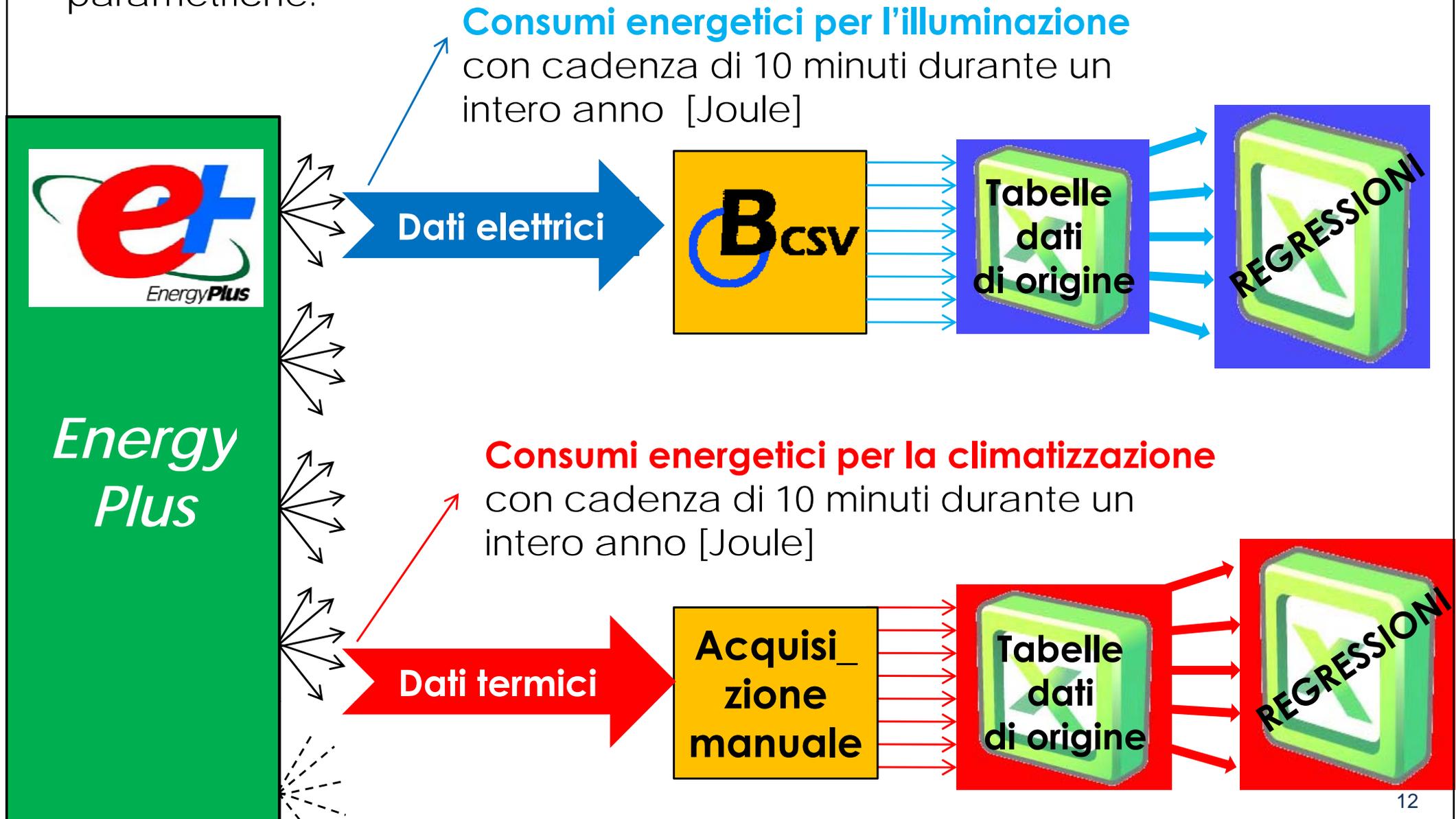
File di BASE di origine dati: BASE.idf

Directory dei risultati: Esempid

Vai

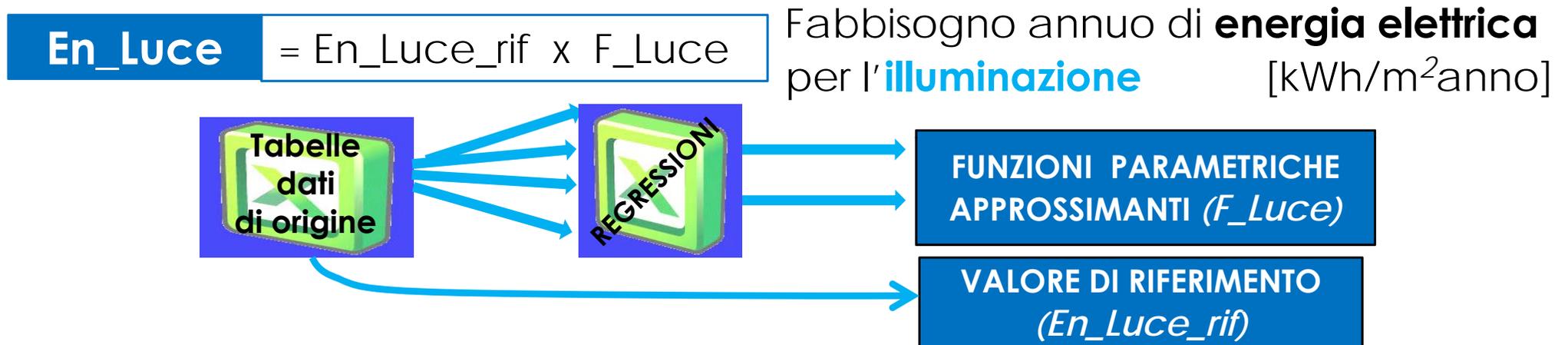
Elaborazione dei dati di output delle simulazioni

L'output delle simulazioni (quasi un **miliardo e mezzo di dati**) è stato elaborato seguendo due vie. Entrambe però portano alla costruzione di tabelle Excel attraverso le quali sono state effettuate le regressioni parametriche.



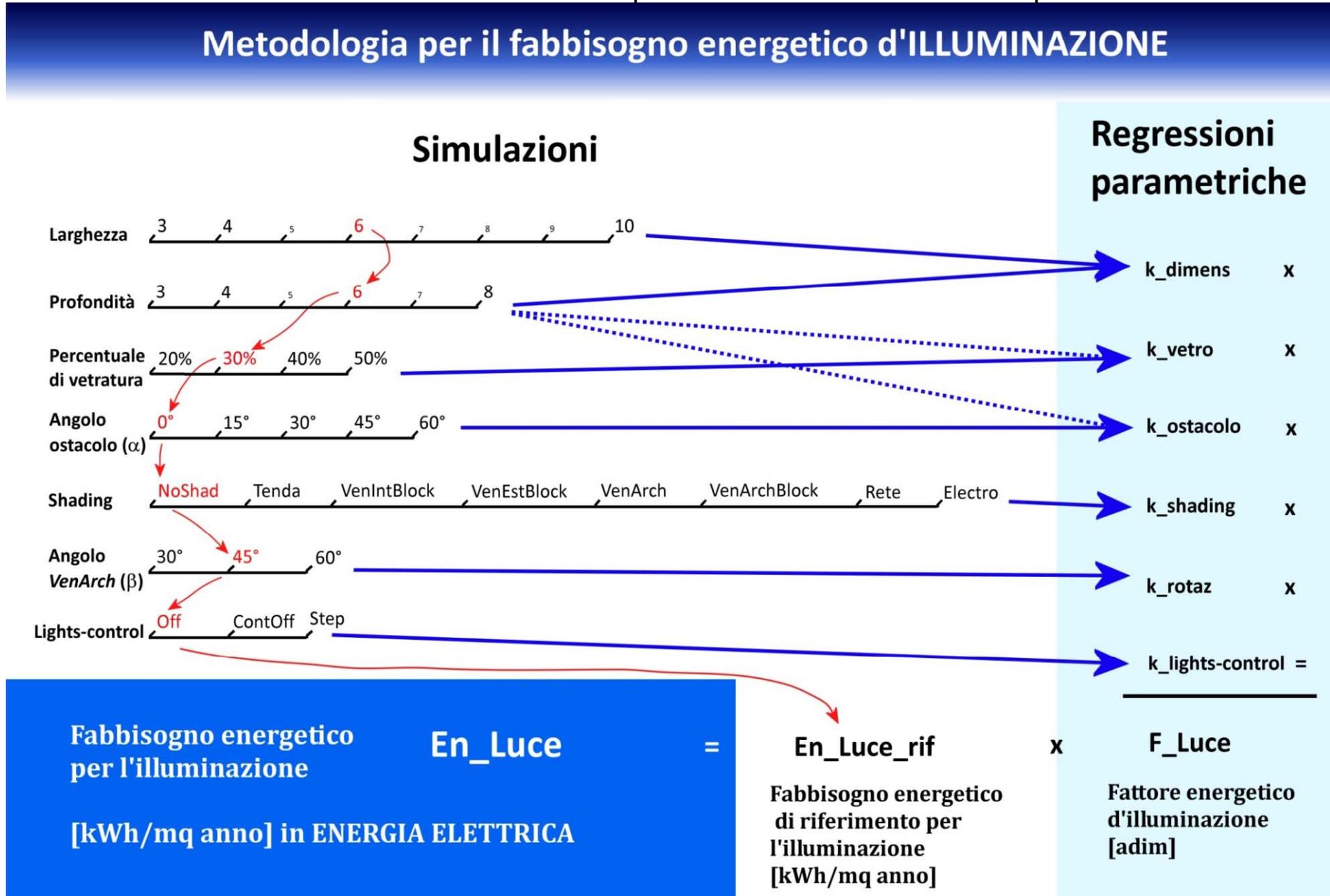
Principi della metodologia proposta

I fabbisogni energetici verranno espressi come prodotto tra un valore di riferimento (ricavato direttamente da una simulazione di riferimento) ed un fattore che tenga conto della variazione dei parametri rispetto alla situazione di riferimento. Nella prossima slide maggiori dettagli sul procedimento di regressione.



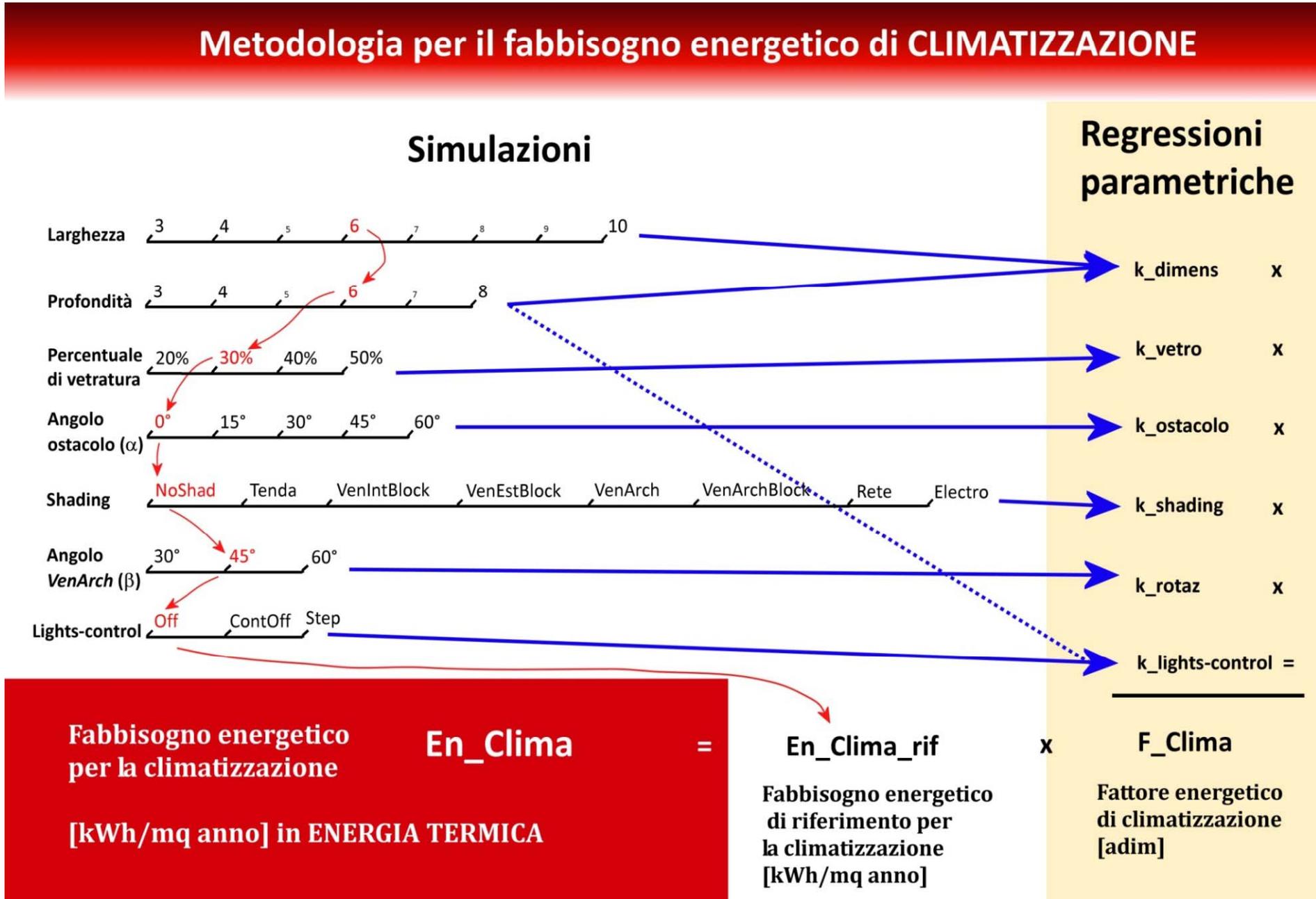
Principi della metodologia proposta: maggiori dettagli

Le frecce rosse mostrano le condizioni di riferimento per il calcolo di En_Luce_rif . F_Luce è il prodotto dei fattori "k", derivanti dalle regressioni sui relativi parametri. Le frecce blu indicano le dipendenze tra fattori e parametri.



Principi della metodologia proposta: maggiori dettagli

Per i fabbisogni di climatizzazione il procedimento è identico. Da notare che le frecce tratteggiate indicano eventuali dipendenze incrociate.



Applicazione della metodologia

Una volta eseguite simulazioni e regressioni, l'applicazione del metodo è semplice poiché i valori di riferimento sono noti, ed i fattori "k" sono direttamente ricavabili dalle funzioni approssimanti.

Valore fisso e noto in seguito alla simulazione di riferimento

En_Luce

$$= \text{En_Luce_rif} \times \text{F_Luce}$$

Fabbisogno annuo di **energia elettrica**
per l'**illuminazione** [kWh/m²anno]

$$\text{F_Luce} = k_dimens \times k_vetro \times k_ostacolo \times k_shading \times k_rotaz \times k_lights-control$$

Valori ricavabili analiticamente o graficamente dalle funzioni interpolanti dipendenti dai parametri

En_Clima

$$= \text{En_Clima_rif} \times \text{F_Clima}$$

Fabbisogno annuo di **energia termica (netta)** per la **climatizzazione**
[kWh/m²anno]

$$\text{F_Clima} = k_dimens * k_vetro * k_ostacolo * k_shading * k_rotaz * k_lights-control$$

Esempio di calcolo

Propongo un semplice esempio per mostrare l'applicazione pratica della metodologia. La stanza sotto analisi ha le caratteristiche seguenti:

Stanza dell'esempio:

Dimensioni: **6x4m**,

Vetro **30%**,

Ostacolo **20°**,

Shading= *VenIntBlock* (Veneziana interna automatizzata)

Lights-Control= *Dimming continuo*

Il procedimento si divide in due parti:

Parte 1: Calcolo del fabbisogno elettrico d'illuminazione

Parte 2: Calcolo del fabbisogno termico (netto) di climatizzazione

Esempio di calcolo



Stanza dell'esempio:
6x4m, Vetro=**30%**, Ostacolo=**20°**,
Shading=*VenIntBlock*,
Lights-Control=*Dimming continuo*

Parte 1. Calcolo del fabbisogno elettrico di illuminazione:

En_Luce

$$= \text{En_Luce_rif} \times F_Luce$$

Fabbisogno annuo di **energia elettrica** per l'**illuminazione** [kWh/m²anno]

dove:

$$\text{En_Luce_rif} = \mathbf{49.44} \text{ kWh/m}^2\text{anno} \quad (= 16 \text{ W/m}^2 * 3090 \text{ h/anno})$$

$$F_Luce = k_dimens * k_vetro * k_ostacolo * k_shading * k_rotaz * k_lights-control$$

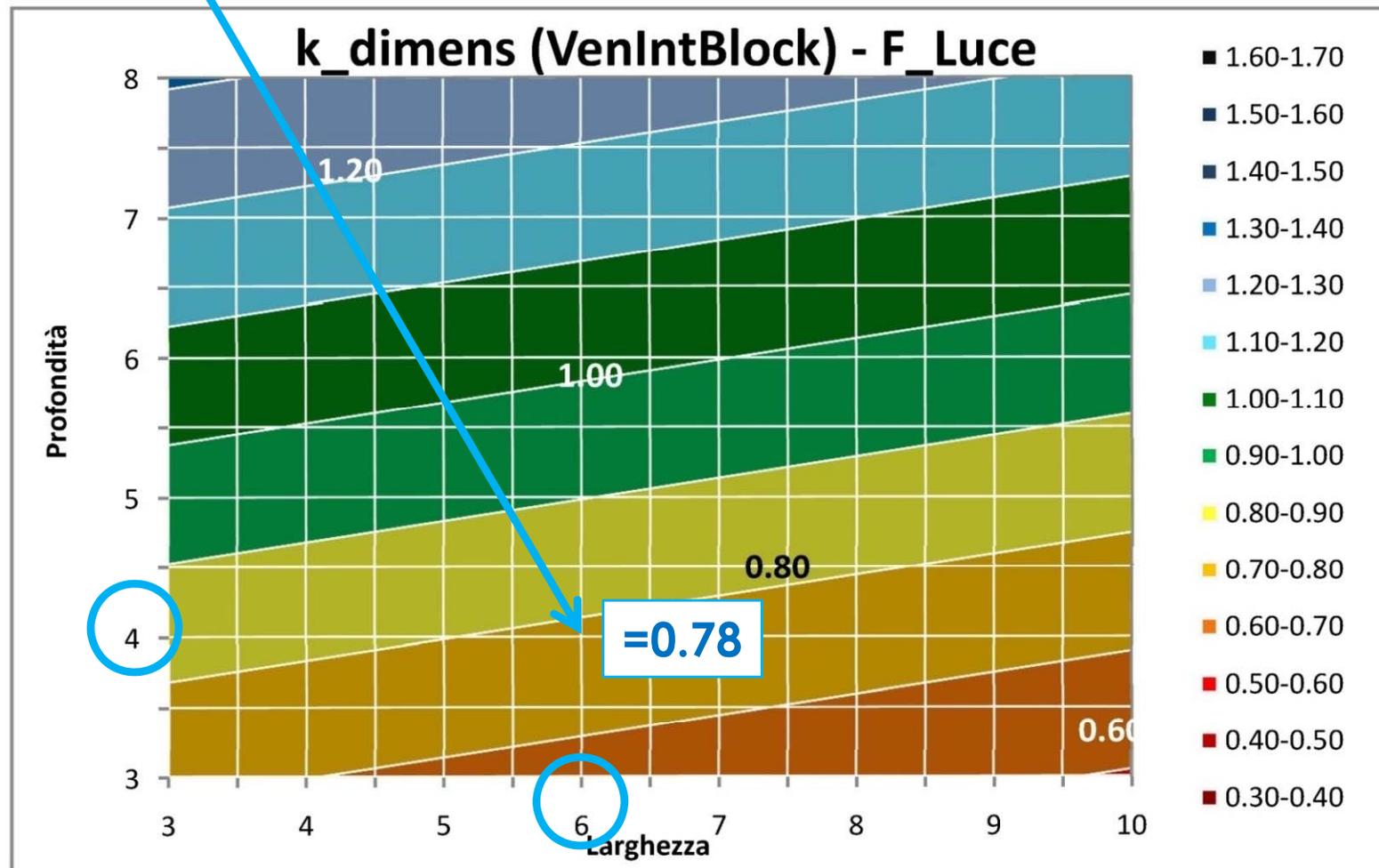
I fattori "k" verranno calcolati nelle prossime slide mediante metodo grafico

Esempio di calcolo →

Il diagramma in basso è il grafico della funzione interpolante per il parametro "k_dimens" in presenza di "VenIntBlock"

Stanza dell'esempio:
6x4m, Vetro=**30%**, Ostacolo=**20°**,
Shading=*VenIntBlock*,
Lights-Control=*Dimming continuo*

$$F_{\text{Luce}} = k_{\text{dimens}} * k_{\text{vetro}} * k_{\text{ostacolo}} * k_{\text{shading}} * k_{\text{rotaz}} * k_{\text{lights-control}}$$

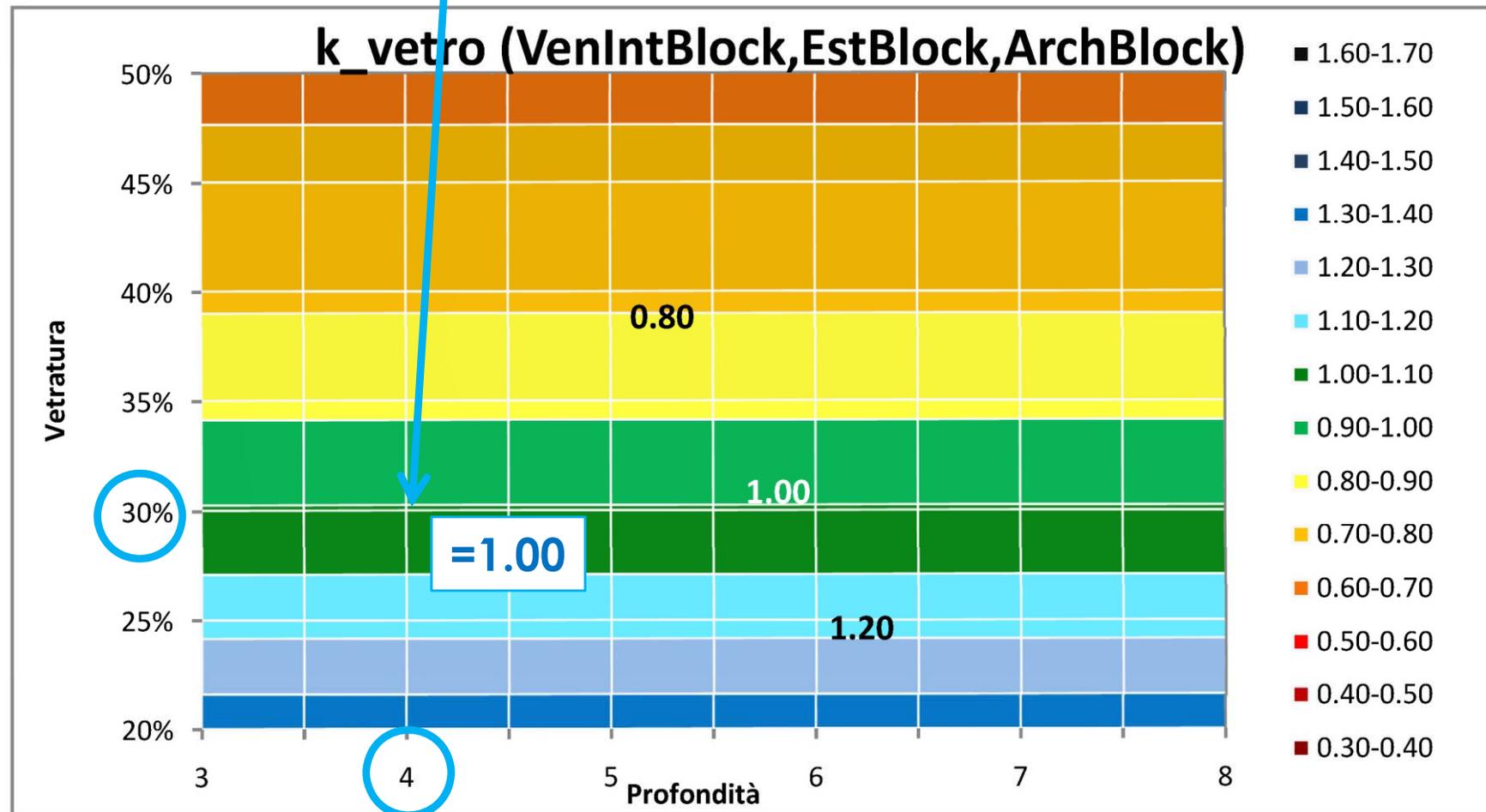


Esempio di calcolo →

Stanza dell'esempio:
6x4m, **Vetro=30%**, Ostacolo=**20°**,
Shading=*VenIntBlock*,
Lights-Control=*Dimming continuo*

Il diagramma in basso è il grafico della funzione interpolante per il parametro "k_vetro" in presenza di "VenIntBlock" (ma vale anche per "VenEstBlock" e "VenArchBlock")

$$F_{\text{Luce}} = k_{\text{dimens}} * k_{\text{vetro}} * k_{\text{ostacolo}} * k_{\text{shading}} * k_{\text{rotaz}} * k_{\text{lights-control}}$$

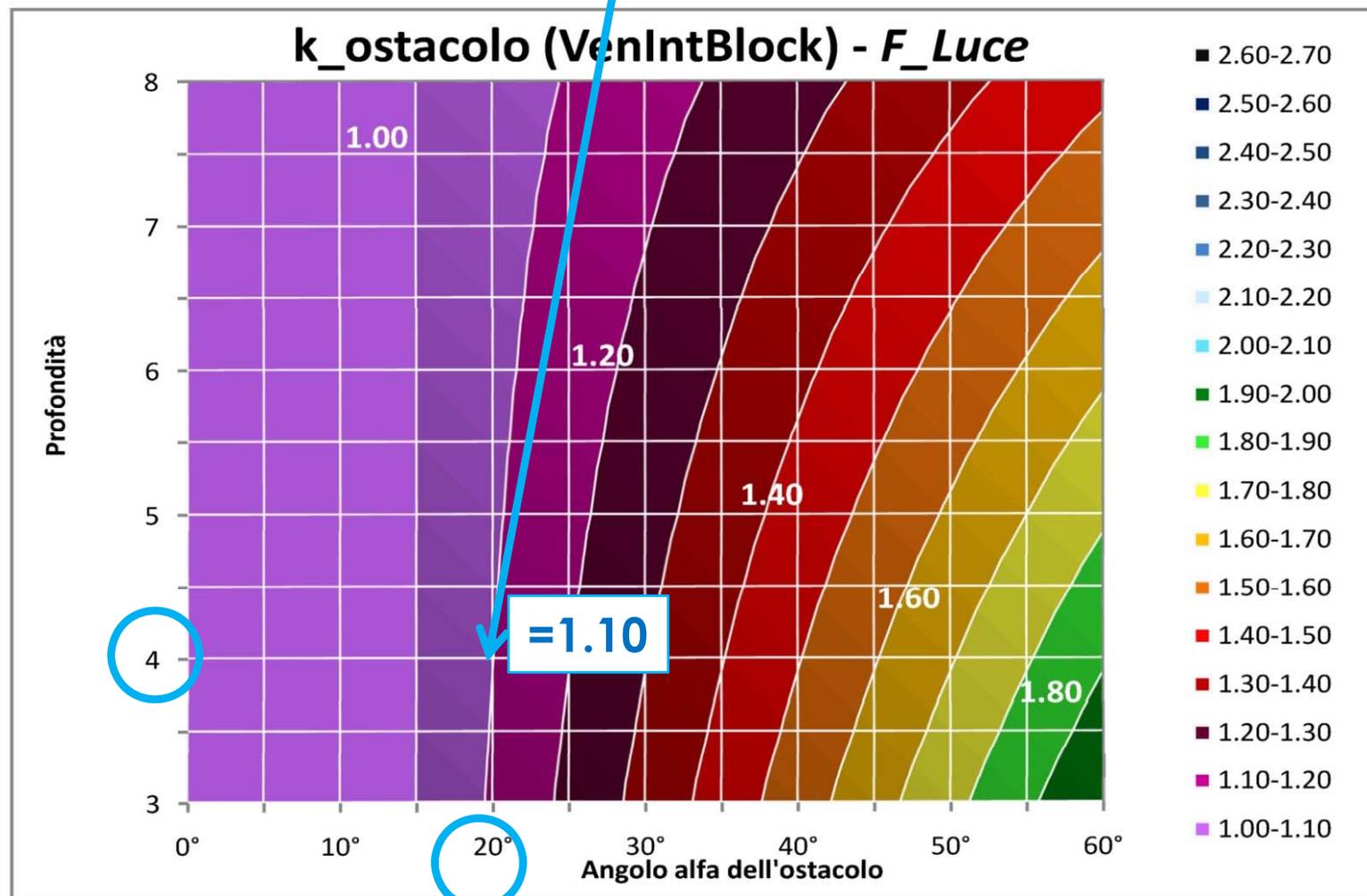


Esempio di calcolo →

Il diagramma in basso è il grafico della funzione interpolante per il parametro "k_ostacolo" in presenza di "VenIntBlock"

Stanza dell'esempio:
6x4m, Vetro=**30%**, **Ostacolo=20°**,
Shading=*VenIntBlock*,
Lights-Control=*Dimming continuo*

$$F_{Luce} = k_{dimens} * k_{vetro} * k_{ostacolo} * k_{shading} * k_{rotaz} * k_{lights-control}$$

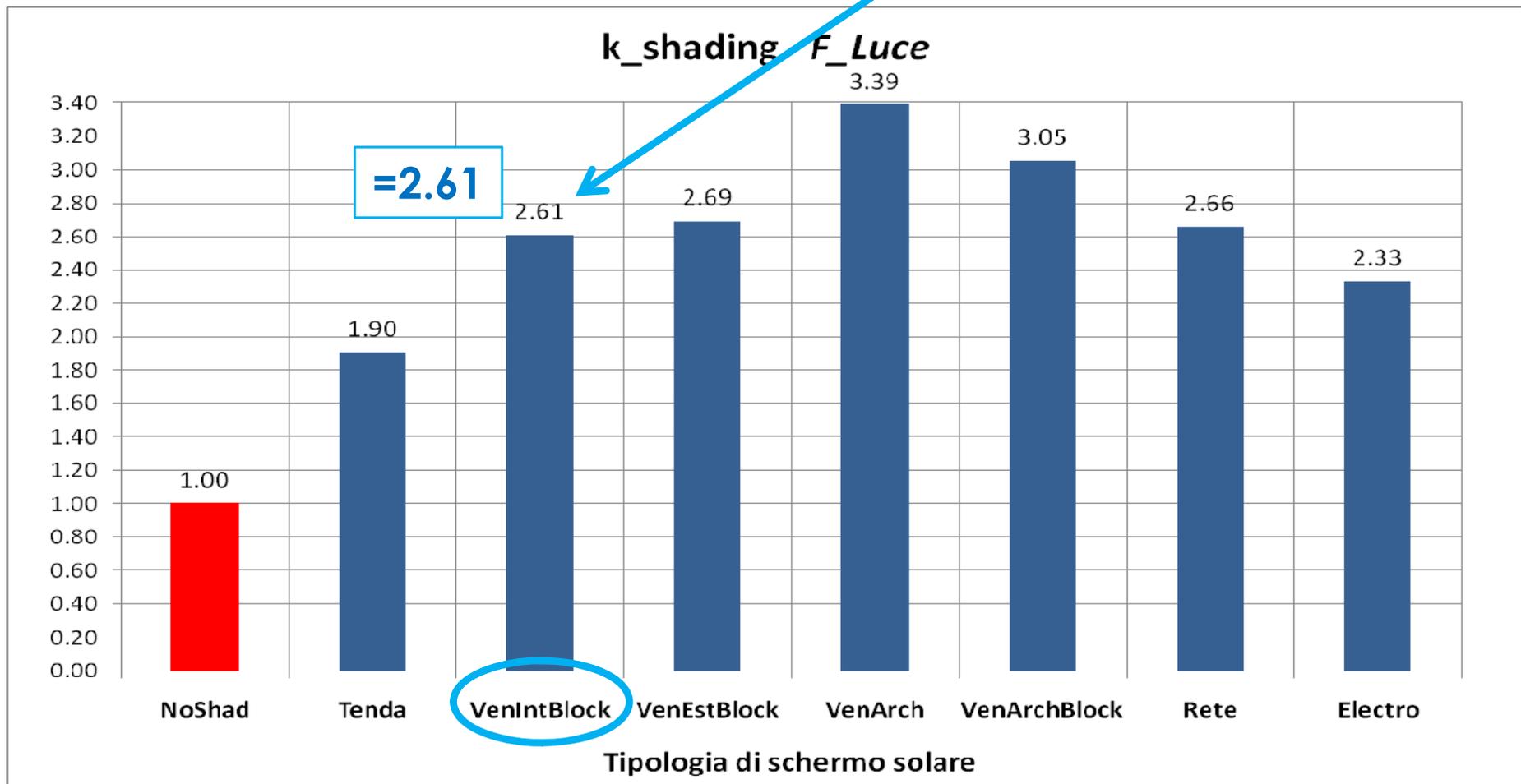


Esempio di calcolo →

Il diagramma in basso è il grafico dei valori risultanti dalle regressioni per il parametro "k_shading" in presenza dei diversi tipi di shading

Stanza dell'esempio:
6x4m, Vetro=**30%**, Ostacolo=**20°**,
Shading=**VenIntBlock**,
Lights-Control=**Dimming continuo**

$$F_Luce = k_dimens * k_vetro * k_ostacolo * k_shading * k_rotaz * k_lights-control$$



Esempio di calcolo

Il fattore "k_rotaz" si riferisce all'inclinazione del brise-soleil fisso (*VenArch*), quindi in questo caso è uguale a 1

Stanza dell'esempio:
6x4m, Vetro=**30%**, Ostacolo=**20°**,
Shading= *VenIntBlock*,
Lights-Control= *Dimming continuo*

$$F_{\text{Luce}} = k_{\text{dimens}} * k_{\text{vetro}} * k_{\text{ostacolo}} * k_{\text{shading}} * k_{\text{rotaz}} * k_{\text{lights-control}}$$

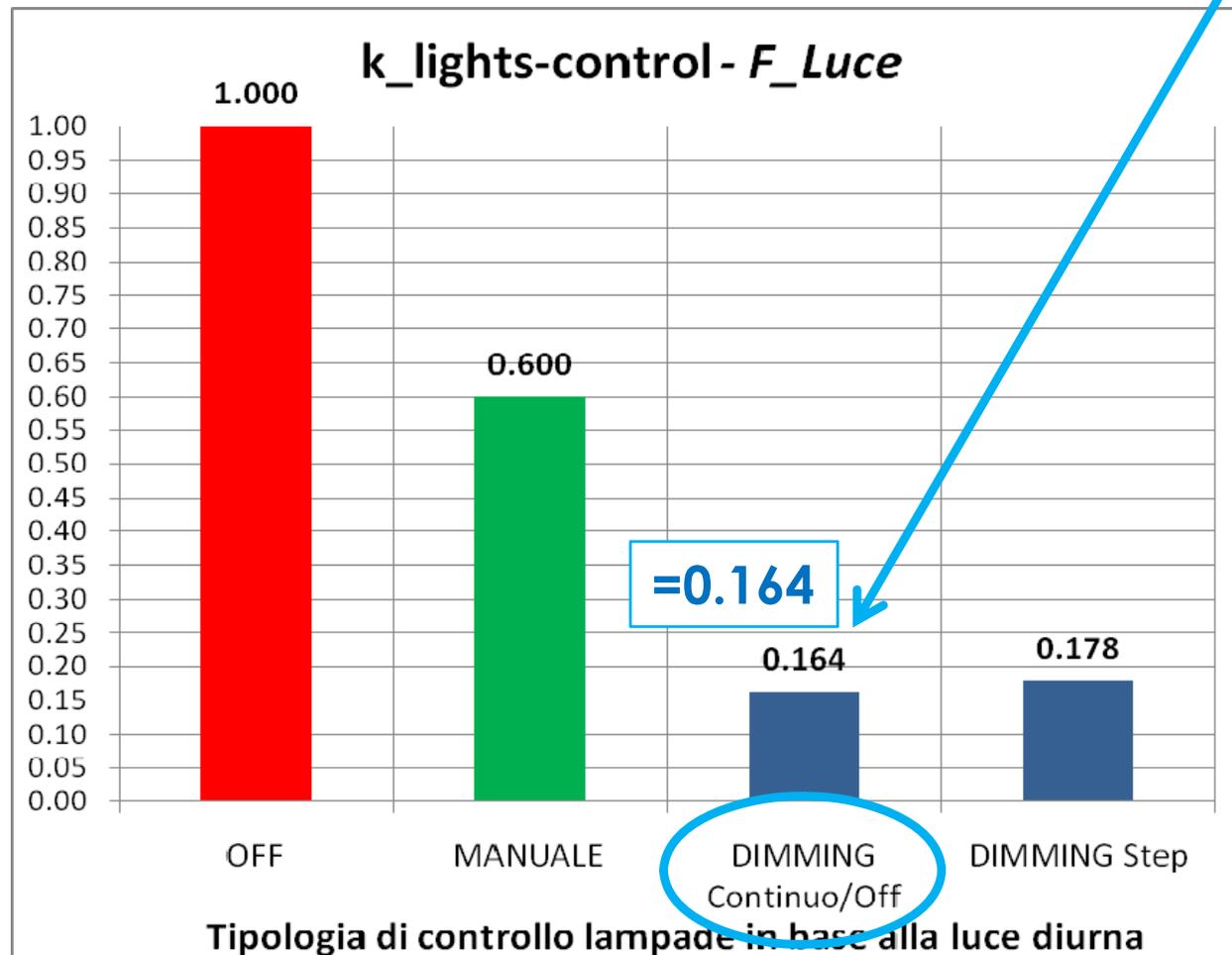
=1.00

Esempio di calcolo →

Il diagramma in basso è il grafico della funzione interpolante per il parametro "k_lights-control" in presenza dei diversi tipi di controllo luci

Stanza dell'esempio:
6x4m, Vetro=**30%**, Ostacolo=**20°**,
Shading=*VenIntBlock*,
Lights-Control=*Dimming continuo*

$$F_{Luce} = k_{dimens} * k_{vetro} * k_{ostacolo} * k_{shading} * k_{rotaz} * k_{lights-control}$$



Esempio di calcolo

A questo punto basta effettuare alcune moltiplicazioni per ottenere il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione

Stanza dell'esempio:
6x4m, Vetro=**30%**, Ostacolo=**20°**,
Shading=*VenIntBlock*,
Lights-Control=*Dimming continuo*

$$F_{\text{Luce}} = k_{\text{dimens}} * k_{\text{vetro}} * k_{\text{ostacolo}} * k_{\text{shading}} * k_{\text{rotaz}} * k_{\text{lights-control}}$$
$$0.78 * 1.00 * 1.10 * 2.61 * 1.00 * 0.164 = 0.370$$

$$En_{\text{Luce_rif}} = 49.44 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$$

$$En_{\text{Luce}} = 49.44 * 0.370 = 18.29 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$$

Fabbisogno annuo di energia elettrica per l'**illuminazione**

Esempio di calcolo →

Stanza dell'esempio:
6x4m, Vetro=**30%**, Ostacolo=**20°**,
Shading= *VenIntBlock*,
Lights-Control= *Dimming continuo*

Parte 2. Calcolo del fabbisogno termico:

Il procedimento non cambia rispetto al fabbisogno elettrico, perciò si riportano i risultati tralasciando i passaggi intermedi.

$$F_{\text{Clima}} = k_{\text{dimens}} * k_{\text{vetro}} * k_{\text{ostacolo}} * k_{\text{shading}} * k_{\text{rotaz}} * k_{\text{lights-control}}$$

$$1.18 * 1.00 * 0.95 * 0.97 * 1.00 * 0.80 = 0.890$$

$$En_{\text{Clima_rif}} = 13.20 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$$

$$En_{\text{Clima}} = 13.20 * 0.890 = 11.75 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$$

Fabbisogno annuo di energia termica netta per la **climatizzazione**

FINE DELL'ESEMPIO

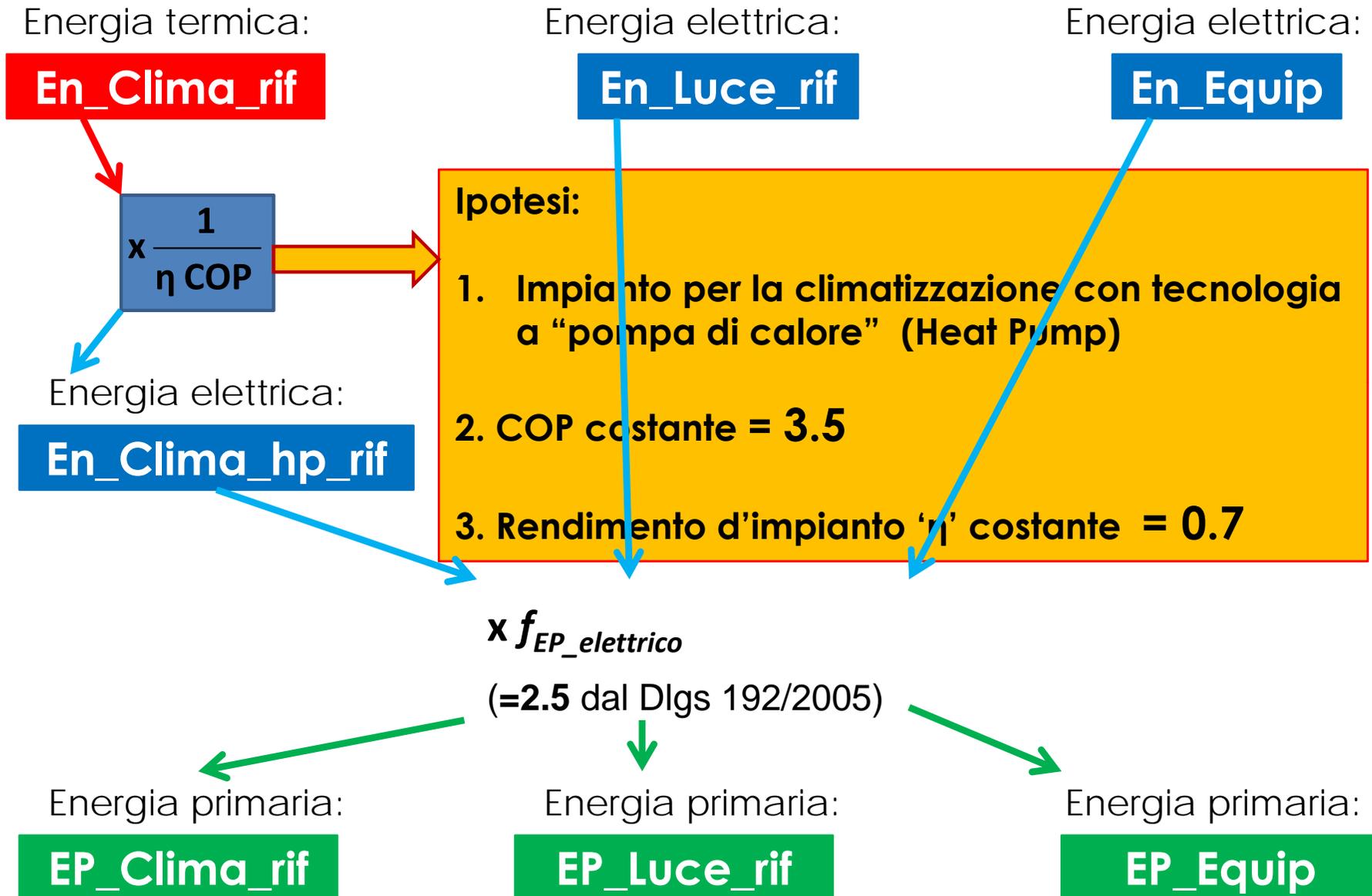
Conversione dei risultati in energia primaria

Una volta messa a punto la metodologia di calcolo appena illustrata, si è pensato di individuare un indice che permettesse di confrontare le prestazioni energetiche complessive nelle diverse configurazioni. Per questo i fabbisogni elettrici e termici sono stati convertiti in energia primaria per poter essere sommati.

NB: L'energia termica finora considerata era "netta", ovvero quella strettamente necessaria a soddisfare l'equilibrio termico dell'ambiente. Per convertirla in energia primaria è necessario ipotizzare un rendimento di produzione-distribuzione-controllo. In questo caso si è ipotizzato di utilizzare un impianto a pompa di calore (COP=3.5), ed un rendimento complessivo di distribuzione e controllo pari a 0.7.

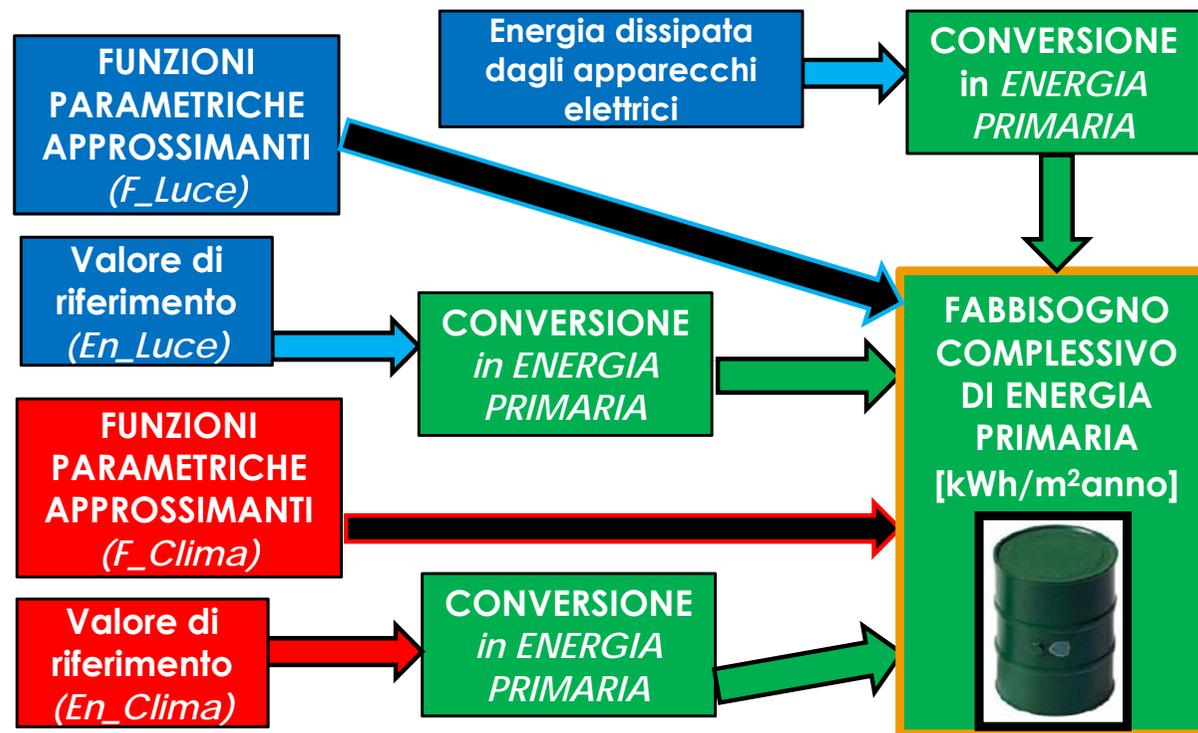
NB: Ai consumi elettrici per l'illuminazione vanno aggiunti quelli per le altre apparecchiature elettriche. In questo caso se ne è tenuto conto ipotizzando una densità di potenza fissa di 10W/m^2 nelle ore lavorative e di 0.2 W/m^2 nelle altre ore.

Conversione dei risultati in energia primaria



Fabbisogno complessivo di energia primaria

Per ottenere il fabbisogno complessivo di energia primaria è sufficiente sommare le tre componenti:



Il fabbisogno complessivo di energia primaria è stato valutato per svariate configurazioni dell'ambiente di prova

Nelle prossime slide sono riportati alcuni tra i risultati più significativi

Fabbisogni energetici globali

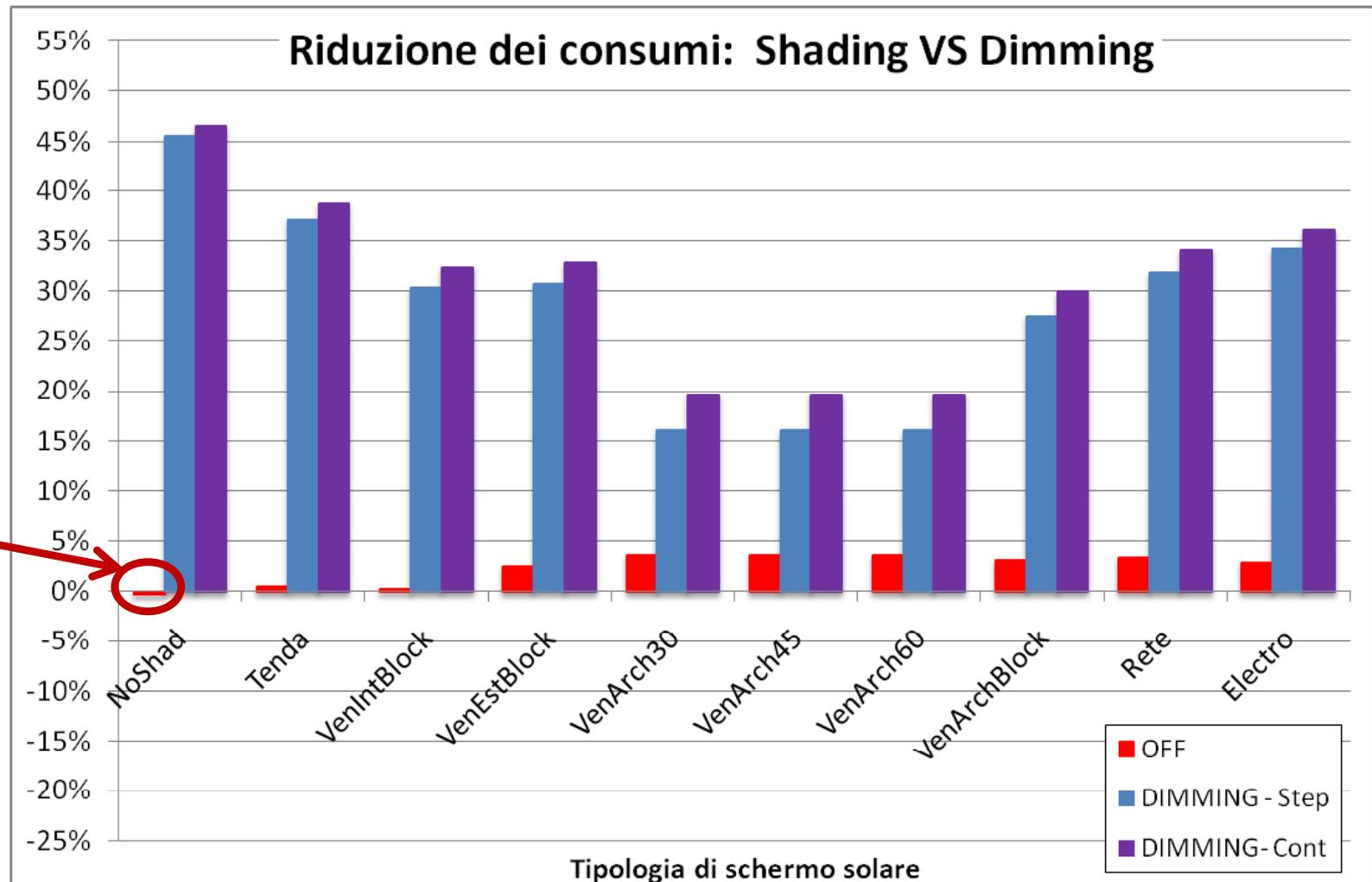
Il grafico mostra il **risparmio conseguibile mediante l'introduzione di schermi solari ed illuminazione controllata** rispetto alla stanza di riferimento descritta nel riquadro giallo. Le stanze oggetto del grafico sono tutte quelle descritte nel riquadro bianco. I risparmi risultano molto elevati soprattutto per stanze molto luminose poiché il fabbisogno termico è generalmente basso rispetto a quello elettrico (per ipotesi la stanza ha 5 pareti adiabatiche).

Stanze in analisi:

Dim=6x6m, Vetro=30%,
Ostacolo=0°,
Shading=(tutti),
Lights-Control=(tutti)

Stanza di riferimento:

6x6m, Vetro 30%,
Ostacolo 0°,
Shading=NO,
Lights-Control=OFF



Fabbisogni energetici globali

Il grafico mostra la **variazione del risparmio energetico al variare della vetratura** rispetto alla stanza di riferimento descritta nel riquadro giallo. Le stanze oggetto del grafico sono tutte quelle descritte nel riquadro bianco.

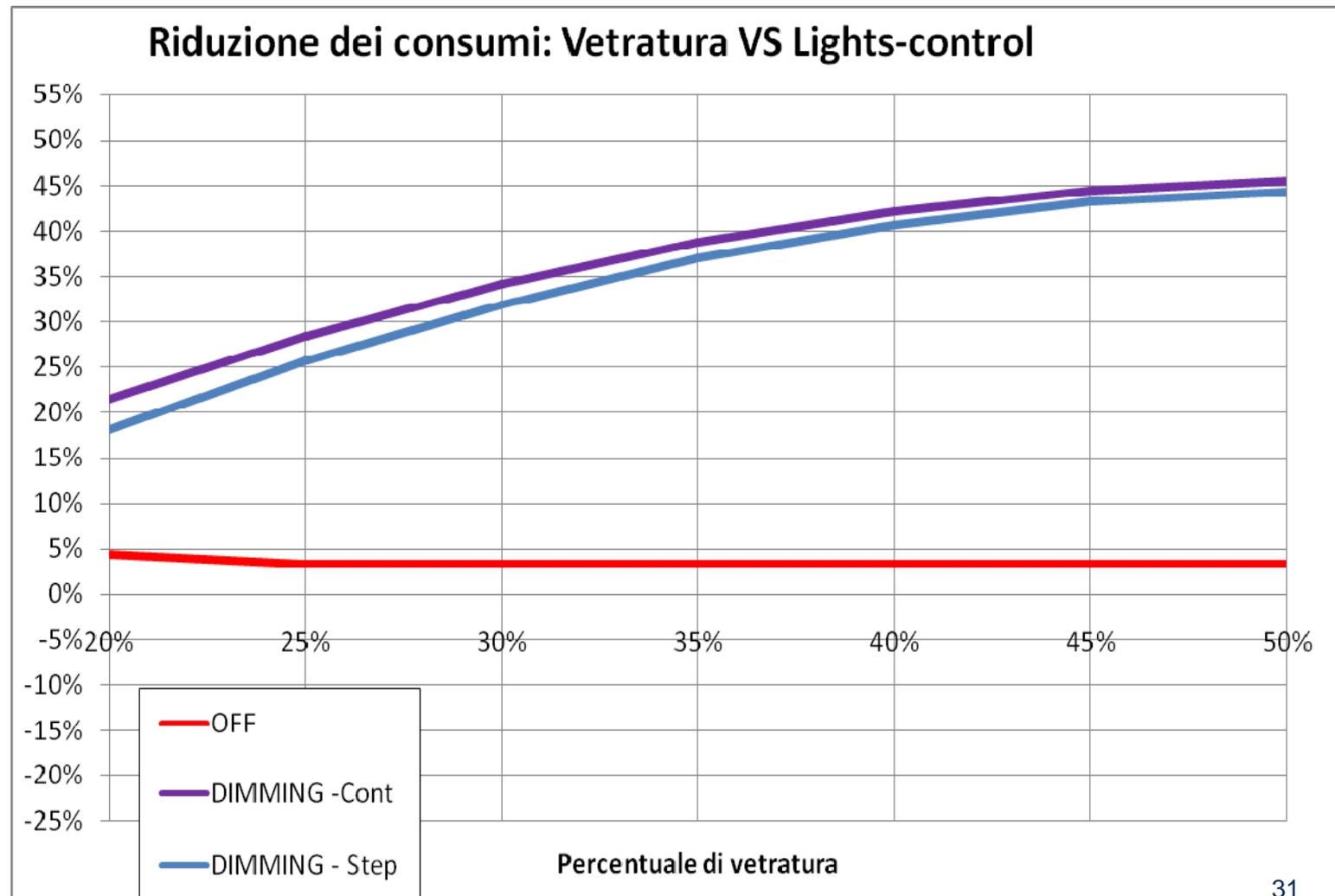
Vetrature modeste comportano una drastica riduzione dei risparmi.

Stanze in analisi:

Dim=6x8m, Vetro=(tutti),
Ostacolo=20°,
Shading=Rete,
Lights-Control=(tutti)

Stanza di riferimento:

6x6m, Vetro 30%,
Ostacolo 0°,
Shading=NO,
Lights-Control=OFF



Fabbisogni energetici globali

Il grafico mostra la **variazione del risparmio energetico al crescere dell'angolo di ombreggiamento di ostacoli esterni** rispetto alla stanza di riferimento descritta nel riquadro giallo. Le stanze oggetto del grafico sono tutte quelle descritte nel riquadro bianco.

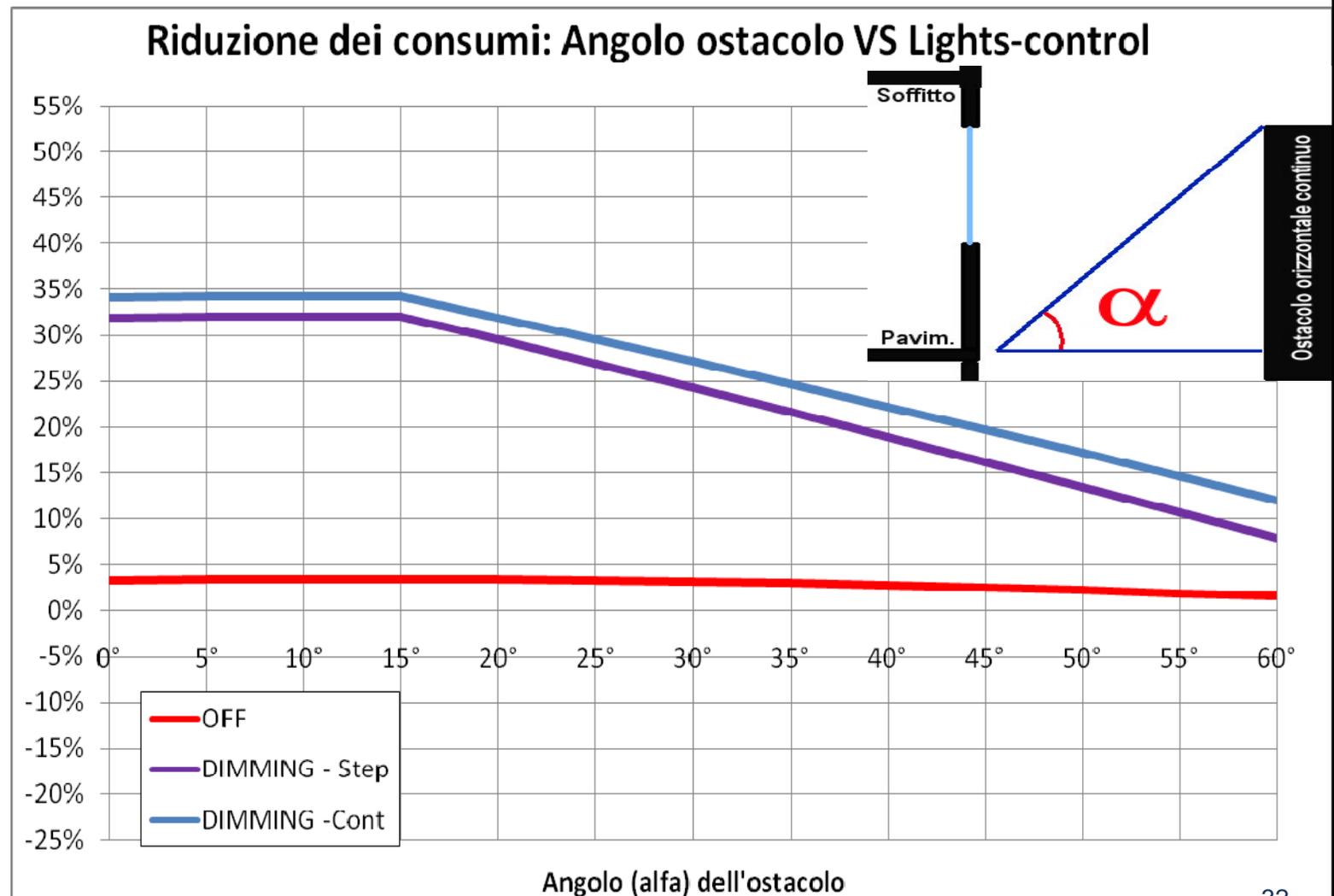
Ostacoli elevati arrivano quasi ad annullare i risparmi energetici.

Stanze in analisi:

Dim=6x8m, Vetro=25%,
Ostacolo=(tutti),
Shading=Rete,
Lights-Control=(tutti)

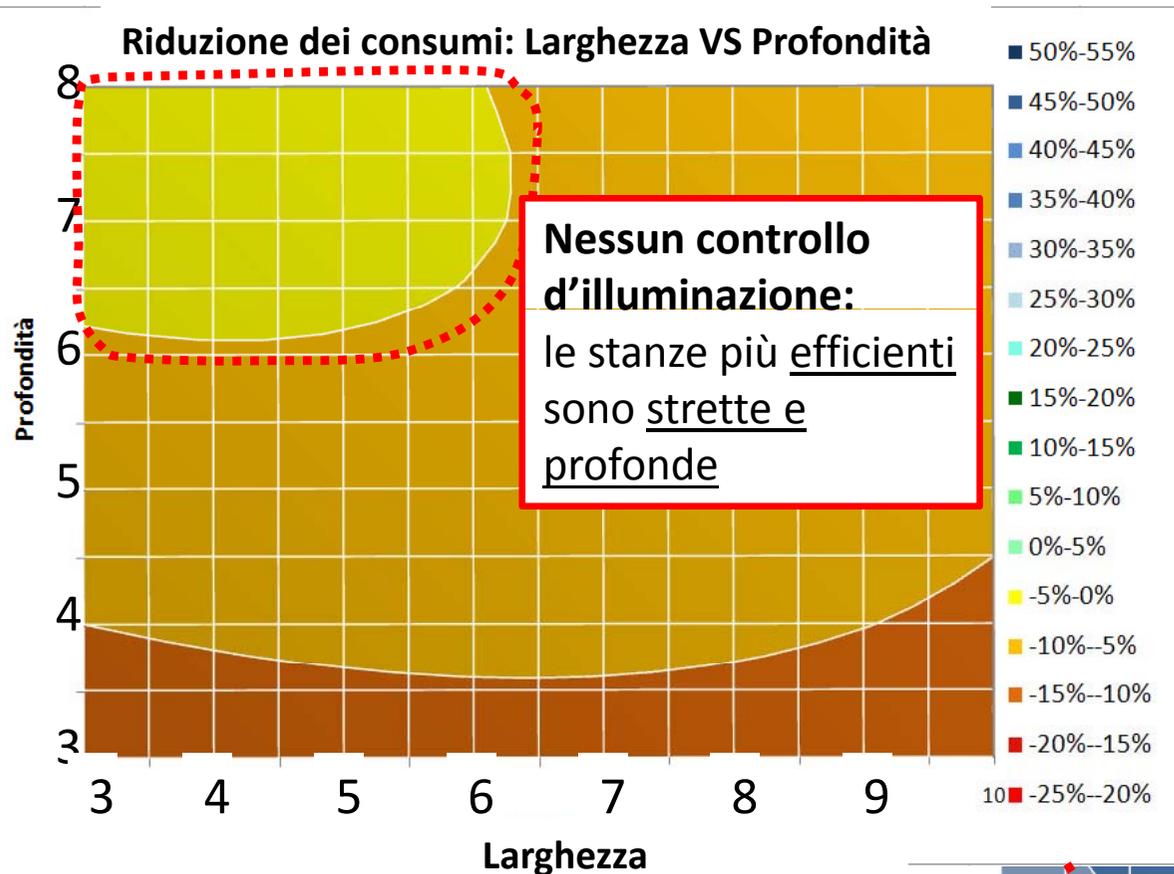
Stanza di riferimento:

6x6m, Vetro 30%,
Ostacolo 0°,
Shading=NO,
Lights-Control=OFF

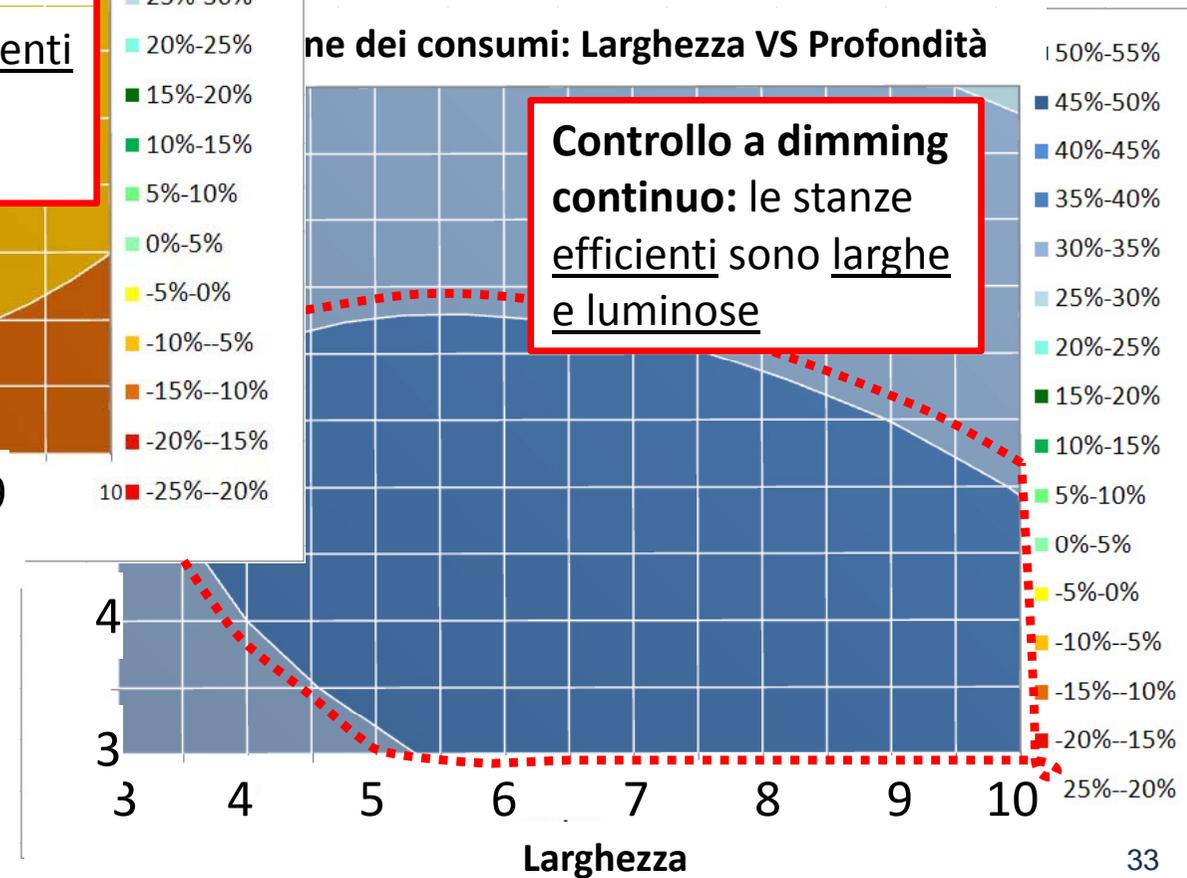


Fabbisogni energetici globali

I due grafici mostrano la **variazione del risparmio energetico al variare delle dimensioni della stanza** rispetto alla stanza di riferimento descritta nel riquadro giallo.



Tramite i sistemi di dimming, il perseguimento dell'efficienza energetica coincide con la creazione di ambienti luminosi e gradevoli



Stanza di riferimento:
6x6m, Vetro 30%,
Ostacolo 0°,
Shading=NO,
Lights-Control=OFF

Conclusioni

1. E' stata creata una **metodologia pratica per la valutazione dei fabbisogni energetici d'illuminazione e di climatizzazione** che può fornire un riferimento utile sia in fase progettuale che in fase certificativa
2. **L'introduzione di sistemi schermanti e di illuminazione controllata** in un locale ubicato a Roma ed esposto a Sud, **comporta notevoli benefici a livello energetico e di comfort**, nonché **nuove prospettive progettuali** verso un'architettura basata allo stesso tempo sull'efficienza energetica e sul confort abitativo.

Esempio di daylighting design: New York Times' Headquarters

Progettato da Renzo Piano, utilizza le più moderne tecnologie in fatto di *daylighting*, tra cui il **controllo integrato delle tapparelle e dell'illuminazione**.

La fase progettuale è stata seguita direttamente dagli scienziati del Lawrence Berkeley National Lab (**LBL**), gli stessi che hanno implementato *EnergyPlus*



Mattino: luci spente, tapparelle alzate



Mezzogiorno: luci spente, tapparelle abbassate



Pomeriggio: luci accese in parte, tapparelle abbassate



Sera: luci accese, tapparelle alzate

Grazie dell'attenzione