UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

Titulació:

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

Alumne:

**Alba Guarinos Gran**

Títol TFG:

**Estudi d'optimització lumínica a l'escola Europa International School de Sant Cugat.**

Director del TFG:

**Joan Carles Fernández Vallès**

Convocatòria del lliurament del TFG:

**Juny 2016**

Contingut d'aquest volum: **ANNEX**

## Contingut

Annex 1: Descripció del procediment a DialuxEvo

Annex 2: Demostració angles heliòstat

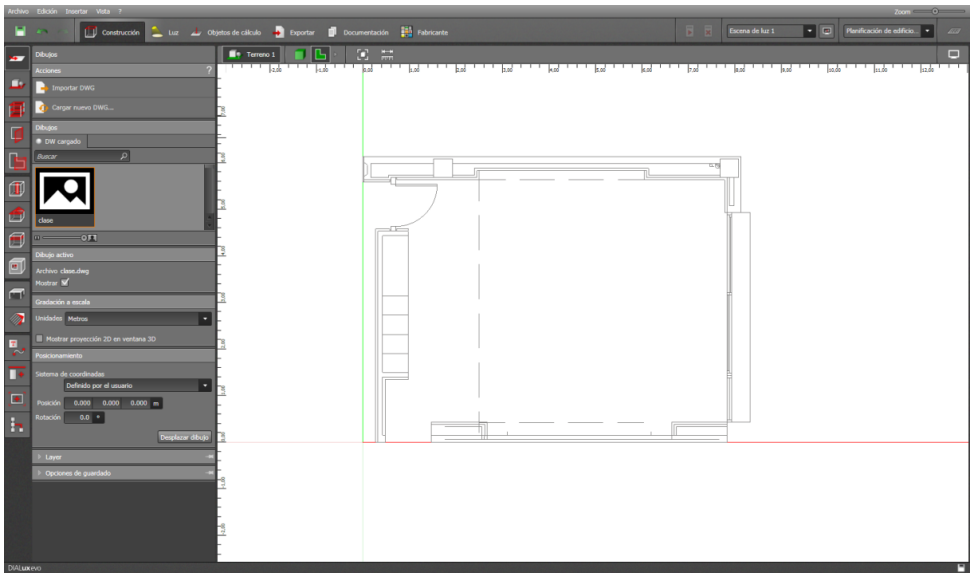
Annex 3: Càlculs de radiacions

# 1 Descripció del procediment a DialuxEvo

A continuació es realitzarà una explicació de quin ha estat el procediment per tal de poder dur a terme la modelització de les diferents estances.

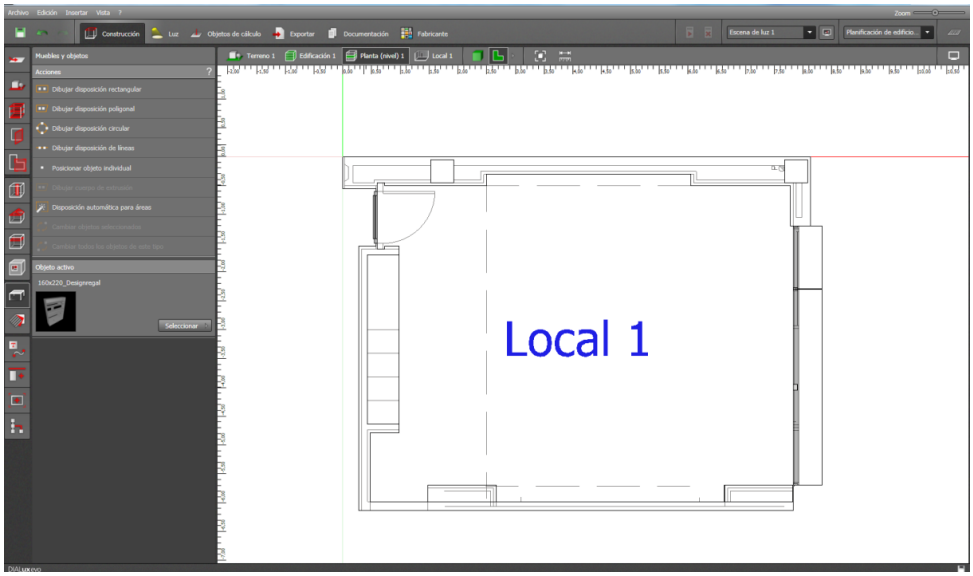
El programa sobre el qual s'ha treballat ha estat Dialux evo 5.2. Es tracta d'un software pel disseny d'il·luminació que permet dissenyar, calcular i visualitzar la llum.

Per començar, es necessari tenir com a base els plànols en Autocad, ja que el programa permet visualitzar-los i tenir-los com a base. En el cas d'aquest estudi també va ser vital fer una visita a l'escola, a fi de poder comprovar les mides reals i fer un croquis de la disposició de les llums a les diferents estances i saber les mides de les finestres i les portes entre d'altres.

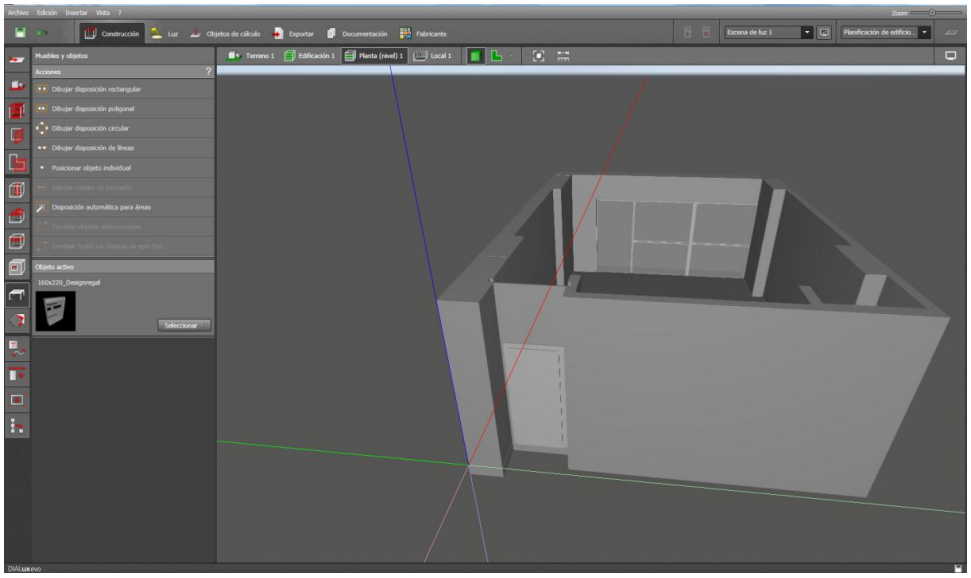


**Il·lustració 1. Visualització del programa i el plànol en Autocad**
Font: elaboració pròpia (Dialux evo)

A continuació, es procedeix a començar la modelització. Primer de tot es determinen les parets externes de l'edifici i s'han de donar una sèrie de mides, com són alçada d'aquest i l'espessor del terra. Un cop s'ha definit això, es passa a dibuixar la part interna de l'edifici o l'habitació. El programa permet introduir columnes, finestres amb les mides necessàries, portes, inclús es poden inserir mobles per tal de poder saber com afecta la llum a tots els punts de l'habitació.

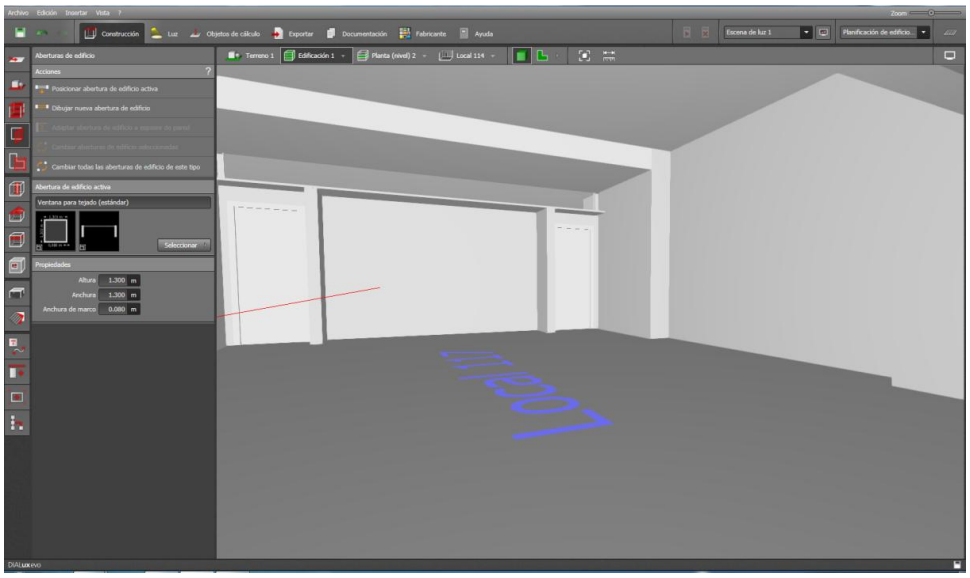



**Il·lustració 2. Determinació de columnes, parets i col·locació de portes i finestres**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)



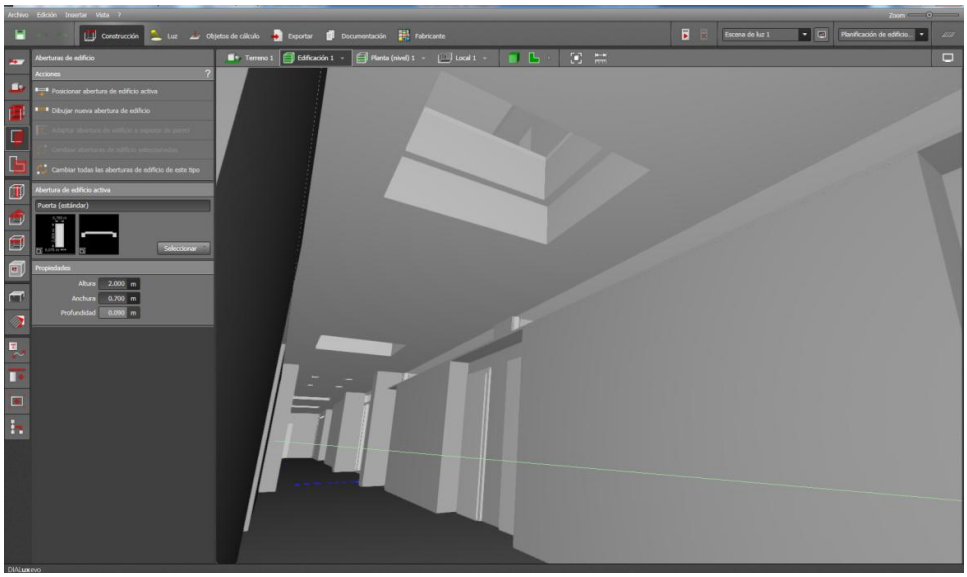
**Il·lustració 3. Visió 3d de la classe amb la porta i les finestres**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)

El programa té la opció d'afegir fals sostres, en el cas de l'escola era necessari, perquè l'edifici per tal d'amargar la instal·lació elèctrica i els tubs necessaris fa servir fals sostre fet amb plaques de pladur, però hi ha algunes zones on el sostre que es veu és el real, de formigó.

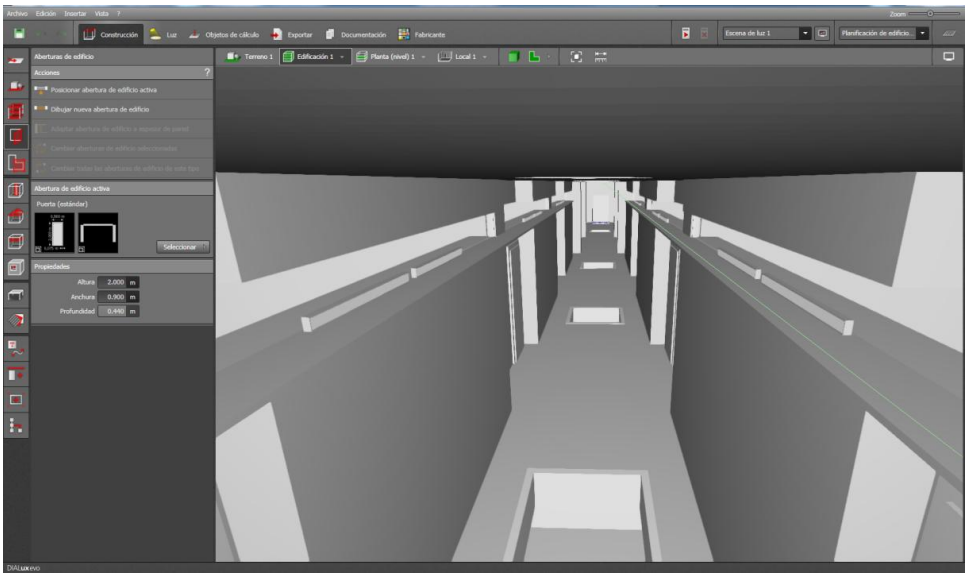


**Il·lustració 4. Classe amb fals sostre**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)

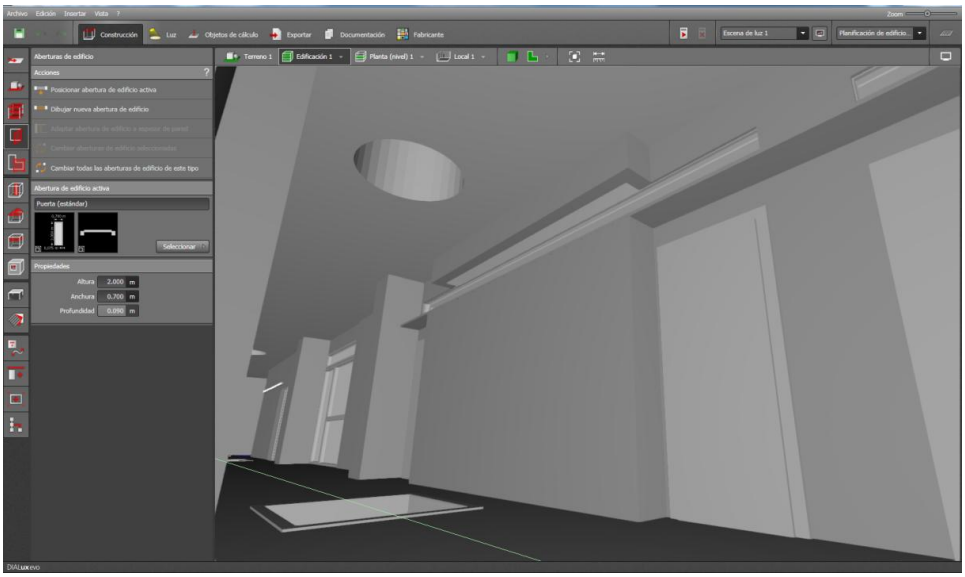
Un dels punts més crítics a l'hora de la modelització, ha estat la col·locació de les claraboies que hi ha als passadissos. No només la segona planta sinó també a la primera planta per tal d'aprofitar la llum solar. El programa té la funció "Recortes", però aquesta només permet retallar el que és original de l'edifici, de manera que els fals sostres no els travessa. Això es va poder solucionar fent ús de finestres de sostre.



**Il·lustració 5. Vista claraboia primera planta**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)



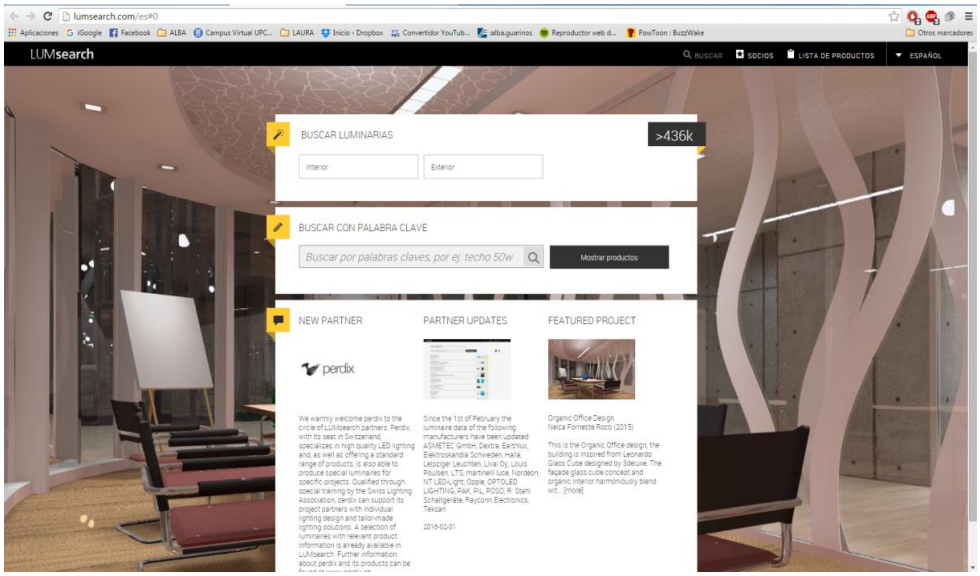
**Il·lustració 6. Vista claraboia segona planta**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)



**Il·lustració 7. Vista de les dues claraboies**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)

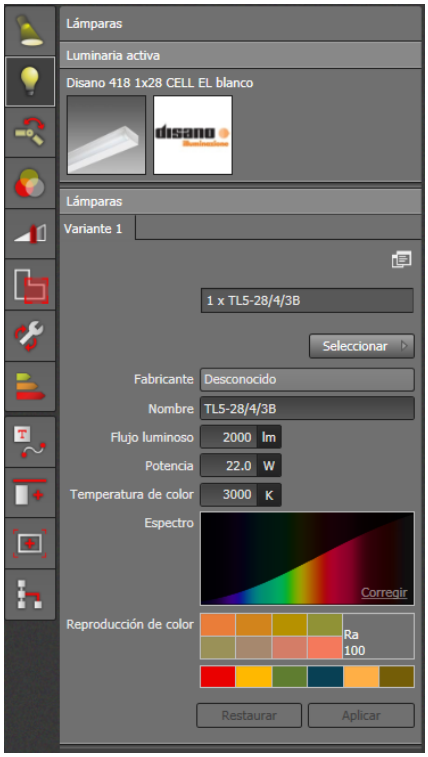
Quan tot el relacionat amb la construcció està definit, abans de passar a la col·locació de les llums, cal definir la ubicació d'on es troba l'edifici, introduint ciutat i les coordenades de latitud i longitud.

Un cop definit, es procedeix amb la introducció de la lluminària. En aquest punt, el programa no disposa d'un llistat intern de llums, però té un enllaç extern des d'on es pot buscar allò que busques. Com en els enllaços externs no es troben totes les marques de llums o no totes tenen la opció d'incorporar els llums al programa, el que s'ha fet ha estat buscar aquelles lluminàries que tenien unes característiques semblants a les que es buscaven.



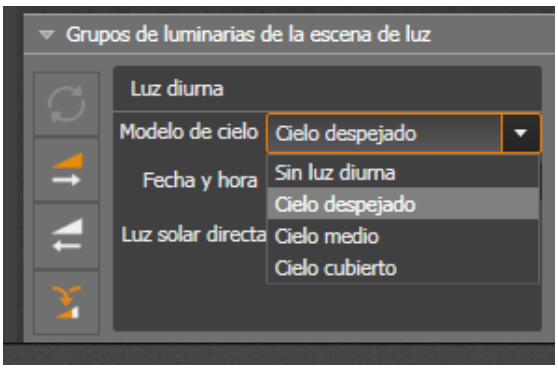

**Il·lustració 8. Cercador de llums**
Font: Lumsearch.com

En el cas de no trobar exactament totes les característiques iguals, el programa permet modificar alguns paràmetres per tal de poder fer més acurat el resultat que es busca a l'hora dels càlculs.

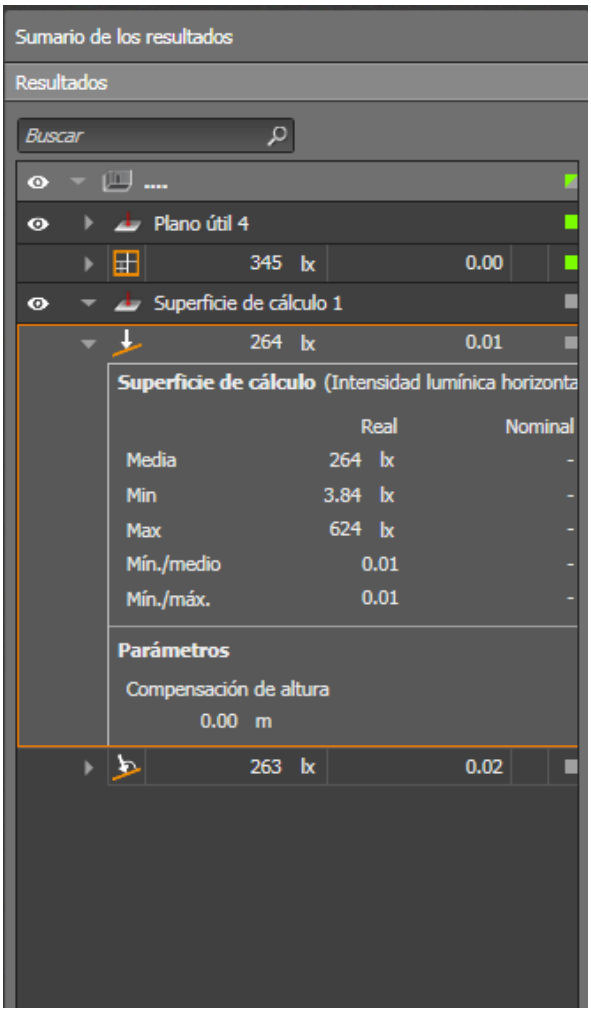



**Il·lustració 9. Panell de control del programa DialuxEvo**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)

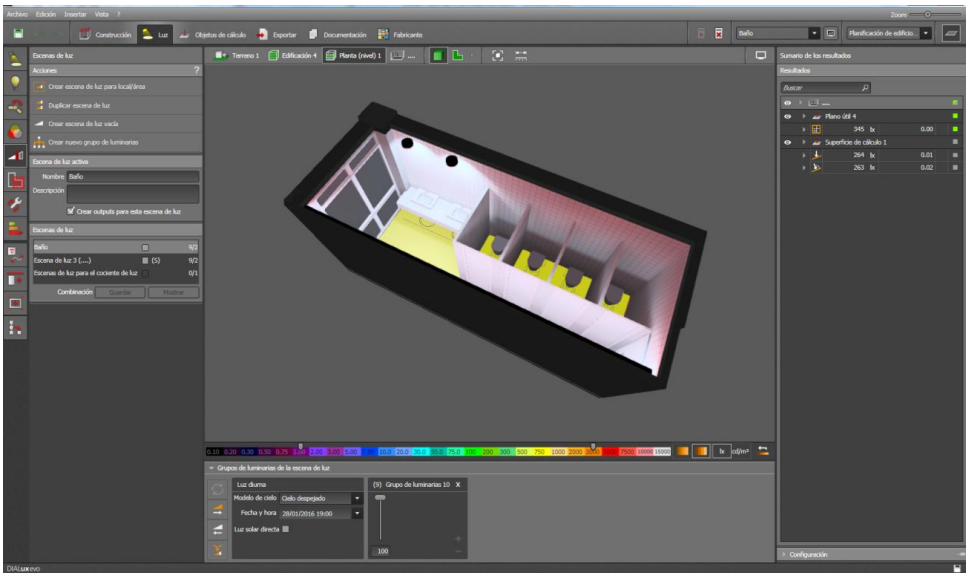
Per realitzar els càlculs, el programa compte amb una funció per efectuar-los, només cal marcar els estats meteorològics, el dia que interessa i l'hora.




**Il·lustració 10. Mostra de la funció per canviar estats meteorològics, dia i hora**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)




**Il·lustració 11. Mostra de resultats obtinguts per DialuxEvo**
Font: elaboració pròpia (DialuxEvo)



**Il·lustració 12. Visualització dels resultats obtinguts pel programa**
Font: elaboració pròpia (Dialux evo)

# 2 Demostració angles heliòstat

Per tal de trobar l'angle òptim de l'heliòstat, ha extret la demostració del treball "Seguidor solar ligero para cubiertas" de Cecilia Pintos Lanzuela.

En primer lloc fa falta saber una sèrie de paràmetres i són els següents: la latitud, la longitud, l'angle horari, l'angle anual i l'angle dels tròpics.

Angle horari: és l'angle corresponent a l'hora UTC, i és l'angle descrit pel Sol al llarg de la circumferència que descriu cada dia, des d'una determinada referència. És a dir, per un a període de 24 hores, correspon un angle de 360º.

Angle anual: aquest angle s'obté multiplicant el número de dies que han passat des de l'últim solstici d'hivern per 360º i dividint-ho pel número de dies que té un any, s'ha de tenir en compte si és de traspàs (366 dies) o no (365 dies).

El que indica és una mesura aproximada de la posició de la Terra en la seva òrbita al voltant del Sol.

Angle dels tròpics: fa referència a la latitud dels tròpics en valor absolut, sent 23º5' Nord.

El següent pas és determinar la posició del Sol. El vector de la posició del Sol es representa amb coordenades unitàries en direcció al Sol respecte l'Est, el Sud i l'alçada, en un punt de la superfície solar en un moment genèric.

δ: angle horari, β: longitud, α: latitud, ϕ: angle dels tròpics, γ: angle anual

$$\bar{v} = [v_{est}, v_{sud}, v_z]$$

$$v_{est} = \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta - \beta)$$

$$v_{sud} = -\sin(\varphi) \cdot \cos(\alpha) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\delta - \beta)$$

$$v_z = \sin(\varphi) \cdot \sin(\alpha) - \cos(\varphi) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\delta - \beta)$$

Sent $\varphi$: $\sin(\varphi) = \sin(\phi) \cdot -\cos(\gamma)$. Aquest angle representa la inclinació dels rajos solars respecte la perpendicular a l'Equador en un moment de l'any.

El tercer pas és determinar els angles representatius de la posició del Sol que ja han estat explicats a la pàgina 41 de la Memòria. Per tal de no barrejar tant els angles, en aquesta explicació per fer referència a l'angle azimutal solar es farà servir $\Theta_H$ i per l'angle d'alçada solar $\Theta_V$.

Per tal de calcular aquests angles per una posició solar qualsevol es fa mitjançant el vector posició del Sol:

$$\Theta_H = \arctan\left(\frac{v_{est}}{v_{nord}}\right) = \arctan\left(\frac{v_{est}}{-v_{sud}}\right) =$$

$$= \arctan\left(\frac{\cos(\varphi)\cdot\sin(\delta-\beta)}{\sin(\varphi)\cdot\cos(\alpha)+\cos(\varphi)\cdot\sin(\alpha)\cdot\cos(\delta-\beta)}\right) =$$

$$= arc\ cotan\left(\frac{\sin(\varphi)\cdot\cos(\alpha)+\cos(\varphi)\cdot\sin(\alpha)\cdot\cos(\delta-\beta)}{\cos(\varphi)\cdot\sin(\delta-\beta)}\right)$$

$$\Theta_H = \boldsymbol{arc\ cotan}\left(\mathbf{tan}(\boldsymbol{\varphi})\cdot\frac{\mathbf{cos}(\boldsymbol{\alpha})}{\mathbf{sin}(\boldsymbol{\delta}-\boldsymbol{\beta})} + \mathbf{sin}(\boldsymbol{\alpha}\right)\cdot\mathbf{cotan}\ (\boldsymbol{\delta}-\boldsymbol{\beta}))$$

$$\Theta_V = \boldsymbol{arcsen}\ (\boldsymbol{v_z}) = \mathbf{arcsin}\ (\mathbf{sin}(\boldsymbol{\varphi})\cdot\mathbf{sin}(\boldsymbol{\alpha}) - \mathbf{cos}(\boldsymbol{\varphi})\cdot\mathbf{cos}\ (\boldsymbol{\alpha})\cdot\mathbf{cos}\ (\boldsymbol{\delta}-\boldsymbol{\beta}))$$

El següent pas és calcular el vector normal de l'heliòstat. Com es pot veure al *Diagrama 5*, l'heliòstat està representat de forma plana i vist de costat, també es pot veure un vector *n* que representa la normal a l'heliòstat i ha de ser el més perpendicular possible als rajos solars per tal de que la radiació sigui màxima. També es pot veure un angle *i* que fa referència a l'angle d'inclinació de l'heliòstat.

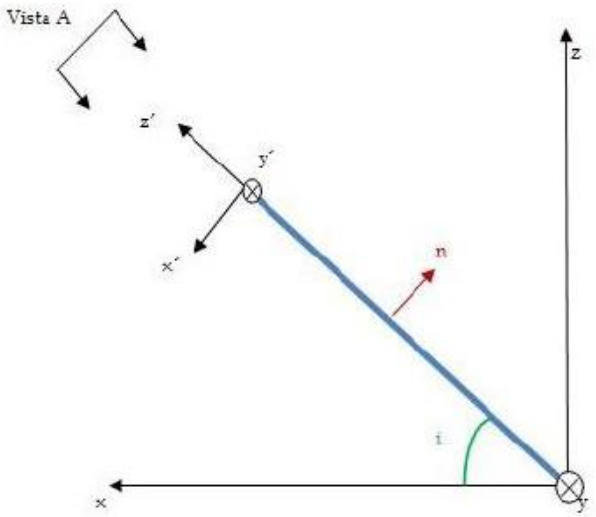



**Diagrama 1. Heliòstat i vector normal**
Font: docplayer

Per tal de realitzar els càlculs s'ha escollit un sistema de coordenades x'y'z' que té relació amb el sistema xyz:

$$x = (\sin(i)\,;0;\cos(i) \bullet (x';y';z')$$

$$y = (0;1;0) \bullet (x';y';z')$$

$$z = (-\cos(i)\,;\ 0;\sin(i)) \bullet (x';y';z')$$

Per tal de trobar el vector normal, també és necessari tenir en compte un angle de gir *r*, com es pot veure el *Diagrama 6*.

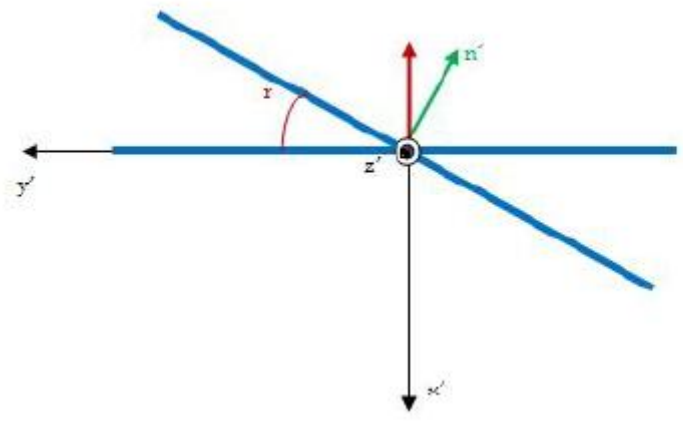



**Diagrama 2. Heliòstat amb un angle de gir r**
Font: docplayer

Primer s'obté el vector *n* en coordenades x'y'z' quan aquest està girant r graus:

$$n' = (-\cos(r)\,;-\sin(r)\,;0)$$

Ara es passa a expressar el vector *n* en coordenades xyz:

$$n = \begin{pmatrix} \sin(i) & 0 & -\cos\,(i) \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\,(i) & 0 & \sin\,(i) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\cos\,(r) \\ -\sin\,(r) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(r)\cdot\sin\,(i) \\ -\sin\,(r) \\ \cos(r)\cdot\cos\,(i) \end{pmatrix}$$

A continuació es calcularà la direcció dels rajos solars. Per tal de trobar aquesta direcció és necessari definir un vector *s* que està referit en coordenades xyx que representa la direcció que es vol. Aquest vector és la projecció del vector unitari de posició solar sobre el pla xy.

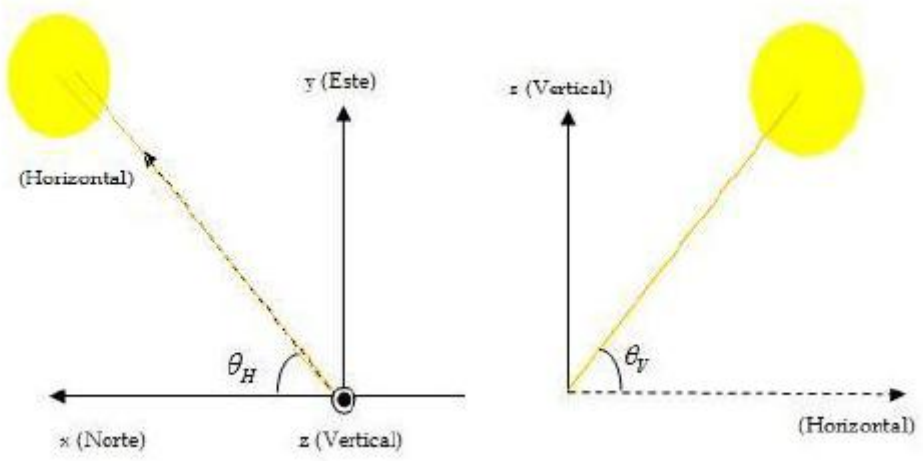



**Diagrama 3. Direcció dels rajos solars**
Font: docplayer

El vector *s* que representa la direcció dels rajos del Sol es defineix com:

$$s = (S_x;\ S_y;\ S_z)$$

$$S_x = \cos(\Theta_V) \cdot \cos(\Theta_H)$$

$$S_y = \cos(\Theta_V) \cdot \sin(\Theta_H)$$

$$S_z = \sin(\Theta_V)$$

Per minimitzar l'angle entre els vectors *n* i *s*, ja que el que interessa és fer que siguin el més paral·lels possibles, es maximitza el producte escalar entre ells.

$$\frac{d(s \cdot n)}{dr} = 0$$

$$\frac{d(s \cdot n)}{dr} = \frac{d(-S_x \cdot \cos(r) \cdot \sin(i) - S_y \cdot \sin(r) + S_z \cdot \cos(i) \cdot \cos(r))}{dt}$$

$$S_x \cdot \sin(r) \cdot \sin(i) - S_y \cdot \cos(r) - S_z \cdot \cos(i) \cdot \sin(r) = 0$$

$$\tan(r) = \frac{S_y}{S_x \cdot \sin(i) - S_z \cdot \cos(i)}$$

L'angle de gir òptim de l'heliòstat per qualsevol moment del dia és:

$$r = \arctan\left(\frac{S_y}{S_x \cdot \sin(i) - S_z \cdot \cos(i)}\right)$$

Es pot veure que l'angle de gir depèn de la inclinació de l'heliòstat i de la direcció dels rajos del Sol, de manera que anirà movent-se a mesura que canvi la posició del Sol. Tota aquesta demostració estarà programada al programa que porta el seguidor solar i que enviarà ordres als motors dels eixos.

Per tal de saber en tot moment la posició del Sol també és necessària l'ajuda dels sensors fotoreceptors que estàn incorporats en l'heliòstat i els sensors fotoelèctrics que estan instal·lats a la finestra.

# 3 Càlculs de radiació

A continuació es mostraran els càlculs realitzats per tal de poder modelitzar les noves situacions. Per poder realitzar aquests càlculs, era necessari saber les radiacions totals i difuses que es troben a la Memòria (*Taula 13* i *Taula 14*) i també era necessària saber l'àrea sobre la qual es reflectia la radiació.

## *3.1 Estança 1: Lavabo*

### *3.1.1 Àrea*

$$A = c \cdot c = 2{,}52 \cdot 1{,}9 = 4{,}79\ m^2$$

### *3.1.2 Radiació total*

Gener:

$$\frac{1{,}89\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 4{,}79\ m^2 = 377{,}21W$$

Març:

$$\frac{13{,}95\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 4{,}79\ m^2 = 788{,}35W$$

Maig:

$$\frac{6{,}2\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 4{,}79\ m^2 = 1237{,}42W$$

Setembre:

$$\frac{4{,}2\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 4{,}79\ m^2 = 838{,}25W$$

### *3.1.3 Radiació difusa*

Gener:

$$\frac{0{,}809\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 4{,}79\ m^2 = 161{,}46W$$

Març:

$$\frac{1{,}49\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 4{,}79\ m^2 = 297{,}38W$$

Maig:

$$\frac{2{,}089\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 4{,}79\ m^2 = 416{,}93W$$

Setembre:

$$\frac{1{,}674\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 4{,}79\ m^2 = 334{,}1W$$

## 3.2 Estança 2: Passadissos

### 3.2.1 Passadís segona planta

#### 3.2.1.1 Àrea

$$A = \pi r^2 = \pi \cdot 0{,}8^2 = 2{,}01\ m^2$$

#### 3.2.1.2 Radiació total

Gener:

$$\frac{2{,}01\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 2{,}01\ m^2 = 168{,}34W$$

Març:

$$\frac{4{,}07\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 2{,}01\ m^2 = 340{,}86W$$

Maig:

$$\frac{6{,}32\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 2{,}01\ m^2 = 529{,}3W$$

Setembre:

$$\frac{4{,}32\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 2{,}01\ m^2 = 361{,}8W$$

#### 3.2.1.3 Radiació difusa

Gener:

$$\frac{0{,}861KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 2{,}01\ m^2 = 72{,}11W$$

Març:

$$\frac{1{,}583\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 2{,}01\ m^2 = 132{,}57W$$

Maig:

$$\frac{2{,}222\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 2{,}01\ m^2 = 186{,}1W$$

Setembre:

$$\frac{6{,}4\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 2{,}01\ m^2 = 149{,}075W$$

### *3.2.2 Passadís primera planta*

En aquesta estança, com s'ha comentat a la Memòria, al *subapartat 4.2.2.2.2.( Passadís primera planta),* per poder calcular les radiacions s'ha hagut de seguir un altre procediment ja que la radiació que passa al primer pis no és la radiació solar que hi arriba a la cúpula dels tubs solars, per aquesta raó s'ha hagut de fer servir la formula del nivell d'il·luminació, amb la qual, es pot saber quina serà la radiació, sabent el factor de distribució que hi haurà a la zona que es vol il·luminar.

#### *3.2.2.1 Nivell d'il·luminació*

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4)$$

h: 2,62 m

ϕ: lúmens que hi ha de cada radiació solar en els diferents mesos

Fd: factor de distribució

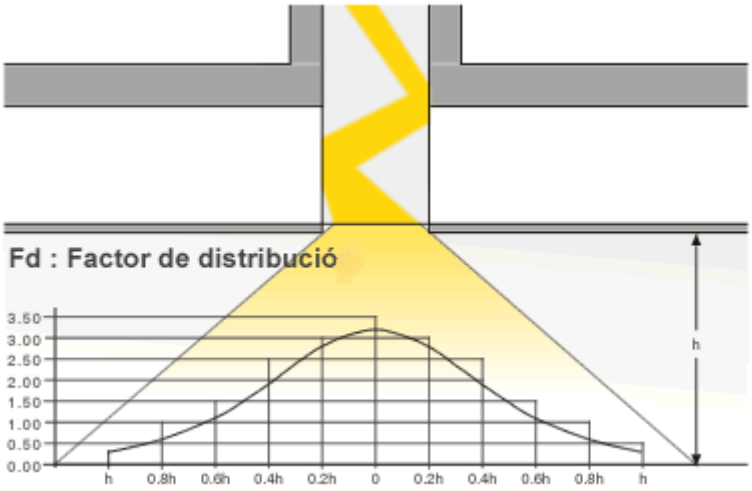



**Diagrama 4. Gràfica de factor de distribució**
Font: espaciosolar.com

Sabent quines són les mides del quadrat lumínic que connecta la primera planta amb la segona i l'alçada del passadís, es pot trobar el factor de distribució. Per tal de tenir un valor més exacte, s'ha realitzat una mitja ponderada.

Les mides del quadrat són de 1,3m per costat i l'alçada del passadís 2,62 m

Fd= 0,2·3,5+0,8·2,85=2,98

#### *3.2.2.2 Radiació total*

Gener:

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4) = \frac{2525{,}1 \cdot 2{,}98}{2{,}62^2} \cdot 0{,}4 = 438{,}48\ lux$$

Març:

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4) = \frac{5112{,}9 \cdot 2{,}98}{2{,}62^2} \cdot 0{,}4 = 887{,}85\ lux$$

Maig:

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4) = \frac{7939{,}5 \cdot 2{,}98}{2{,}62^2} \cdot 0{,}4 = 1378{,}69\ lux$$

Setembre:

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4) = \frac{5427 \cdot 2{,}98}{2{,}62^2} \cdot 0{,}4 = 942{,}4\ lux$$

#### *3.2.2.3 Radiació difusa*

Gener:

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4) = \frac{1081{,}65 \cdot 2{,}98}{2{,}62^2} \cdot 0{,}4 = 187{,}83\ lux$$

Març:

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4) = \frac{1988{,}55 \cdot 2{,}98}{2{,}62^2} \cdot 0{,}4 = 345{,}31\ lux$$

Maig:

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4) = \frac{2791{,}5 \cdot 2{,}98}{2{,}62^2} \cdot 0{,}4 = 484{,}74\ lux$$

Setembre:

$$E = \frac{\phi \cdot Fd}{h^2} \cdot (0{,}4) = \frac{2236{,}125 \cdot 2{,}98}{2{,}62^2} \cdot 0{,}4 = 388{,}302\ lux$$

## 3.3 Estança 3: Aula

### 3.3.1 Àrea

$$A = \pi r^2 = \pi \cdot 0{,}35^2 = 0{,}385\ m^2$$

### 3.3.2 Radiació total

Gener:

$$\frac{2{,}01\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 0{,}385\ m^2 = 32{,}24W$$

Març:

$$\frac{4{,}07\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 0{,}385\ m^2 = 65{,}29W$$

Maig:

$$\frac{6{,}32\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 0{,}385\ m^2 = 101{,}38W$$

Setembre:

$$\frac{4{,}32\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 0{,}385\ m^2 = 69{,}3W$$

### 3.3.3 Radiació difusa

Gener:

$$\frac{0{,}861KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 0{,}385\ m^2 = 13{,}81W$$

Març:

$$\frac{1{,}583\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 0{,}385\ m^2 = 25{,}39W$$

Maig:

$$\frac{2{,}222\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 0{,}385\ m^2 = 35{,}65W$$

Setembre:

$$\frac{6{,}4\ KWh}{m^2\ dia} \cdot \frac{1000Wh}{1KWh} \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} \cdot 0{,}385\ m^2 = 102{,}67W$$