FOTOVOLTAICA, BIOMASA Y COGENERACION

BLOQUE I: Principios de generación y diseño de instalaciones fotovoltaica. Clase I

1.1 Interés de la energía fotovoltaica

1) Utilizan una fuente energética inagotable
2) Generan un vector energético excelente

1.2 Generación de electricidad a partir de la energía solar

Material	Eficiencia de la célula (%)	Eficiencia del sistema (%)	Generación anual (kWh/m^2)
Monocristalinas	17	13.5	85 – 90
Policristalinas	15	15	80 – 85
Capa fina	8	6.5	50 – 60

1.3 Hora solar y hora oficial (I/V)

- Tiempo solar verdadero (TSV)

1.3 Hora solar y hora oficial (II/V)

- La hora solar dependerá del día del año y del meridiano del lugar
- Hora oficial (HO)
- Huso horario de España (7.5º longitud Oeste hasta los 7.5º longitud Este)
- Pasar de temporada de invierno a temporada de verano

1.3 Hora solar y hora oficial (III/V)

$$TSV = HO - \varepsilon + ET + \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda) \qquad (1)$$

donde:

TSV tiempo solar verdadero;

HO hora oficial del país;

ε corrección horaria oficial (1 en invierno y 2 en verano);

ET ecuación de tiempo;

λ_m longitud del huso horario donde está situado el punto; y

λ longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este)

1.3 Hora solar y hora oficial (IV/V)

Tabla 1. Día medio, declinación y educación de tiempo

Mes	Día medio	Declinación en grados sexagesimales	ET medio mensual en minutos
Enero	17	- 20.7	-10
Febrero	15	-12.6	-14
Marzo	16	-1.7	-9
Abril	15	9.8	-1
Mayo	15	18.9	+3
Junio	10	23.0	0
Julio	17	21.2	-5
Agosto	17	13.4	-4
Septiembre	16	2.6	+5
Octubre	16	-8.9	+14
Noviembre	15	-18.5	+15
Diciembre	11	-23.0	-5

$$TSV = HO - \varepsilon + ET + \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda) \qquad (1)$$

donde:

TSV tiempo solar verdadero;

HO hora oficial del país;

ε corrección horaria oficial (1 en invierno y 2 en verano);

ET ecuación de tiempo;

λ_m longitud del huso horario donde está situado el punto; y

λ longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este)

1.3 Hora solar y hora oficial (V/V)

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \sin(B) \qquad (2)$$

donde:

ET ecuación de tiempo

$$B = \left(\frac{360}{364}\right) \cdot (z - 81)$$

z día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$

1.3 Hora solar y hora oficial (Ejemplo numérico 1)

Calcular la hora en tiempo solar verdadero (TSV), en Barcelona, cuando el reloj indica las 4 horas de la tarde, el día 16 de julio.

Las coordenadas geográficas de la ciudad son las siguientes:

41º 23’ N y 2º 11’ E.

1.3 Hora solar y hora oficial (Ejemplo numérico 1; Pistas)

$$TSV = HO - \varepsilon + ET + \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda) \qquad (1)$$

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \sin(B) \qquad (2)$$

donde:

TSV tiempo solar verdadero;

HO hora oficial del país;

ε corrección horaria oficial (1 en invierno y 2 en verano);

ET ecuación de tiempo;

λ_m longitud del huso horario donde está situado el punto;

λ longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este);

B = (360/364)·(z-81);

z día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$

1.3 Hora solar y hora oficial (Ejemplo numérico 1; Pasos I/II)

CÁLCULO DE LA ECUACIÓN DE TIEMPO

Paso 1: Cálculo de z

Paso 2: Cálculo de B; B = (360/364)·(z-81)

Paso 3: Cálculo de ET

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \sin(B) \qquad (2)$$

donde:

z día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$

ET ecuación de tiempo

1.3 Hora solar y hora oficial (Ejemplo numérico 1; Pasos II/II)

CÁLCULO DE LA HORA SOLAR

Paso 4: Cálculo de HO

Paso 5: Cálculo de ε (1 hora en invierno; 2 horas en verano)

Paso 6: Pasar ET de minutos a horas

Paso 7: Calcular $\lambda_m - \lambda$

Paso 8: Cálculo de TSV

$$TSV = HO - \varepsilon + ET + \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda) \qquad (1)$$

donde:

HO	hora oficial del país
ε	corrección horaria oficial (1 hora en invierno y 2 horas en verano)
ET	ecuación de tiempo
λ_m	longitud del huso horario donde está situado el punto (para la mayor parte de España sería 0)
λ	longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este)
	(coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)
TSV	tiempo solar verdadero

1.3 Hora solar y hora oficial (Ejemplo numérico 1; Pasos I/II)

CÁLCULO DE LA ECUACIÓN DE TIEMPO

Paso 1: Cálculo de z

Paso 2: Cálculo de B; B = (360/364)·(z-81)

Paso 3: Cálculo de ET

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \sin(B) \qquad (2)$$

donde:

z día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$

ET ecuación de tiempo

1.3 Hora solar y hora oficial (Ejemplo numérico 1; Solución I/II)

CÁLCULO DE LA ECUACIÓN DE TIEMPO

z = 31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 30 + 16 = 197

B = (360/364)·(z-81) = (360/364)·(197-81) = 114.73º

$$ET = 9.87 \cdot \sin{(2B)} - 7.53 \cdot \cos{(B)} - 1.5 \sin{(B)}$$
$$= 9.87 \cdot \sin{(2 \cdot 114.73º)} - 7.53 \cdot \cos{(114.73º)} - 1.5 \sin{(114.73º)} = -7.501 + 3.075 - 1.362 = -5.788\, min$$

donde:

z día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$

ET ecuación de tiempo

1.3 Hora solar y hora oficial (Ejemplo numérico 1; Pasos II/II)

CÁLCULO DE LA HORA SOLAR

Paso 4: Cálculo de HO

Paso 5: Cálculo de ε (1 hora en invierno; 2 horas en verano)

Paso 6: Pasar ET de minutos a horas

Paso 7: Calcular $\lambda_m - \lambda$

Paso 8: Cálculo de TSV

$$TSV = HO - \varepsilon + ET + \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda) \qquad (1)$$

donde:

HO	hora oficial del país
ε	corrección horaria oficial (1 hora en invierno y 2 horas en verano)
ET	ecuación de tiempo
λ_m	longitud del huso horario donde está situado el punto (para la mayor parte de España sería 0)
λ	longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este)
	(coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)
TSV	tiempo solar verdadero

1.3 Hora solar y hora oficial (Ejemplo numérico 1; Solución II/II)

CÁLCULO DE LA HORA SOLAR

HO = 12 + 4 = 16 h (dato)

$\varepsilon = 2\ h$ [horario de verano (último domingo de marzo a último domingo de octubre)

ET = - 5.788 / 60 = - 0.0965 h

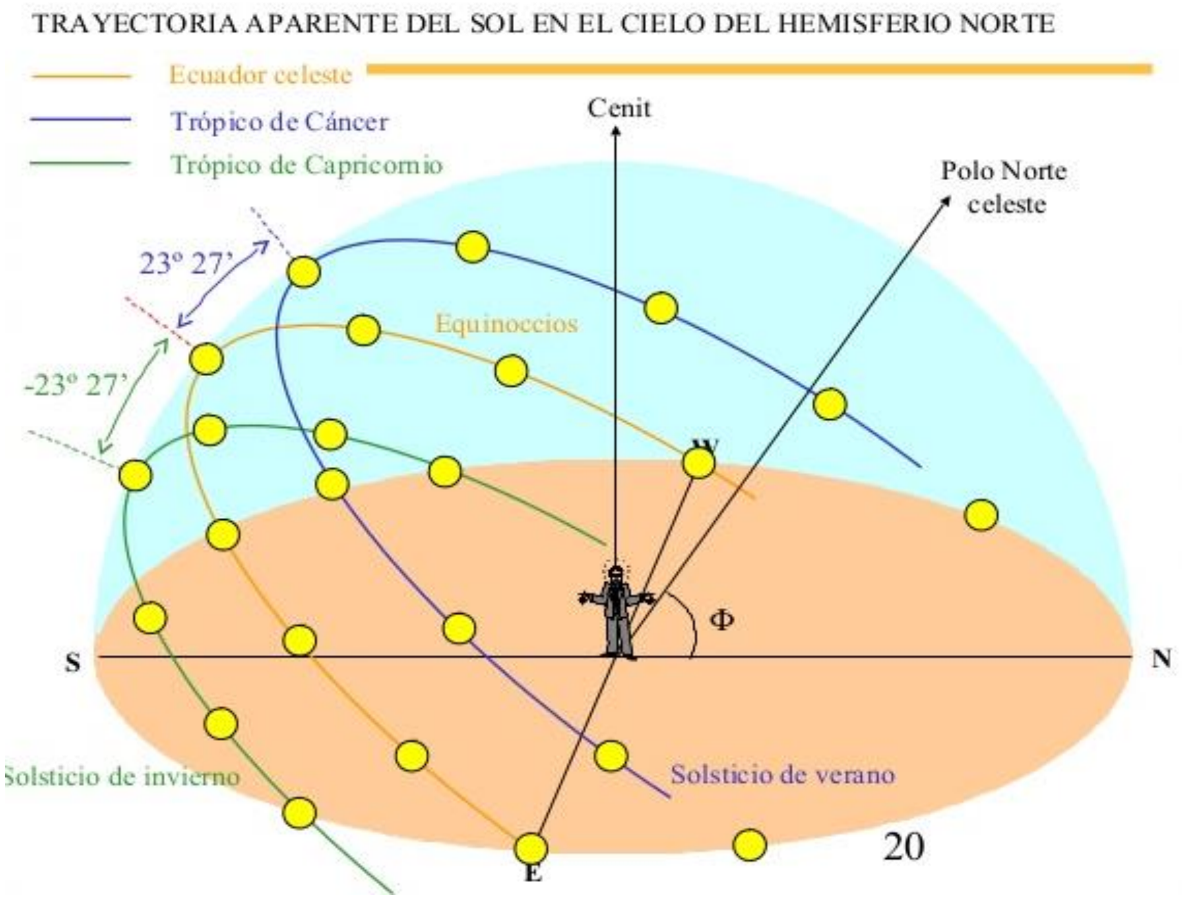
$$\lambda_m - \lambda = 0 - \left[-\left(2 + \frac{11}{60}\right)\right] = +2.18$$

$$TSV = HO - \varepsilon + ET + \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda) = 16 - 2 + (-0.0965) + \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (2.18) = 14.049\ h\ \ (14\ h\ 3\ min) \qquad (1)$$

donde:

HO	hora oficial del país
ε	corrección horaria oficial (1 hora en invierno y 2 horas en verano)
ET	ecuación de tiempo
λ_m	longitud del huso horario donde está situado el punto (para la mayor parte de España sería 0)
λ	longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este)
	(coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)
TSV	tiempo solar verdadero

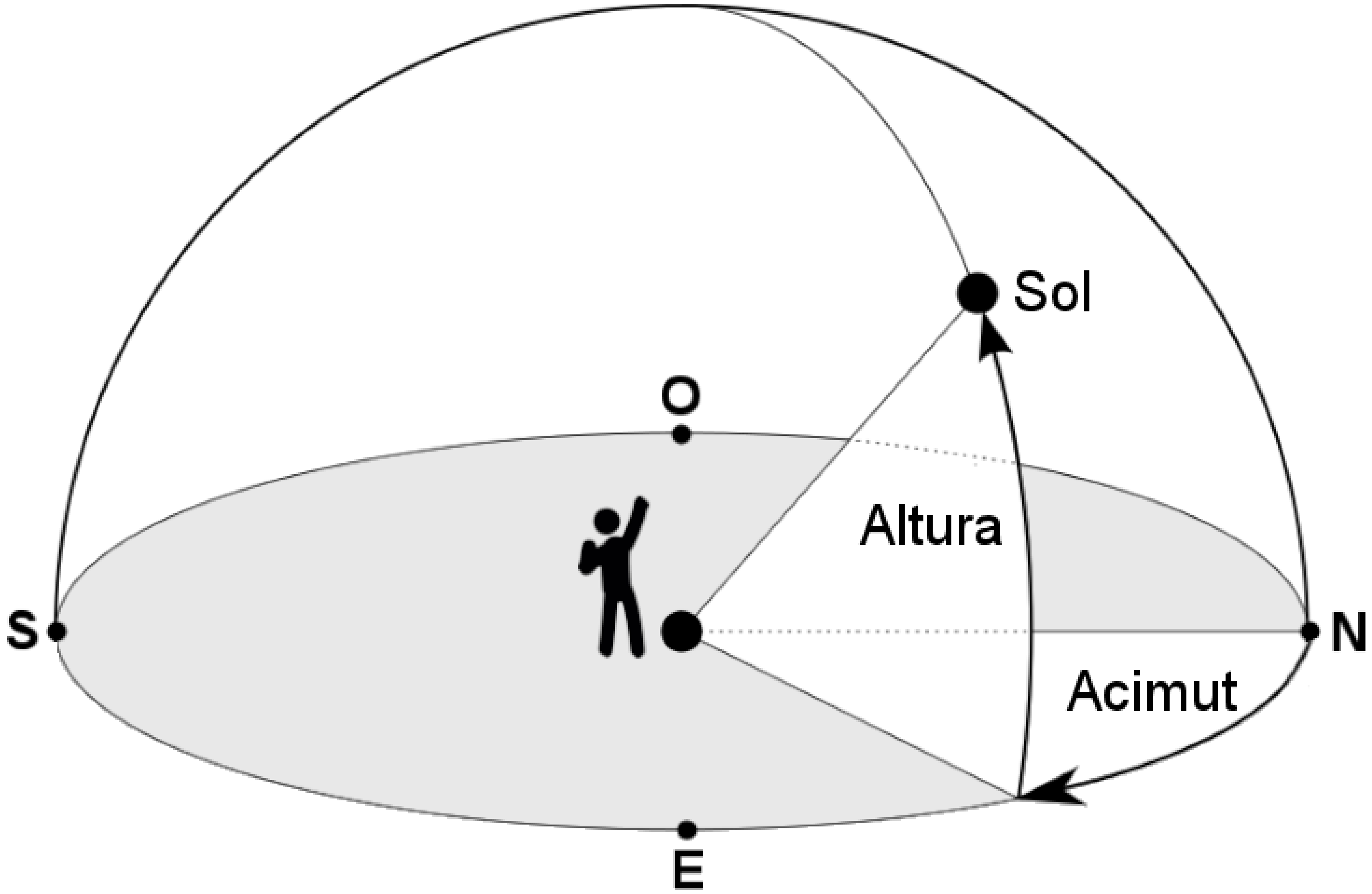
1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (I/IV)



1) Ángulo de incidencia de la radiación solar

2) Sombras proyectadas por los cuerpos vecinos

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (II/IV)



Azimut solar (α_s)

Altitud o altura (β_s)

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (III/IV)

$sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)$ (3)

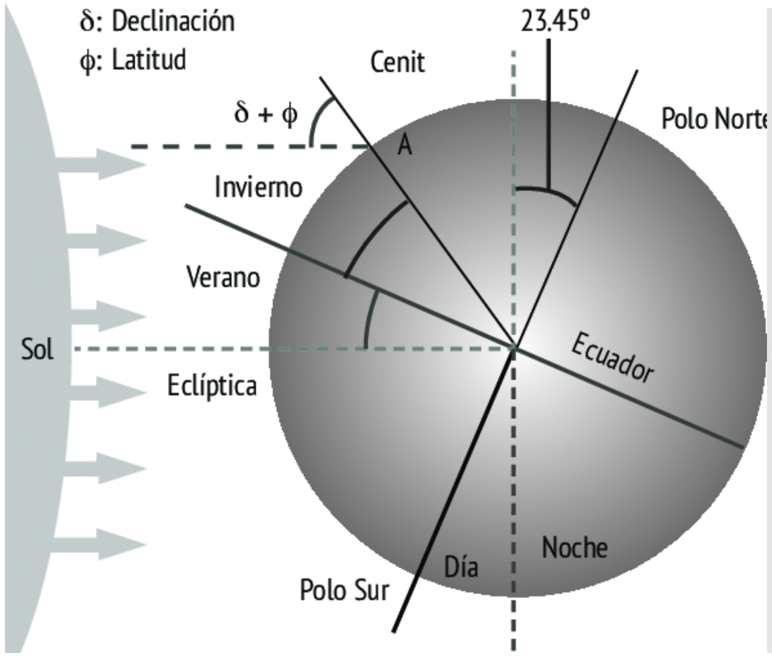
$cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s)$ (4)

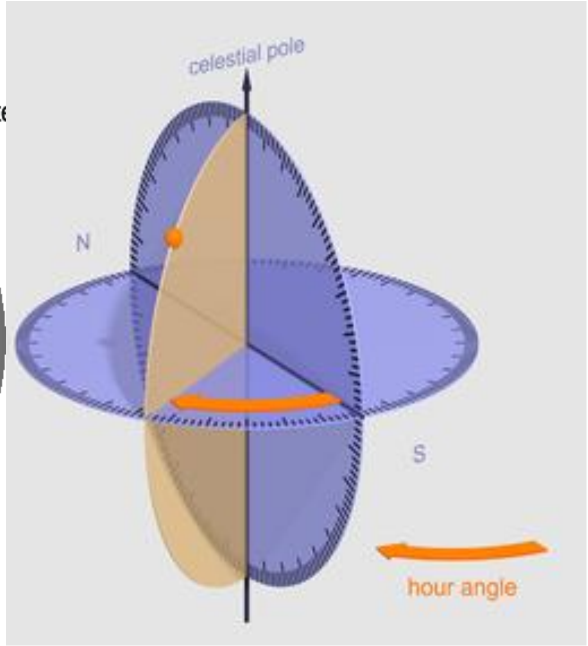
$\delta = 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + z)/365]$ (5) (Ecuación de Cooper)

Cooper, P. I., 1969. The absortion of radiation in solar stills. Solar Energy 12, 333-346.

donde

β_s	altitud solar
α_s	azimut solar
ϕ	latitud del punto P
δ	valor de la declinación
h	= 15 · (12 – TSV) el ángulo horario
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero





1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (IV/IV)

Mes	Día medio	Declinación en grados sexagesimales	ET medio mensual en minutos
Enero	17	- 20.7	-10
Febrero	15	-12.6	-14
Marzo	16	-1.7	-9
Abril	15	9.8	-1
Mayo	15	18.9	+3
Junio	10	23.0	0
Julio	17	21.2	-5
Agosto	17	13.4	-4
Septiembre	16	2.6	+5
Octubre	16	-8.9	+14
Noviembre	15	-18.5	+15
Diciembre	11	-23.0	-5

$$sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \qquad (3)$$

$$h_s = arcos\,[-tg(\phi) \cdot tg(\delta)] \qquad (6)$$

$$TSV_{puesta} = 12 + h/15 \qquad (7)$$
$$TSV_{salida} = 12 - h/15 \qquad (8)$$

donde

β_s	altitud solar
ϕ	latitud del punto P
δ	valor de la declinación
h_s	ángulo horario para la puesta de Sol
TSV_{puesta}	tiempo solar verdadero de puesta del Sol
h	= 15 · (12 – TSV) el ángulo horario;
TSV_{salida}	tiempo solar verdadero de salida del Sol

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2)

Calcular la posición aparente del Sol, en Barcelona, cuando el reloj indica las 4 horas de la tarde, el día 16 de julio. Las coordenadas geográficas de la ciudad son las siguientes: 41º 23’ N y 2º 11’ E

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Pistas)

$sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)$ (3)

$cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s)$ (4)

$\delta = 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + z)/365]$ (5) (Ecuación de Cooper)

Cooper, P. I., 1969. The absortion of radiation in solar stills. Solar Energy 12, 333-346.

$$cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s) = [sin(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) - \cos(\phi) \cdot \sin(\delta)]/cos\,(\beta_s)$$

https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/azimuth-angle

donde

β_s	altitud solar
α_s	azimut solar
ϕ	latitud del punto P
δ	valor de la declinación
h	= 15 · (12 – TSV) el ángulo horario; y
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Pasos)

Paso 1: Cálculo de $\delta = 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + z)/365]$ (5) (Ecuación de Cooper)

Paso 2: Cálculo de ϕ, latitud del punto P; (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

Paso 3: Cálculo de h; h = 15 · (12 – TSV)

Paso 4: Cálculo de $sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)$ (3)

Paso 5: Cálculo de β_s

Paso 6: Cálculo de $cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s)$ (4)

Paso 7: Cálculo de α_s

Donde

δ	valor de la declinación
z	día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero
ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
β_s	altitud solar
α_s	azimut solar

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Pasos)

Paso 1: Cálculo de $\delta = 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + z)/365]$ (5) (Ecuación de Cooper)

Paso 2: Cálculo de ϕ, latitud del punto P; (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

Paso 3: Cálculo de h; h = 15 · (12 – TSV)

Paso 4: Cálculo de $sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)$ (3)

Paso 5: Cálculo de β_s

Paso 6: Cálculo de $cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s)$ (4)

Paso 7: Cálculo de α_s

Donde

δ	valor de la declinación
z	día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero
ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
β_s	altitud solar
α_s	azimut solar

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Solución I/IV)

$$\delta = 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + z)/365] =$$

$$= 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + 197)/365] = 21.354\ º$$

(5) (Ecuación de Cooper)

$$z = 197$$

donde

δ valor de la declinación

z día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Pasos)

Paso 1: Cálculo de $\delta = 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + z)/365]$ (5) (Ecuación de Cooper)

Paso 2: Cálculo de ϕ, latitud del punto P; (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

Paso 3: Cálculo de h; h = 15 · (12 – TSV)

Paso 4: Cálculo de $sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)$ (3)

Paso 5: Cálculo de β_s

Paso 6: Cálculo de $cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s)$ (4)

Paso 7: Cálculo de α_s

Donde

δ	valor de la declinación
z	día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero
ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
β_s	altitud solar
α_s	azimut solar

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Solución II/IV)

2) Cálculo de ϕ

Coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E

$$\phi = 41 + \frac{23}{60} = 41.383\ º$$

3) Cálculo de h

$$h = 15 \cdot (12 - TSV) = 15 \cdot (12 - 14.049) = -30.735$$

donde:

ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Pasos)

Paso 1: Cálculo de $\delta = 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + z)/365]$ (5) (Ecuación de Cooper)

Paso 2: Cálculo de ϕ, latitud del punto P; (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23' N y 2º 11' E)

Paso 3: Cálculo de h; h = 15 · (12 – TSV)

Paso 4: Cálculo de $sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)$ (3)

Paso 5: Cálculo de β_s

Paso 6: Cálculo de $cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s)$ (4)

Paso 7: Cálculo de α_s

Donde

δ	valor de la declinación
z	día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero
ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
β_s	altitud solar
α_s	azimut solar

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Solución III/IV)

4) Cálculo de $sin(\beta_s)$

$$sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) =$$
$$= \sin(41.38) \cdot \sin(21.35) + \cos(41.38) \cdot \cos(21.35) \cdot \cos(-30.74) = 0.2407 + 0.6007 = 0.8414 \qquad (3)$$

5) Cálculo de β_s

$$\beta_s = arsin(0.8414) = 57.28º$$

donde

β_s	altitud solar
ϕ	latitud del punto P
δ	valor de la declinación
h	ángulo horario

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Pasos)

Paso 1: Cálculo de $\delta = 23.45 \cdot sin[360 \cdot (284 + z)/365]$ (5) (Ecuación de Cooper)

Paso 2: Cálculo de ϕ, latitud del punto P; (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

Paso 3: Cálculo de h; h = 15 · (12 – TSV)

Paso 4: Cálculo de $sin(\beta_s) = sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)$ (3)

Paso 5: Cálculo de β_s

Paso 6: Cálculo de $cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s)$ (4)

Paso 7: Cálculo de α_s

Donde

δ	valor de la declinación
z	día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero
ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
β_s	altitud solar
α_s	azimut solar

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 2; Solución IV/IV)

6) Cálculo de $cos(\alpha_s)$ (https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/azimuth-angle)

$$cos(\alpha_s) = cos(\delta) \cdot \sin(h)/cos(\beta_s) = [sin(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) - \cos(\phi) \cdot \sin(\delta)]/cos\,(\beta_s) =$$

$$= \frac{[0.5292 - 0.2732]}{0.5405} = 0.4736 \quad (3)$$

7) Cálculo de α_s

$$\alpha_s = arcos(0.4736) = 61.73º$$

donde

α_s	azimut solar
δ	valor de la declinación
h	ángulo horario
β_s	altitud solar
ϕ	latitud del punto P

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 3)

Calcular la hora de salida del Sol, en Barcelona, el día 16 de julio. Las coordenadas geográficas de la ciudad son las siguientes: 41º 23’N y 2º 11’E.

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 3; Pistas)

$$h_s = arcos\,[-tg(\phi)\cdot tg(\delta)] \qquad (6)$$

$$TSV_{salida} = 12 - h/15 \qquad (8)$$

$$TSV = HO - \varepsilon + ET + \left(\frac{1}{15}\right)\cdot(\lambda_m - \lambda) \qquad (1)$$

donde:

h_s	ángulo horario para la puesta de Sol
ϕ	latitud del punto P
δ	valor de la declinación
TSV_{salida}	tiempo solar verdadero de salida del Sol
h	= 15 · (12 – TSV) el ángulo horario
TSV	tiempo solar verdadero
HO	hora oficial del país
ε	corrección horaria oficial (1 hora en invierno y 2 horas en verano)
ET	ecuación de tiempo (ET = - 0.0965 h, del ejemplo numérico 1)
λ_m	longitud del huso horario donde está situado el punto (para la mayor parte de España sería 0)
λ	longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este) (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 3; Pasos)

Paso 1: Del ejemplo numérico 2, se utiliza la declinación (δ) y la latitud (ϕ)

Paso 2: Cálculo del ángulo horario (h). $h = arcos\ [-tg(\phi) \cdot tg(\delta)]$

Paso 3: Cálculo de la hora de salida del Sol (TSV_{salida}). $TSV_{salida} = 12 - h/15$

Paso 4: A partir de (1), calcular HO. $HO = TSV + \varepsilon - ET - \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda)$

Donde

δ	valor de la declinación
ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
TSV_{salida}	tiempo solar verdadero de salida del Sol
HO	hora oficial del país
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero
ε	corrección horaria oficial (1 hora en invierno y 2 horas en verano)
ET	ecuación de tiempo (ET = - 0.0965 h, del ejemplo numérico 1)
λ_m	longitud del huso horario donde está situado el punto (para la mayor parte de España sería 0)
λ	longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este) (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 3; Pasos)

Paso 1: Del ejemplo numérico 2, se utiliza la declinación (δ) y la latitud (ϕ)

Paso 2: Cálculo del ángulo horario (h). $h = arcos\ [-tg(\phi) \cdot tg(\delta)]$

Paso 3: Cálculo de la hora de salida del Sol (TSV_{salida}). $TSV_{salida} = 12 - h/15$

Paso 4: A partir de (1), calcular HO. $HO = TSV + \varepsilon - ET - \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda)$

Donde

δ	valor de la declinación
ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
TSV_{salida}	tiempo solar verdadero de salida del Sol
HO	hora oficial del país
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero
ε	corrección horaria oficial (1 hora en invierno y 2 horas en verano)
ET	ecuación de tiempo (ET = - 0.0965 h, del ejemplo numérico 1)
λ_m	longitud del huso horario donde está situado el punto (para la mayor parte de España sería 0)
λ	longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este) (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 3; Solución I/II)

$$\delta = 21.354 \text{ º}$$
$$\phi = 41.383 \text{ º}$$

$$h = arcos\,[-tg(\phi) \cdot tg(\delta)] = arcos[-tg(41.383) \cdot tg(21.354)] = arcos[-0.3445] = 110.15 \text{ º}$$

$$TSV_{salida} = 12 - \frac{h}{15} = 12 - \frac{110.15}{15} = 4.6566\ horas$$

donde:

δ	valor de la declinación
ϕ	latitud del punto P
h	= 15 · (12 – TSV) el ángulo horario
TSV	tiempo solar verdadero
TSV_{salida}	tiempo solar verdadero de salida del Sol

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 3; Pasos)

Paso 1: Del ejemplo numérico 2, se utiliza la declinación (δ) y la latitud (ϕ)

Paso 2: Cálculo del ángulo horario (h). $h = arcos\,[-tg(\phi) \cdot tg(\delta)]$

Paso 3: Cálculo de la hora de salida del Sol (TSV_{salida}). $TSV_{salida} = 12 - h/15$

Paso 4: A partir de (1), calcular HO. $HO = TSV + \varepsilon - ET - \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda)$

Donde

δ	valor de la declinación
ϕ	latitud del punto P
h	ángulo horario
TSV_{salida}	tiempo solar verdadero de salida del Sol
HO	hora oficial del país
TSV	hora del día en tiempo solar verdadero
ε	corrección horaria oficial (1 hora en invierno y 2 horas en verano)
ET	ecuación de tiempo (ET = - 0.0965 h, del ejemplo numérico 1)
λ_m	longitud del huso horario donde está situado el punto (para la mayor parte de España sería 0)
λ	longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este) (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

1.4 Movimiento relativo del Sol respecto un punto de la superficie terrestre (Ejemplo numérico 3; Solución II/II)

$$HO = TSV + \varepsilon - ET - \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (\lambda_m - \lambda) = 4.6566 + 2 - (-0.0965) - \left(\frac{1}{15}\right) \cdot (2.18) = 6.8984\ h$$
$$= 6\ h\ 54\ min$$

donde

HO hora oficial del país

TSV hora del día en tiempo solar verdadero ($4.6566\ horas$)

ε corrección horaria oficial (1 hora en invierno y 2 horas en verano)

ET ecuación de tiempo (ET = - 0.0965 h, del ejemplo numérico 1)

λ_m longitud del huso horario donde está situado el punto (para la mayor parte de España sería 0)

λ longitud del punto (positivo hacia el oeste y negativo hacia el este) (coordenadas geográficas de Barcelona: 41º 23’ N y 2º 11’ E)

1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.1 Constante solar (I/III)

- El Sol como foco emisor puntual
- La irradiancia y la ley del cuadrado inverso de la distancia (https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_la_inversa_del_cuadrado)
- La constante solar [= energía radiante total, por metro cuadrado y segundo, que incide sobre una superficie perpendicular al Sol y situada en el exterior de la atmósfera (extraterrestre)]
- $I_{cs} = 1353 \frac{W}{m^2}$

donde

I_{cs} constante solar en W/m^2

1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.1 Constante solar (II/III)

$$I_n = f_z \cdot I_{cs} \qquad (9)$$

donde

I_n	irradiancia extraterrestre para el día n, en W/m^2;
f_z	$1 + 0.033 \cdot \cos\left(360\frac{z}{365}\right)$;
I_{cs}	constante solar en W/m^2; y
z	día del año, de forma tal que para el 1 de enero $z = 1$ y para el 31 de diciembre $z = 365$

1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.1 Constante solar (III/III)

Distribución del espectro de radiación solar extraterrestre

Longitud de onda de la banda (μm)	< 0.38 **(ultravioleta)**	**0.38 ÷ 0.78 (espectro visible)**	**> 0.78 (infrarrojo)**
Porcentaje de energía de la banda	7 %	47.3 %	45.7 %
Potencia de la banda (W/m^2)	94.7	639.8	618.4

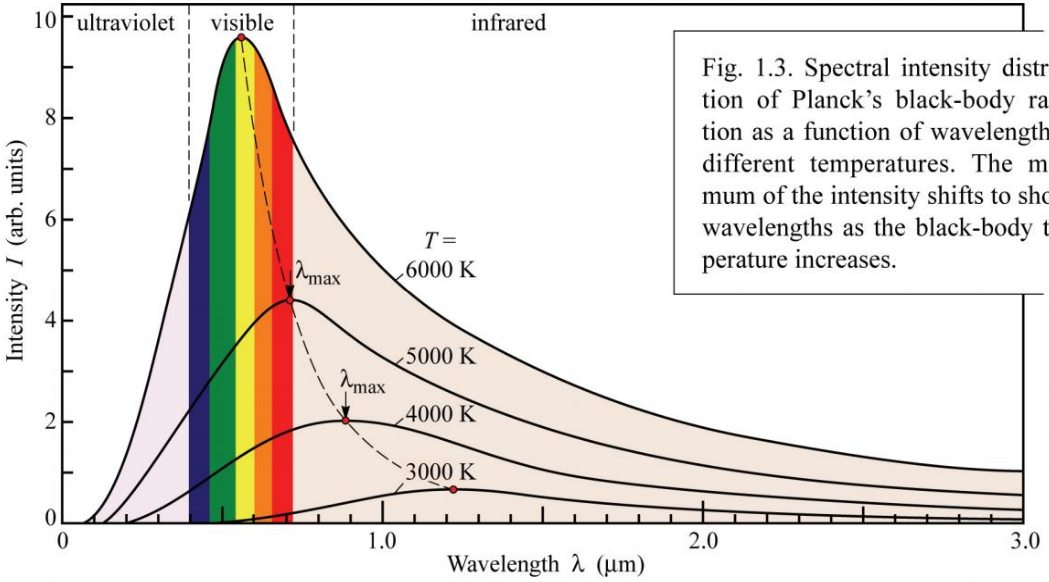


Fig. 1.3. Spectral intensity distribution of Planck's black-body radiation as a function of wavelength for different temperatures. The maximum of the intensity shifts to shorter wavelengths as the black-body temperature increases.

http://nadirpoint.de/Physik_Lit_PDF/65.pdf

1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.2 Tablas de irradiación (I/II)

$$I = I_n \cdot \cos(\gamma) \quad (10)$$ (SI NO HUBIERA ATMÓSFERA)

IRRADIACIÓN = Energía que incide sobre una superficie de un metro cuadrado durante un intervalo de tiempo determinado

$$G = \int I_n \cdot cos(\gamma)\, dt$$ (VALOR FUERA DE LA ATMÓSFERA)

CÁLCULO DE LA ENERGÍA
1) ángulo de incidencia de la radiación solar al penetrar en la atmósfera
2) la masa de aire atravesada
3) transferencia de la atmósfera

donde

I	radiación incidente sobre una superficie orientada, de 1 m^2 de área, en W/m^2;
I_n	irradiancia extraterrestre para el día n, en W/m^2;
γ	ángulo de incidencia
G	irradiación en $kWh/(m^2 \cdot día)$ o en $MJ/(m^2 \cdot día)$

1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.2 Tablas de irradiación (II/II)

Efecto de la altitud sobre el mar

Altitud sobre el nivel del mar (m)	0	900	1500	2250	3000
Irradiancia (W/m^2)	950	1050	1100	1150	1190

Efecto del aspecto del cielo

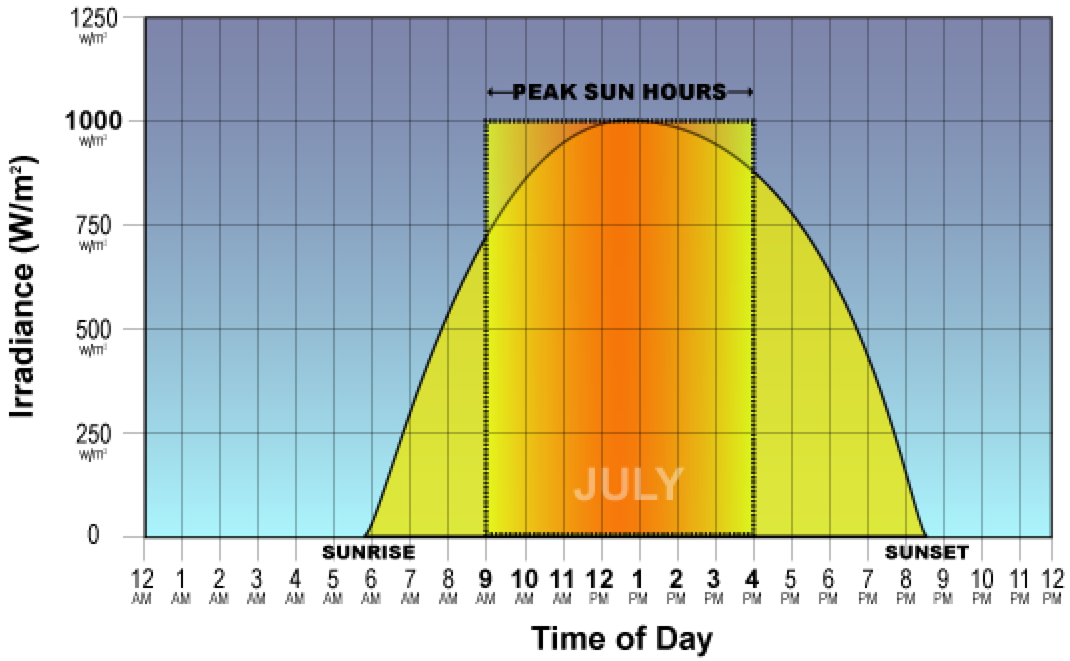
Aspecto del cielo	Irradiancia (W/m^2)	% radiación difusa
Despejado	750 – 1000	10 – 20
Parcialmente nublado	200 – 500	20 – 90

1) Agencia espacial norteamericana, NASA https://power.larc.nasa.gov/
2) Agencia europea Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/
3) Satel-light (http://www.satel-light.com/core.htm)

1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.3 Número de horas solares pico equivalentes (I/II)

La potencia pico de un panel fotovoltaico se define como la que suministra cuando la irradiancia incidente es de 1000 W/m^2

Número de horas durante las cuales deberá incidir este flujo de energía para que fuera igual a la energía total incidente a lo largo del día.



1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.3 Número de horas solares pico equivalentes (II/II)

Si G se mide en $\frac{kWh}{m^2 día} \rightarrow HSP = G$

Si G se mide en $\frac{Wh}{m^2 día} \rightarrow HSP = \frac{G}{1000}$

Si G se mide en $\frac{MJ}{m^2 día} \rightarrow HSP = G/3.6$

$$E_d = S \cdot HSP \cdot \eta \qquad (14)$$

donde:

G	energía incidente, durante todo el día, sobre 1 m^2 de superficie en $\frac{kWh}{m^2 día}$, $\frac{Wh}{m^2 día}$ ó $\frac{MJ}{m^2 día}$
HSP	horas solares pico equivalentes
E_d	energía diaria en kWh
S	superficie de módulos en m^2
η	rendimiento neto de la instalación en tanto por uno

1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.4 Orientación óptima de una superficie (I/II)

- El máximo de radiación interceptada por una superficie se consigue cuando ésta es normal a la radiación solar
- Si la superficie captadora no sigue la posición del Sol, para cada mes habrá una orientación óptima
- Para el hemisferio Norte, la dirección óptima es la dirección Sur (azimut de la superficie $\alpha = 0$)

1.5 Radiación solar sobre una superficie
1.5.4 Orientación óptima de una superficie (II/II)

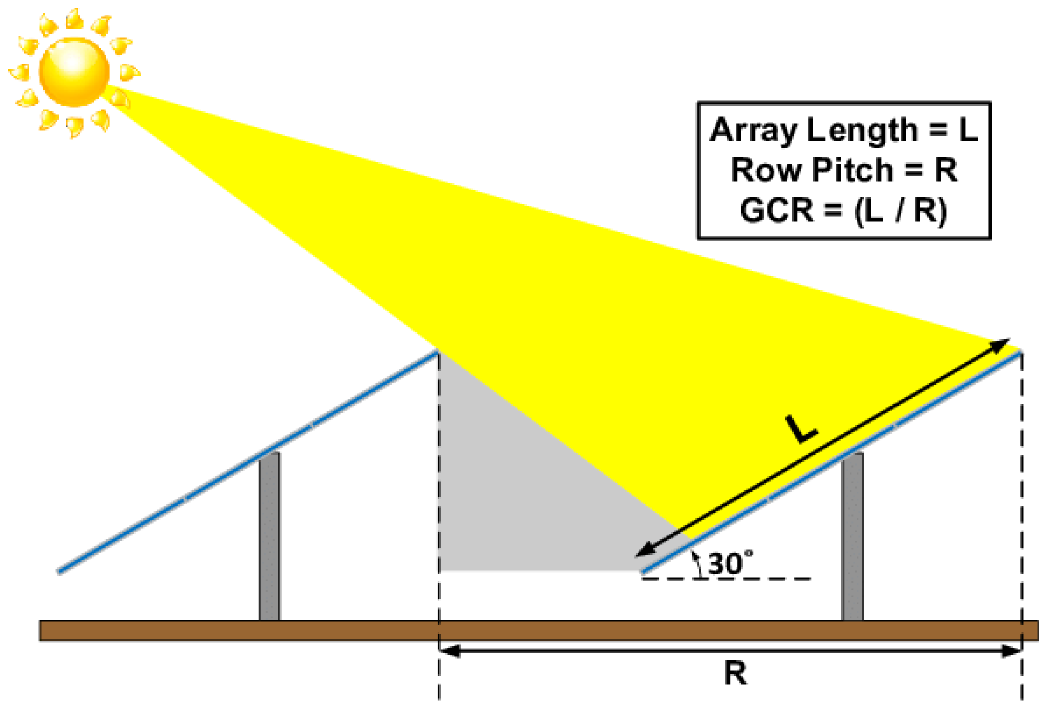
- Práctica habitual inclinación del lugar menos 5º
- Si la demanda es mayor en invierno, latitud del lugar más 10º

Ciudad	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	med
Santander	63	54	44	27	15	10	14	23	39	51	60	64	35
Barcelona	64	55	43	27	16	8	11	23	38	51	61	66	35
Málaga	61	52	39	23	9	2	7	18	34	48	57	62	32

Inclinación óptima mensual y media anual, en grados sexagesimales.
Latitud: Santander 43º 28’, Barcelona 41º 28’ y Málaga 36º 41’
Fuente: PVGIS

1.6 Sombra de un obstáculo sobre un plano
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (I/IV)

- Sombra que proyecta una fila de paneles sobre la fila situada inmediatamente detrás



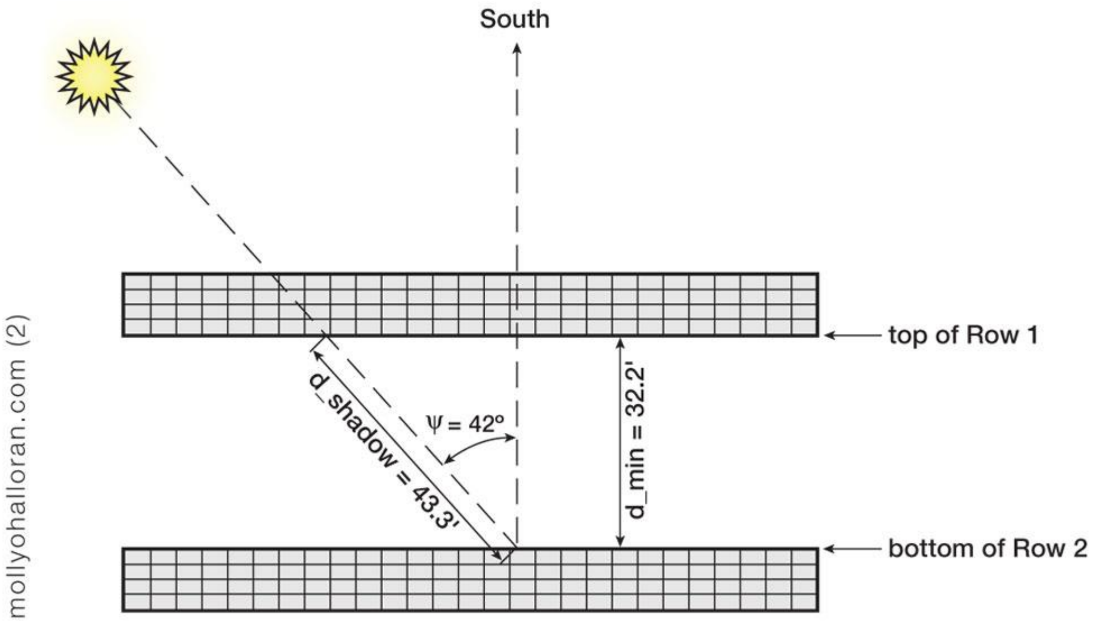
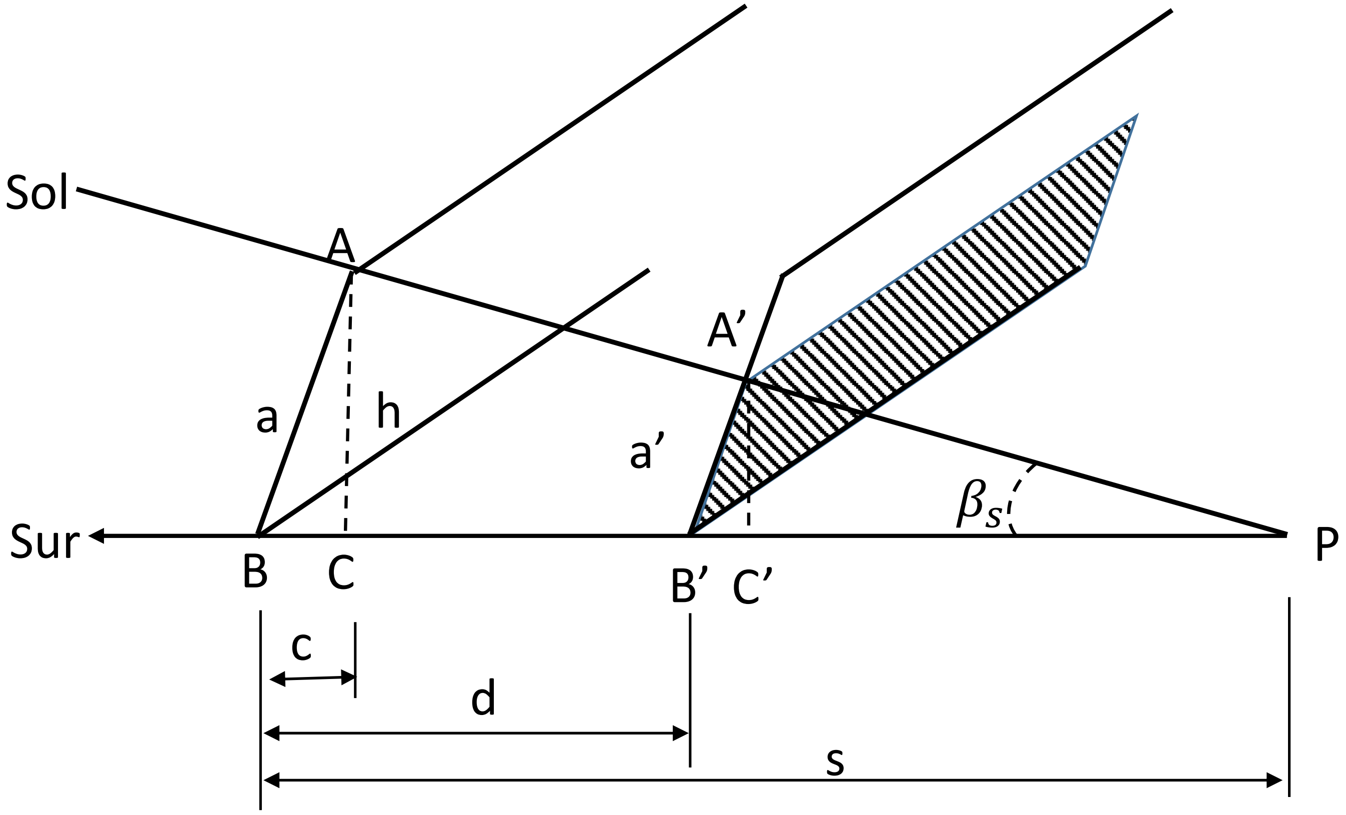


Illustration 3 Plan view at 9am.

1.6 Sombra de un obstáculo sobre un plano
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (II/IV)



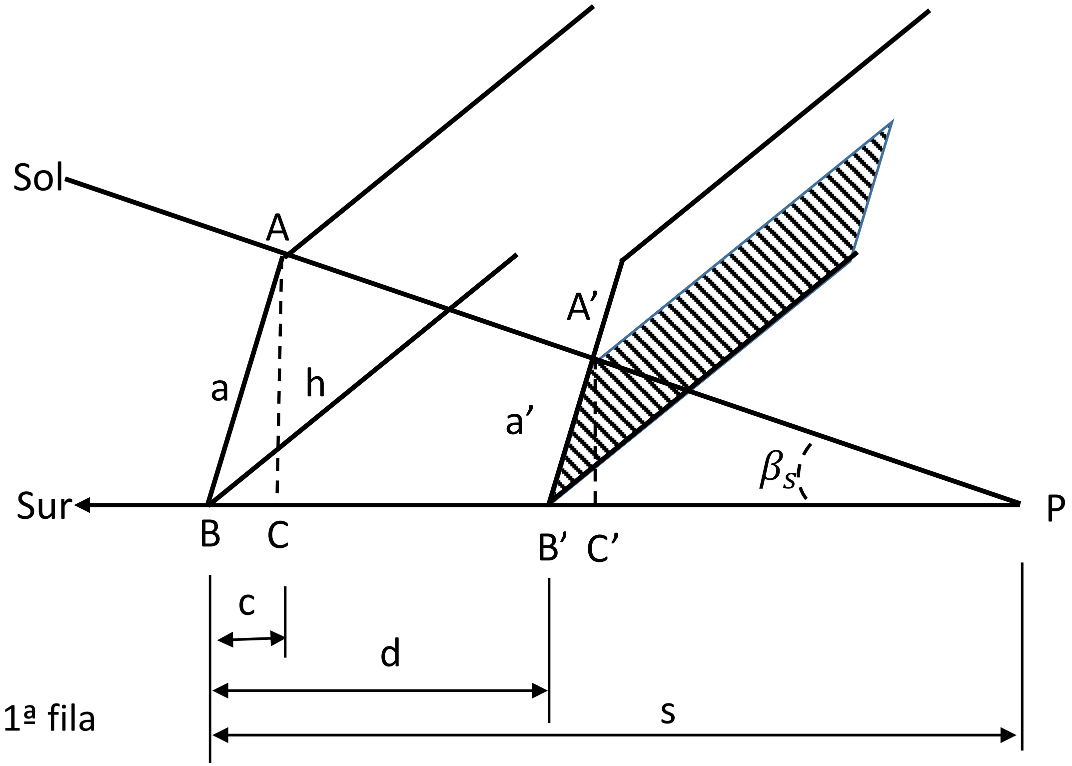
1.6 Sombra de un obstáculo sobre un plano
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (III/IV)

$h = a \cdot sin(\beta)$ (17)

$c = a \cdot cos(\beta)$ (18)

$s = a \cdot [cos(\beta) + sin(\beta)/tan(\beta_s)]$ (19)

$a' = a \cdot (1 - d/s)$ (20)



donde:

h (= A – C) altura de la fila de paneles (en m)

a (= A – B) altura del panel (en m)

β inclinación de la fila de paneles respecto del plano horizontal

c (= B – C) ancho de la base de la fila de paneles

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila

β_s (=) altura del Sol sobre el horizonte

a' (= A’ – B’) altura de la sombra medida sobre el plano de la 2ª fila de paneles

d (= B –B’) separación entre las dos filas

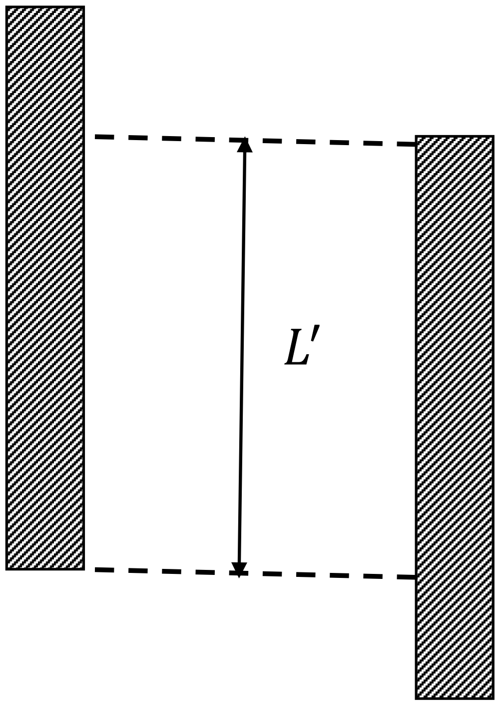
1.6 Sombra de un obstáculo sobre un plano
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (IV/IV)

$$A_s = a' \cdot L' \tag{21}$$

$$F_s = (a'/a) \cdot (L'/a) \tag{22}$$

donde

A_s	área de la sombra (en m^2)
a'	altura de la sombra (en m)
L'	longitud a la que se solapan ambas filas (en m)
F_s	factor de sombra de la fila (en %)
a	altura del panel (en m)
L	longitud de la fila que está en sombra (en m)



1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3)

Se instalan unos paneles formando filas inclinadas 40º sobre el plano horizontal, los paneles miden 2 m de alto por 1 m de ancho y la separación entre filas es 3 m.

Se desea calcular la altura respecto al suelo del punto más elevado de las filas y averiguar si una fila proyectará sombra sobre la fila siguiente si el ángulo que mide la altura del Sol sobre el horizonte vale 25º.

Si existe sombra de una fila sobre la siguiente, calcular la altura de la sombra, medida sobre el panel y el factor de sombra si ambas filas son iguales, de 10 m de longitud, pero la segunda está desplazada 2 m hacia el Oeste.

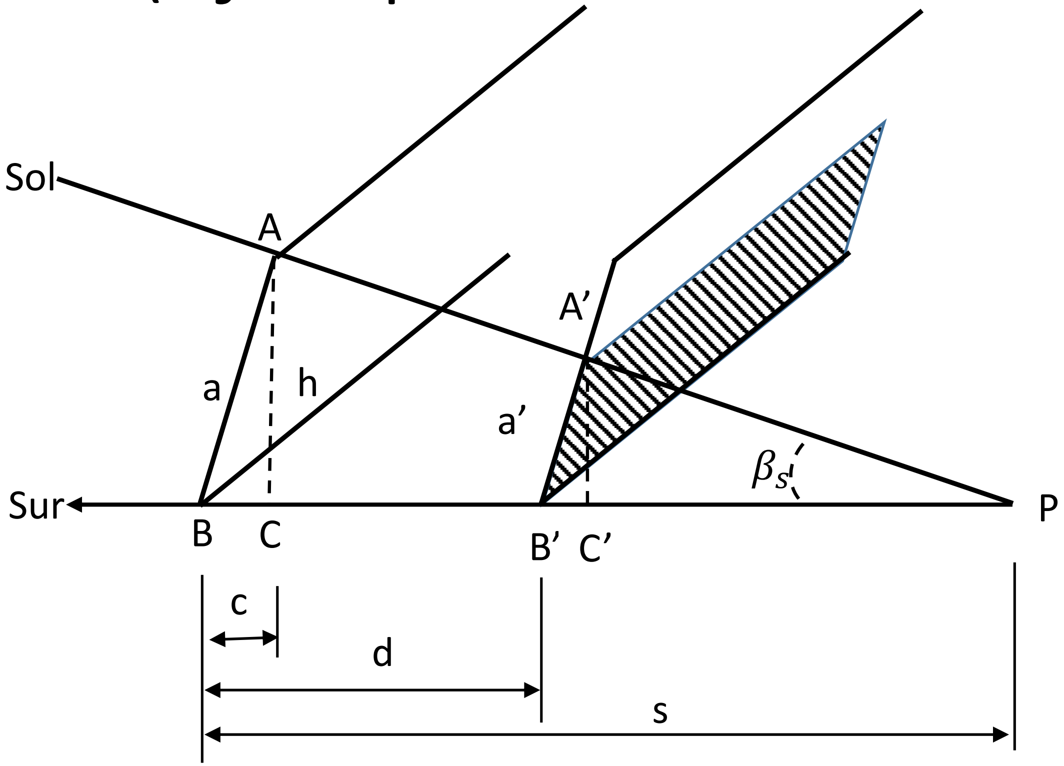
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Pasos I/III)

1) Cálculo del punto más elevado de las filas

$$h = a \cdot sin(\beta) \quad (17)$$

2) Cálculo de la longitud de la sombra

$$s = a \cdot [cos(\beta) + sin(\beta)/tg(\beta_s)]$$



donde

h (= A – C) altura de la fila de paneles (en m)

a (= A – B) altura del panel (en m)

β inclinación de la fila de paneles respecto del plano horizontal

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila

β_s (=) altura del Sol sobre el horizonte

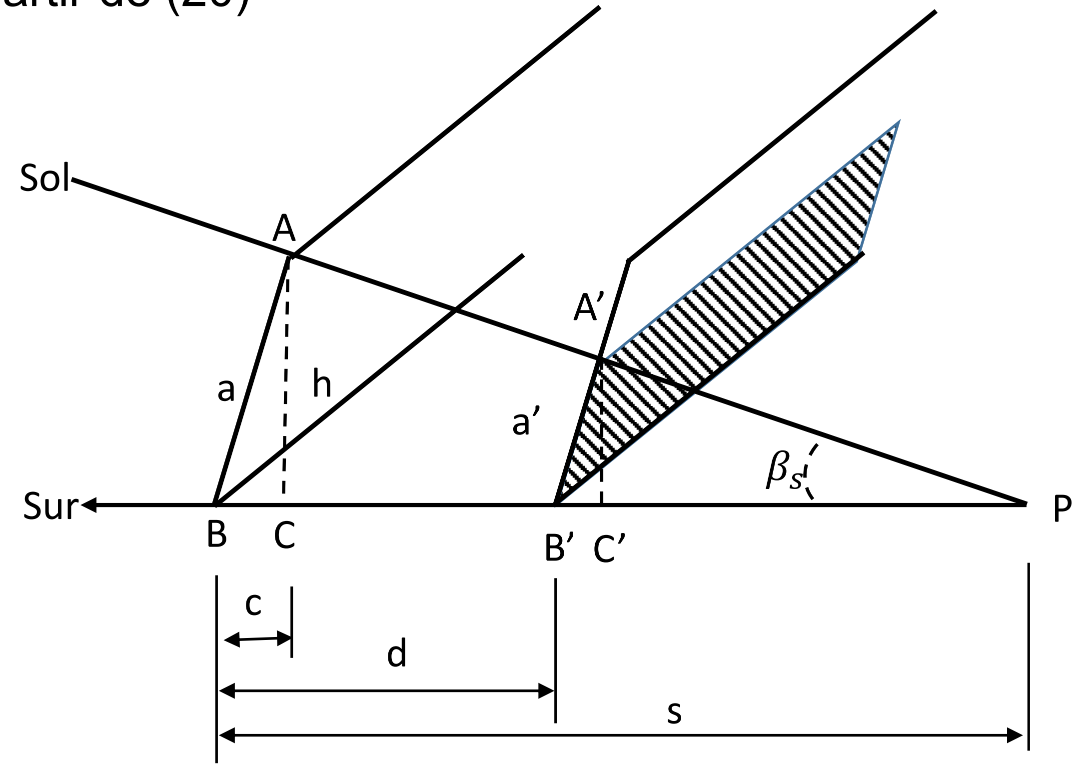
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Pasos II/III)

3) En caso de que la separación entre las filas (d) sea menor que la longitud de la sombra (s), calcular la altura de la sombra (a') a partir de (20)

$$a' = a \cdot (1 - d/s) \qquad (20)$$

4) Cálculo de la longitud de solapamiento entre filas

$$L' = LF - DSF$$



donde

a' (= A' – B') altura de la sombra medida sobre el plano de la 2ª fila de paneles

a (= A – B) altura del panel (en m)

d (= B –B') separación entre las dos filas

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila

L' longitud de solapamiento entre filas (en m)

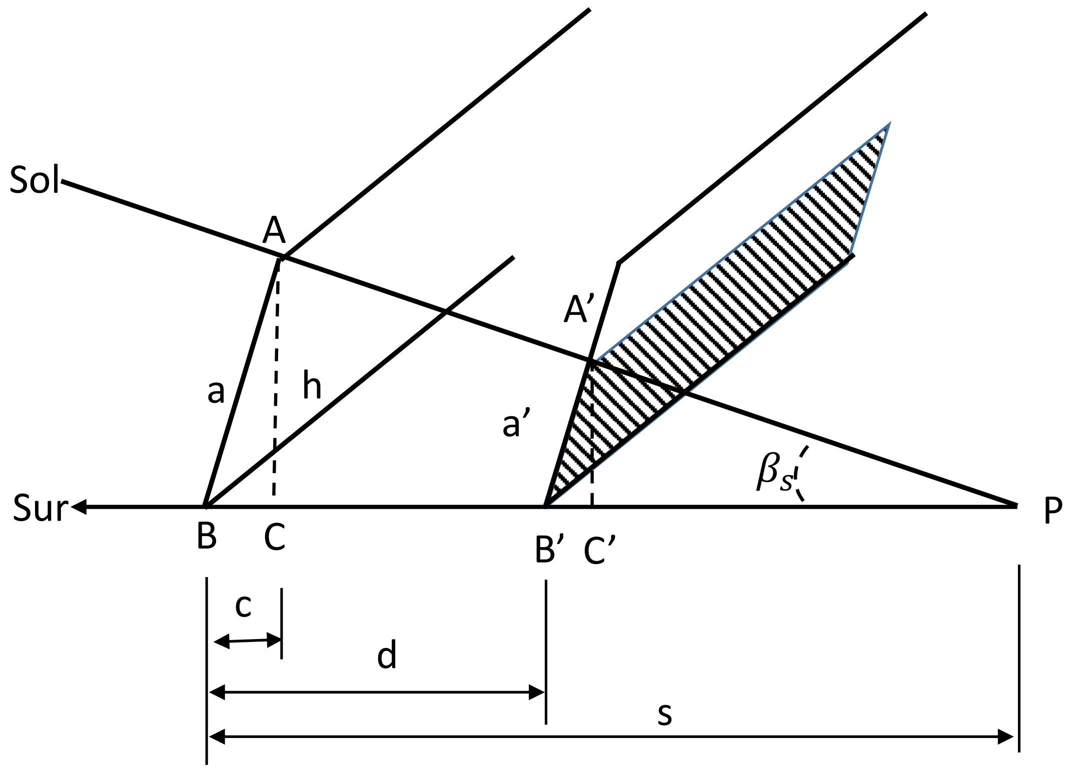
LF longitud de la fila (en m)

DSF desplazamiento de una fila con respecto a la anterior (en m)

1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Pasos III/III)

5) Cálculo del factor de sombra

$$F_s = (a'/a) \cdot (L'/a) \qquad (22)$$



donde

F_s	factor de sombra de la fila (en %)
a'	altura de la sombra (en m)
a	altura del panel (en m)
L'	longitud a la que se solapan ambas filas (en m)

1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Pasos I/III)

1) Cálculo del punto más elevado de las filas

$$h = a \cdot sin(\beta) \quad (17)$$

2) Cálculo de la longitud de la sombra

$$s = a \cdot [cos(\beta) + sin(\beta)/tg(\beta_s)]$$

donde

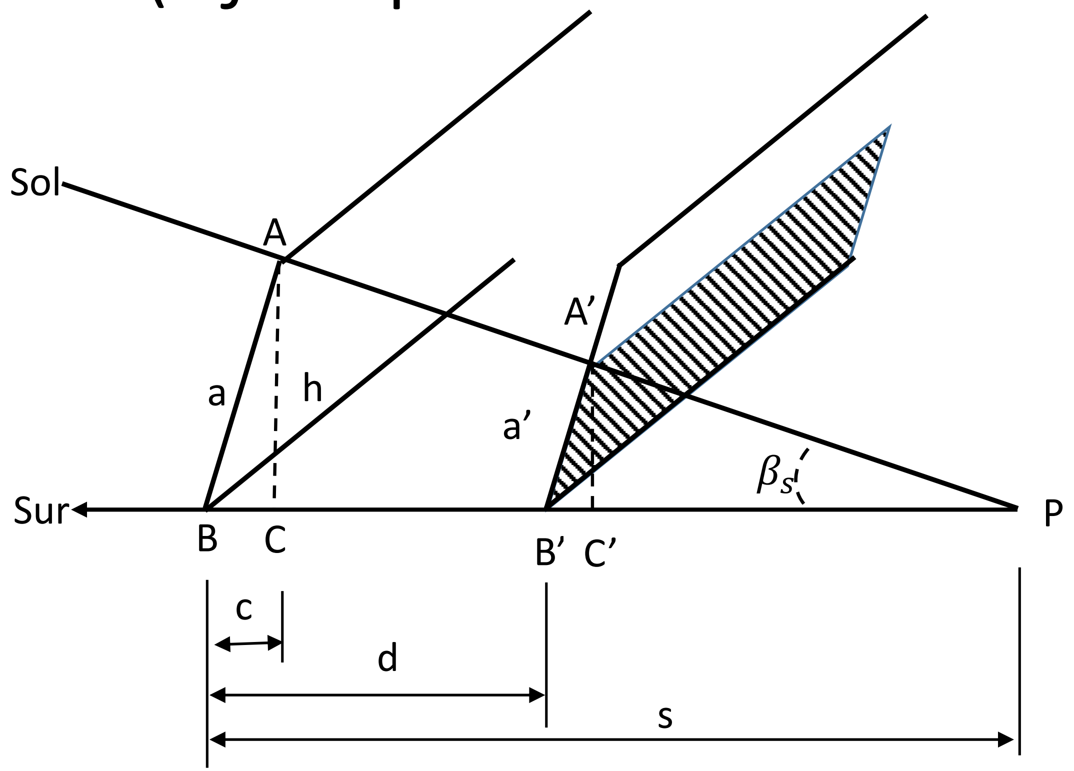
h (= A – C) altura de la fila de paneles (en m)

a (= A – B) altura del panel (en m)

β inclinación de la fila de paneles respecto del plano horizontal

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila

β_s (=) altura del Sol sobre el horizonte



1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Solución I/V)

1) Cálculo del punto más elevado de las filas

$$h = a \cdot sin(\beta) \qquad (17)$$

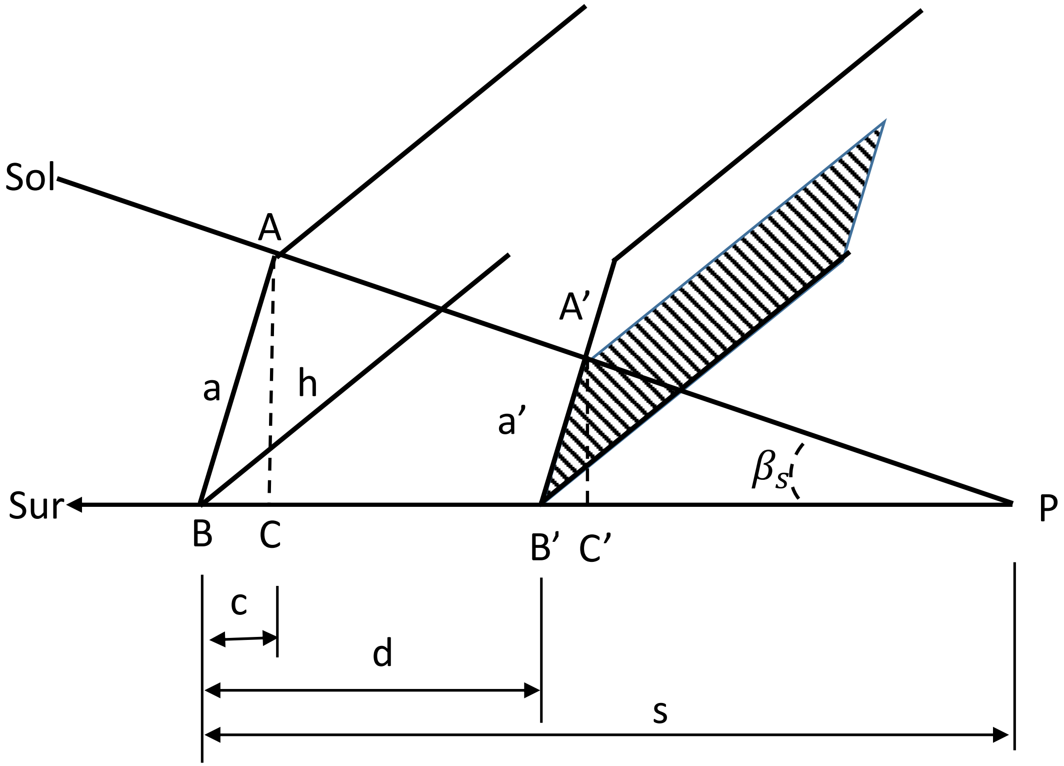
$$h = 2 \cdot \sin(40) = 1.286\, m$$

donde

h (= A – C) altura de la fila de paneles (en m)

a (= A – B) altura del panel (en m) = 2 m (dato)

β inclinación de la fila de paneles respecto del plano horizontal = 40 º (dato)



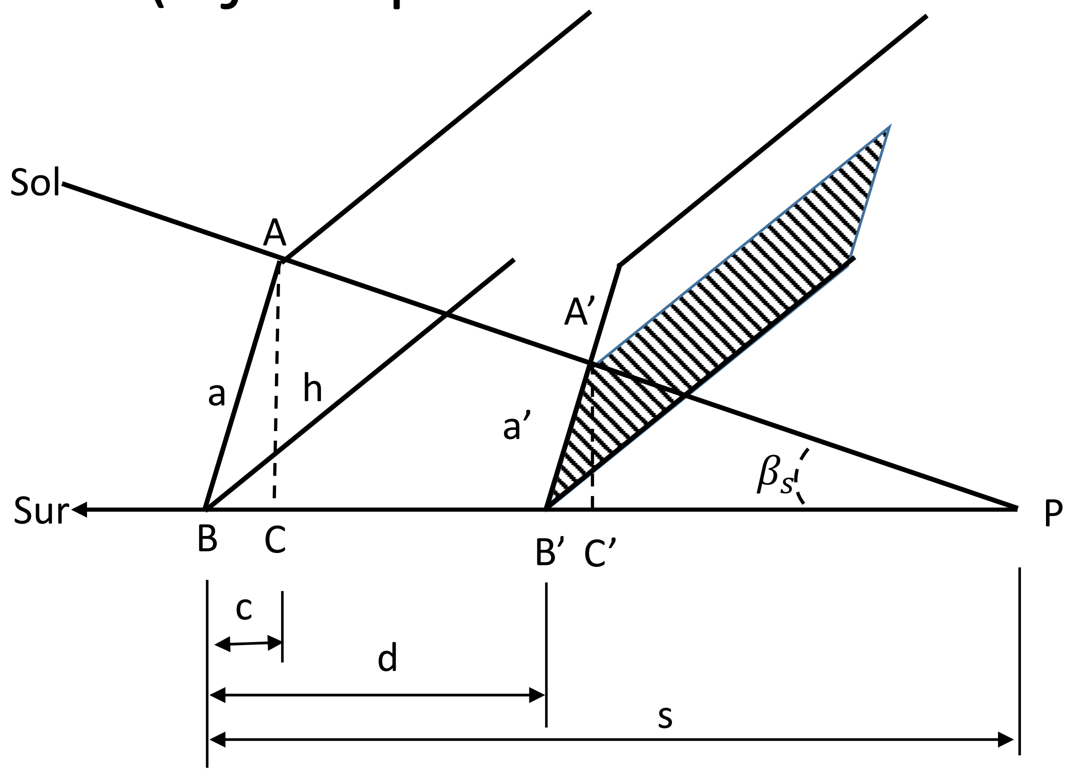
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Pasos I/III)

1) Cálculo del punto más elevado de las filas

$$h = a \cdot sin(\beta) \quad (17)$$

2) Cálculo de la longitud de la sombra

$$s = a \cdot [cos(\beta) + sin(\beta)/tg(\beta_s)]$$



donde

h (= A – C) altura de la fila de paneles (en m)

a (= A – B) altura del panel (en m)

β inclinación de la fila de paneles respecto del plano horizontal

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila

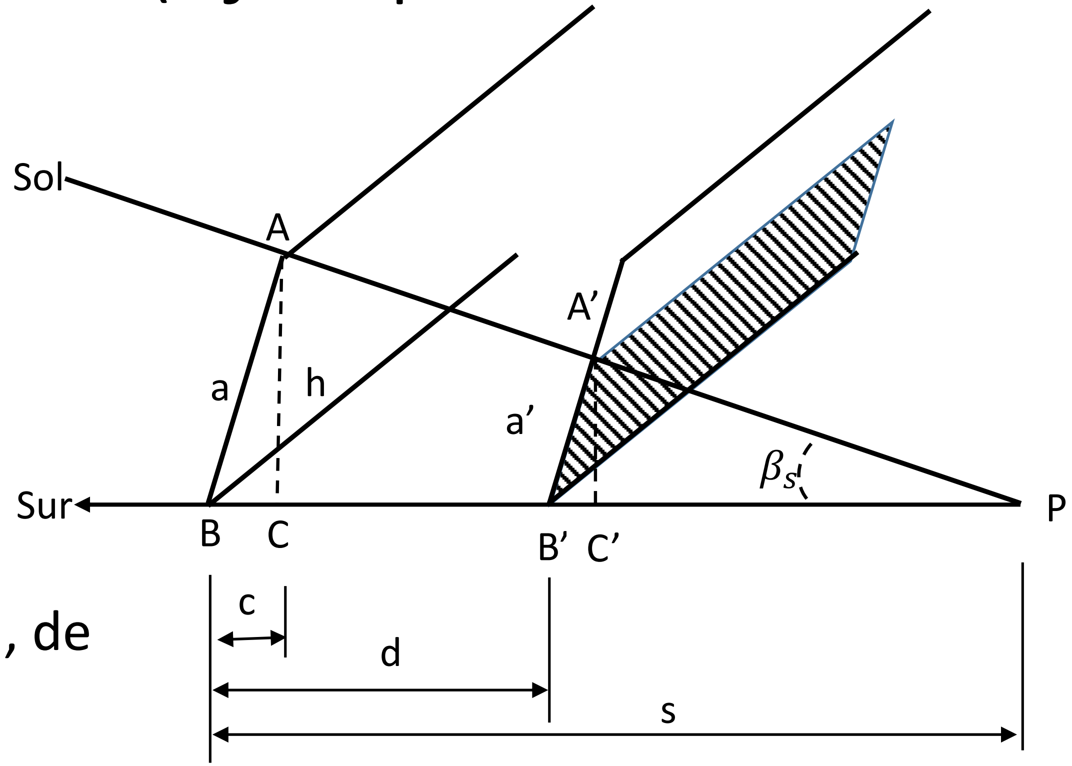
β_s (=) altura del Sol sobre el horizonte

1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Solución II/V)

2) Cálculo de la longitud de la sombra

$$s = a \cdot [cos(\beta) + sin(\beta)/tg(\beta_s)]$$

$$s = 2 \cdot [cos(40) + sin(40)/tg(25)]$$
$$= 2 \cdot [0.7660 + 0.6428/0.4663] = 4.290\ m$$



donde

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila

a (= A – B) altura del panel (en m) = 2 m (dato)

β inclinación de la fila de paneles respecto del plano horizontal = 40º (dato)

β_s (=) altura del Sol sobre el horizonte = 25º (dato)

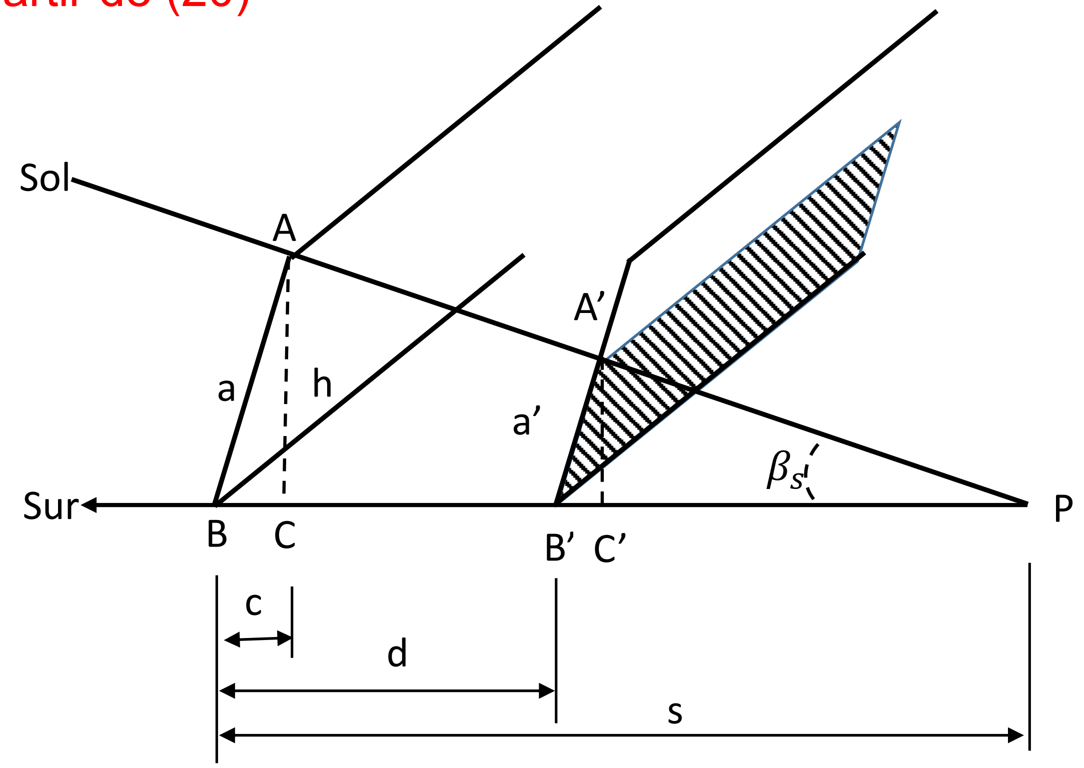
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Pasos II/III)

3) En caso de que la separación entre las filas (d) sea menor que la longitud de la sombra (s), calcular la altura de la sombra (a') a partir de (20)

$$a' = a \cdot (1 - d/s) \qquad (20)$$

4) Cálculo de la longitud de solapamiento entre filas

$$L' = LF - DSF$$



donde

a' (= A' – B') altura de la sombra medida sobre el plano de la 2ª fila de paneles

a (= A – B) altura del panel (en m)

d (= B –B') separación entre las dos filas

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila

L' longitud de solapamiento entre filas (en m)

LF longitud de la fila (en m)

DSF desplazamiento de una fila con respecto a la anterior (en m)

1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Solución III/V)

3) En caso de que la separación entre las filas (d) sea menor que la longitud de la sombra (s), calcular la altura de la sombra (a') a partir de (20)

$$a' = a \cdot (1 - d/s) \quad (20)$$

$$a' = 2 \cdot (1 - 3/4.290) = 0.601\ m \quad (20)$$

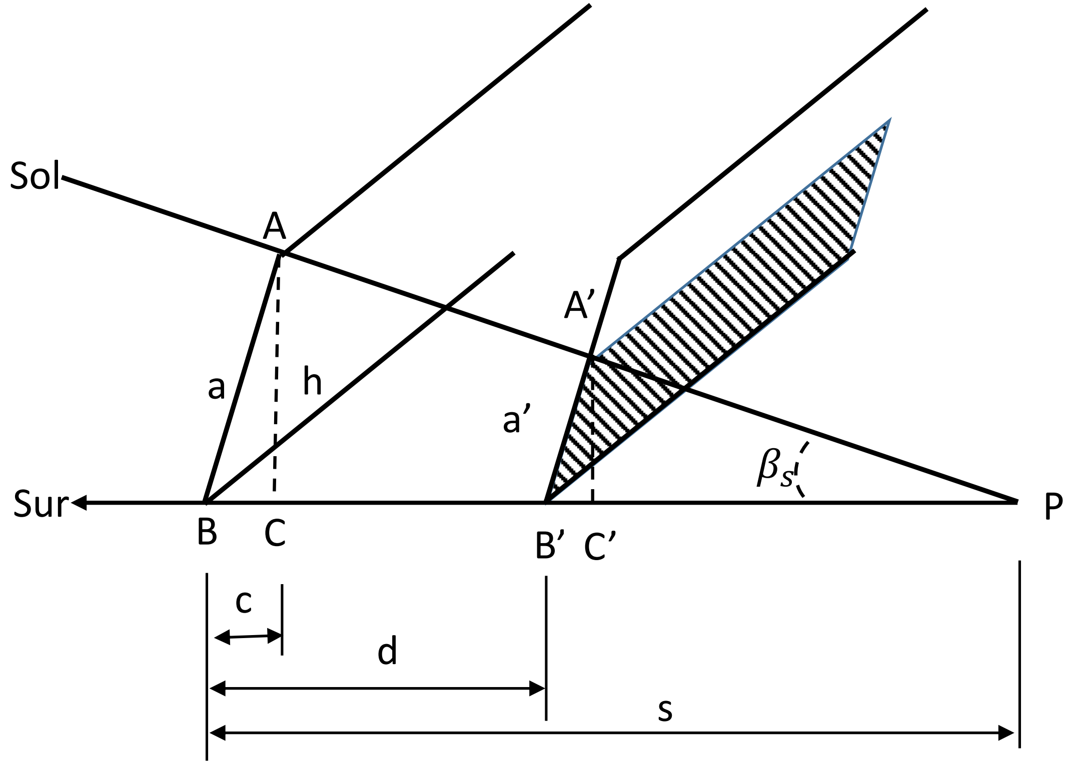
donde

a' (= A' – B') altura de la sombra medida sobre el plano de la 2ª fila de paneles

a (= A – B) altura del panel (en m) = 2 m (dato)

d (= B –B') separación entre las dos filas = 3 m (dato)

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila = 4.290 m (resultado de la diapositiva anterior)



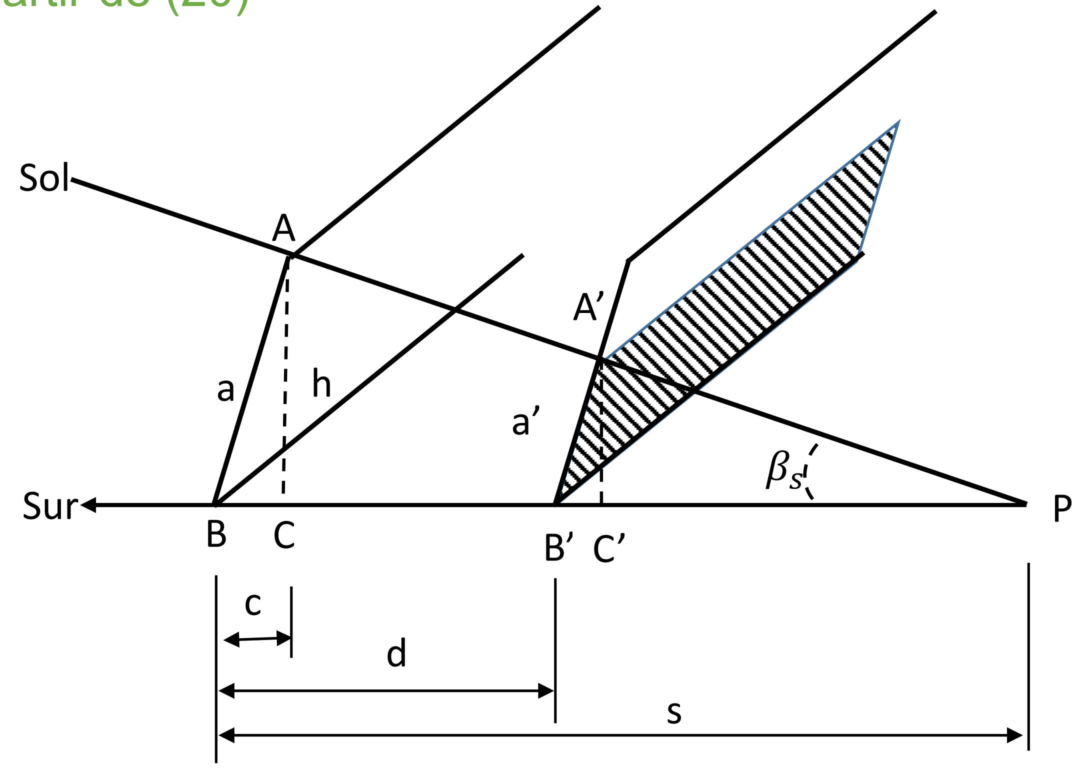
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Pasos II/III)

3) En caso de que la separación entre las filas (d) sea menor que la longitud de la sombra (s), calcular la altura de la sombra (a') a partir de (20)

$$a' = a \cdot (1 - d/s) \qquad (20)$$

4) Cálculo de la longitud de solapamiento entre filas

$$L' = LF - DSF$$



donde

a' (= A' – B') altura de la sombra medida sobre el plano de la 2ª fila de paneles

a (= A – B) altura del panel (en m)

d (= B –B') separación entre las dos filas

s (= B – P) longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila

L' longitud de solapamiento entre filas (en m)

LF longitud de la fila (en m)

DSF desplazamiento de una fila con respecto a la anterior (en m)

1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Solución IV/V)

4) Cálculo de la longitud de solapamiento entre filas

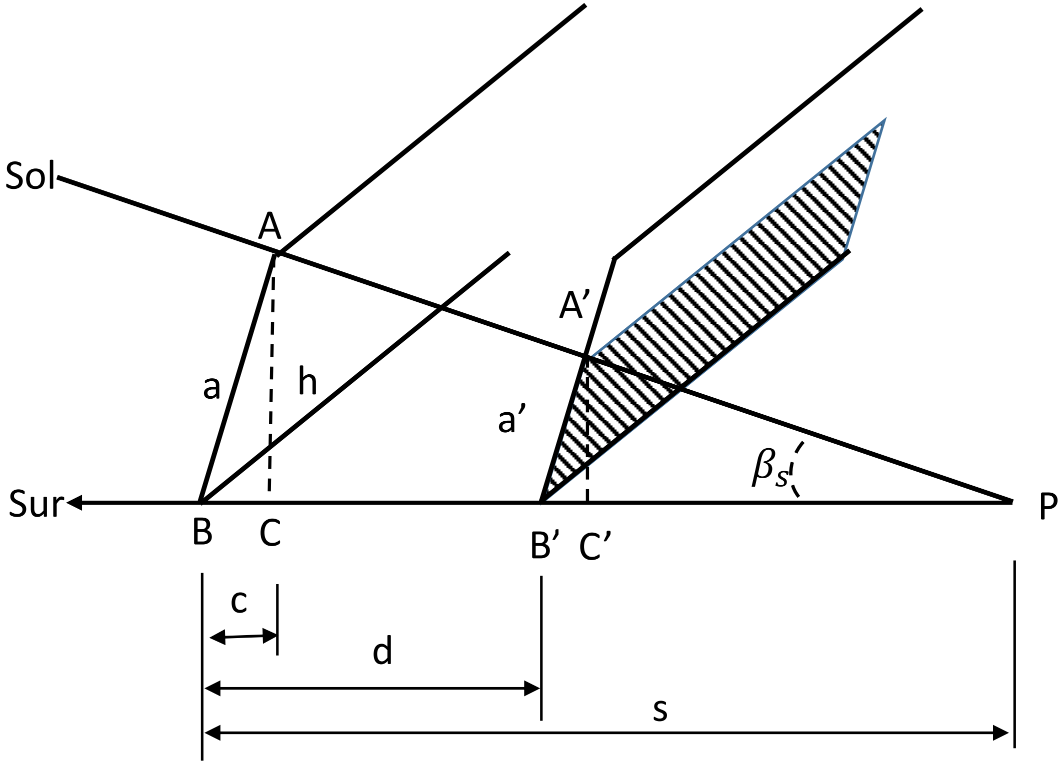
$$L' = LF - DSF = 10 - 2 = 8\ m$$

donde

L' longitud de solapamiento entre filas (en m)

LF longitud de la fila (en m) = 10 m (dato)

DSF desplazamiento de una fila con respecto a la anterior (en m) = 2 m (dato)



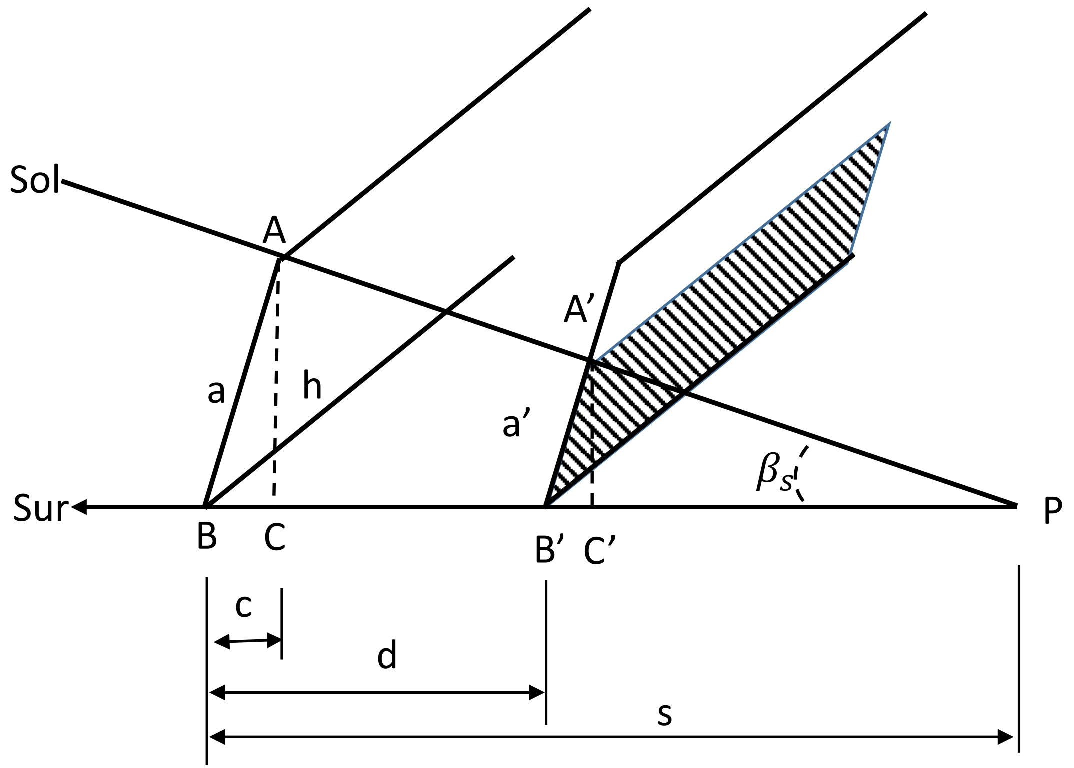
1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Pasos III/III)

5) Cálculo del factor de sombra

$$F_s = (a'/a) \cdot (L'/a) \qquad (22)$$

donde

F_s	factor de sombra de la fila (en %)
a'	altura de la sombra (en m)
a	altura del panel (en m)
L'	longitud a la que se solapan ambas filas (en m)

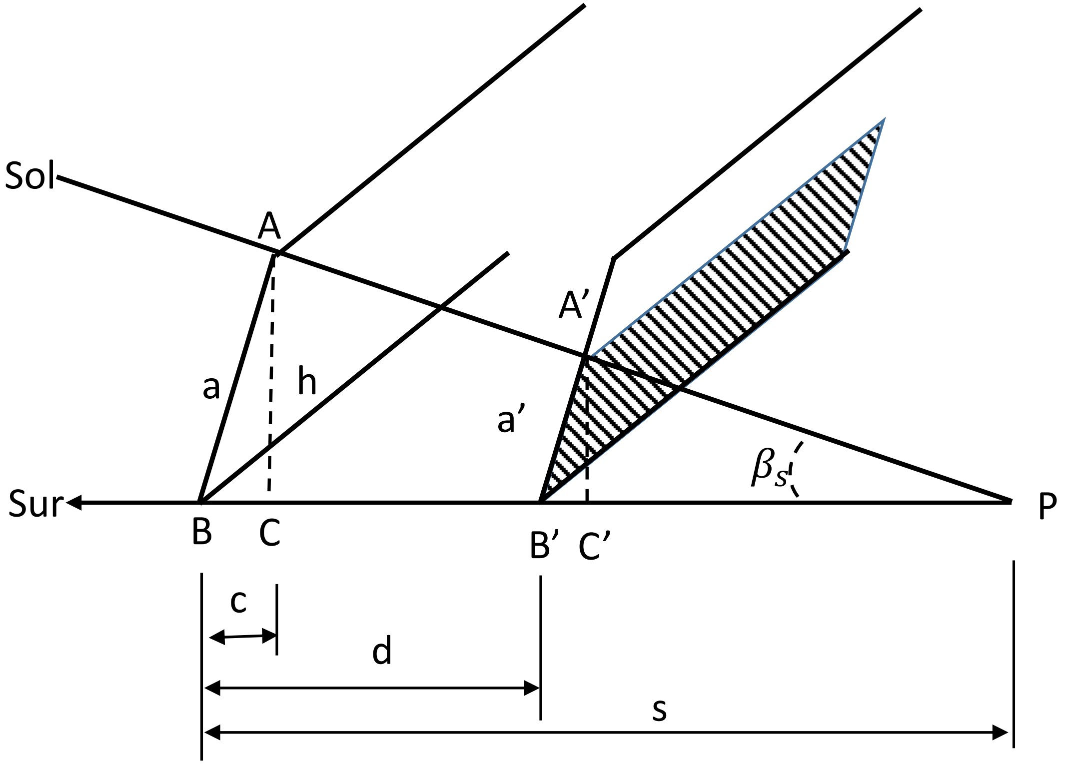


1.6.1 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada al mismo nivel (Ejemplo numérico 3; Solución V/V)

5) Cálculo del factor de sombra

$$F_s = (a'/a) \cdot (L'/a) \qquad (22)$$

$$F_s = (0.601/2) \cdot (8/2) = 0.24$$



donde

F_s factor de sombra de la fila (en %)

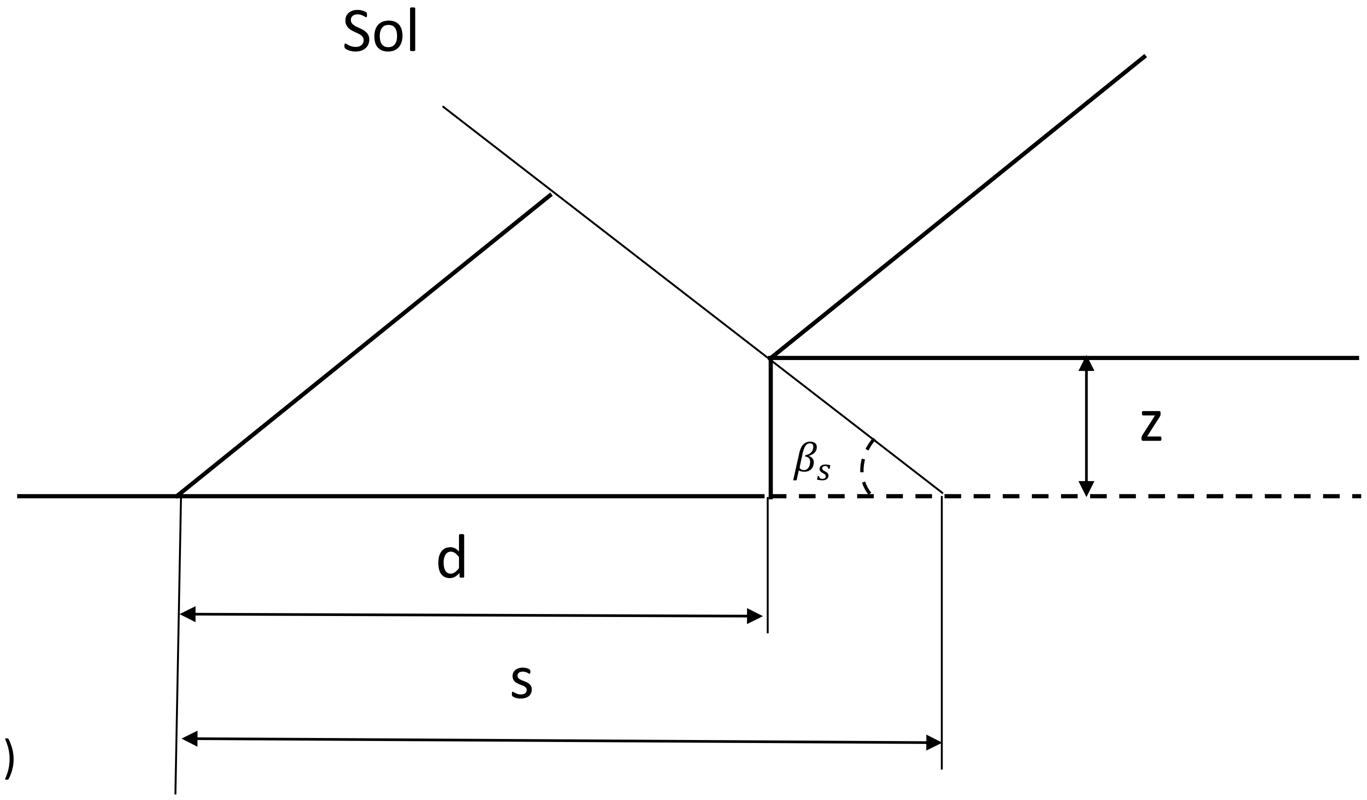
a' altura de la sombra (en m) = 0.601 m (resultado)

a altura del panel (en m) = 2 m (dato)

L' longitud a la que se solapan ambas filas (en m) = 8 m (resultado)

1.6 Sombra de un obstáculo sobre un plano
1.6.2 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada a distinto nivel

$$z = (s - d) \cdot \tan(\beta_s) \qquad (23)$$



donde

z = desplazamiento hacia arriba de la segunda fila (en m)

d = separación entre las dos filas (en m)

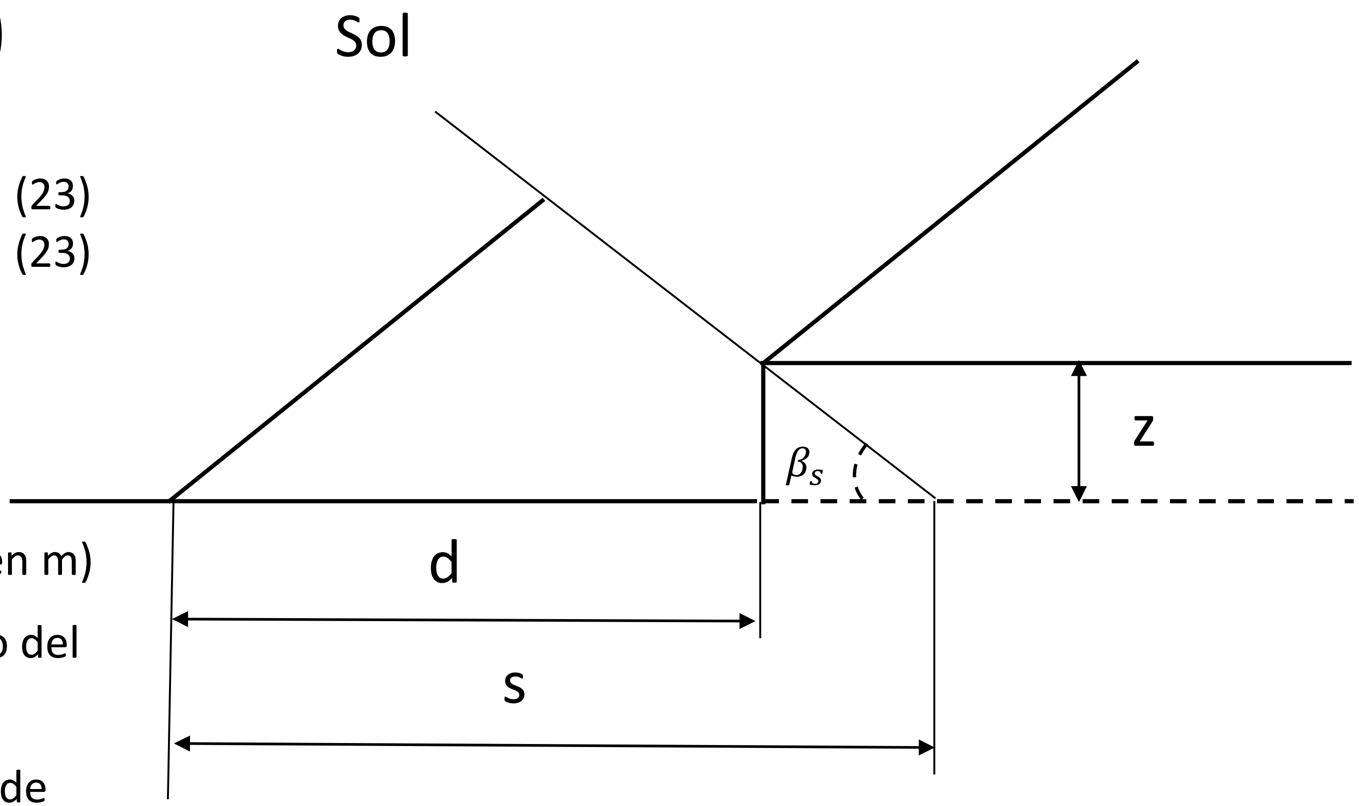
s = longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila (en m)

β_s = altura del Sol sobre el horizonte

1.6.2 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada a distinto nivel (Ejemplo numérico 4)

Con los datos del ejemplo numérico anterior, calcula a qué altura debería situarse la 2ª fila, respecto a la 1ª, para que no hubiera sombra.

1.6.2 Sombra de una fila de paneles sobre la siguiente situada a distinto nivel (Ejemplo numérico 4; Solución)



$$z = (s - d) \cdot \tan(\beta_s) \qquad (23)$$
$$z = (4.296 - 3) \cdot \mathrm{tg}\,(25) = 0.604 \text{ m} \qquad (23)$$

$$d = s/(1 + k)$$

donde

z = desplazamiento hacia arriba de la segunda fila (en m)

d = separación entre las dos filas (en m) (= 3 m, dato del ejercicio 3)

s = longitud de la sombra sobre el plano horizontal, de los paneles de la 1ª fila (en m) (= 4.296 m, resultado del ejercicio 3)

β_s = altura del Sol sobre el horizonte (= 25º, dato del ejercicio 3)

$$k = \frac{\tan(\gamma)}{\tan(\beta_s)};$$

γ es el ángulo de inclinación de la superficie sobre la que se instala el panel respecto del plano horizontal

FOTOVOLTAICA, BIOMASA Y COGENERACION

FIN

¿¿¿¿PREGUNTAS????

GRACIAS POR SU ATENCIÓN