

Giacomo Bonzani és arquitecte i responsable de diversos projectes urbanístics arreu del món. Autor del llibre "La vera storia dello specchio di Viganella" amb el periodista Marco De Ambrosis.

Textos i imatges Giacomo Bonzani i Gianni Ferrari

Traducció: V. Negro

Il·luminació solar per reflex de la plaça municipal de Viganella (Verbania)

Introducció



Fig. 1.- Marc territorial

A la Vall Antrona, en l'alt Ossola, província de Verbania, es troba el poble de Viganella, capital del municipi del mateix nom, que està ubicat sobre la vessant sud de la divisòria (una línia divisòria de les aigües) amb el territori de Montescheno. Immediatament baixa cap a la vall, d'oest a est, el rierol Ovesca, el marge dret del qual es veu limitat per una altra cadena muntanyosa que queda al sud del poble i que constitueix una pantalla natural a la insolació hivernal.



Fig. 2.- L'occcés de la vall a Viganella (novembre)

Una pantalla que, a la pràctica, es concreta en l'absència del sol durant l'arc diürn, per un període que va des dels primers dies de novembre fins als primers dies de febrer.

Després d'una sèrie de consideracions entre qui escriu, Giacomo Bonzani, i l'alcalde Pier Franco Midali, que daten de l'època de construcció del rellotge de sol de l'església l'any 1999, es va pensar a portar al poble un feix de llum solar reflectida.

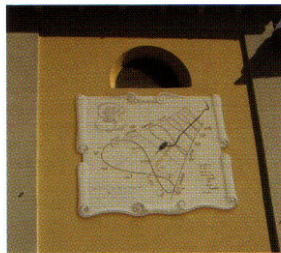


Fig. 3.- El rellotge de sol de l'església parroquial de Viganella (1999)

La possibilitat que oferia l'administració provincial de Verbania en un concurs destinat a finançar projectes innovadors i ordinaris dins del mes de maig de 2005, ens va portar a l'alcalde Midali i a mi a la concretització de la nostra idea, amb la preparació d'un avantprojecte. Un projecte que tenia com a objectiu il·luminar part d'una secció de la plaça del poble per al període de novembre a febrer de forma contínua durant, com a mínim, sis hores

al dia, donada la reduïda durada del dia d'hivern. Un tipus d'insolació artificial, produït per la reflexió dels rajos solars en una zona adequada, indicada pel mateix alcalde, on, els dies de cel serè, el sol surt i es manté en aquest horari esmentat (5-6 hores mínim). Es van preparar, doncs, els dibuixos tècnics per posar de relleu els càlculs bàsics per recolzar aquesta teoria i la seva viabilitat.

Per a la part científica es va consultar el Dr. Ing. Gianni Ferrari, de Mòdena. Per al disseny d'obres civils, la seguretat i per ajudar en el disseny final, va participar el Dr. Ing. Francesco Brambati, enginyer mecànic, propietari de l'empresa d'enginyeria de la LM Domodossola. És just recordar també el regidor de la ciutat de Viganella, Giannino Broggio, el funcionari municipal Daniele Miazzi, la inspectora (geòmetra) Elisabetta Brusa, per la seva col·laboració en les experimentacions pràctiques i en la preparació del

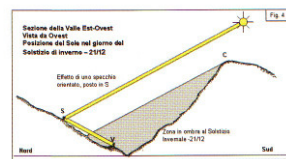


Fig. 4.- L'esquema del raig reflectit

disseny, com també la diligent Dra. Fernanda Munda i la tècnica municipal Susanna Floris.

Gianni Ferrari és doctor enginyer i expert quadranter, autor de diversos programes informàtics per al càlcul de rellotges de sol. Responsable de la part científica del projecte del mirall de Viganella.

El projecte en síntesi

El projecte inclou una intervenció a una alçada per sobre de la cota del poble (prop de 1050 m sobre el nivell del mar), per tal d'allotjar-hi l'estructura reflectora, muntada sobre una base que consisteix en una placa de formigó armat plana, sobre la qual hi ha fixada una columna d'acer perfilada en forma de tronc cònic que suporta la placa en ràfec rectangular que conté el mirall mòbil (fet de panells de material altament reflector, amb un mínim de gruix).

Aquesta placa de base sobresurt de la roca de fonament a través de dos murs baixos, també de formigó armat, seguint el perfil del terreny segons la màxima inclinació. La part mecànica és motoritzada per tal de seguir constantment el moviment de l'astre i dirigir amb continuïtat els rajos reflectits als llocs predeterminats: l'àrea de vianants de la plaça principal de Viganella, davant del monument als Caiguts, part de la seu de la Comunitat Montana de la Vall Antrona i el pòrtic d'accés de l'església parroquial. Entre llum vertadera i difusa, l'àrea il·luminada és aproximadament de 250 metres quadrats.



Fig. 5.- La plaça municipal a l'ombra (desembre)

En el disseny es va considerar: L'acció del vent, l'eventualitat de terratrèmols, les descàrregues at-

Primer objectiu: portar al poble un feix de llum solar reflectida durant el període hivernal de nul·la insolació a la vall

mosfèriques, la inaccessibilitat a persones no autoritzades, i el subministrament de l'energia elèctrica. L'alimentació elèctrica necessària

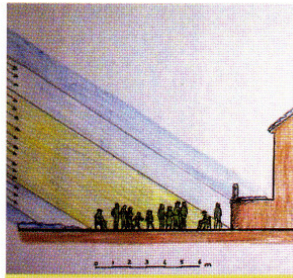


Fig. 6.- Secció de la placa il·luminada pel mirall

per a l'automatisme, prevista per a un màxim d'energia útil de 0,8 kw, és derivada d'un estable proper de l'alp Pianezza, amb un recorregut d'uns 350 m.

És important el context en el qual està col·locat el mirall: una clariana particularment plana per damunt d'una zona rocosa escarpada, per minimitzar l'impacte ambiental i la tala d'arbres que fan de pantalla.

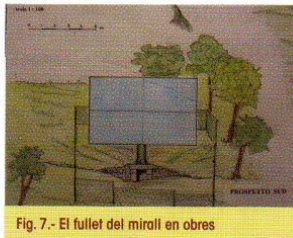


Fig. 7.- El fulllet del mirall en obres

El mirall visible des de Viganella no és "contra cel", com la majoria de les estructures similars presents en els cims o punts retransmissors de telefonia. Això és perquè aigües



Fig. 8.- Viganella vista des del lloc on està col·locat el mirall

amunt encara hi ha suficient àrea boscosa com per desdibuixar el perfil.

Si per la part del projecte estructural (fonaments, placa, suport en acer) no hi cap particularitat a destacar, sí que cal fer esment al sistema de gestió del moviment, el qual és un derivat que imita les instrumentacions de caràcter astronòmic (motorització per a telescopis o per a instal·lacions solars, siguin fotovol-

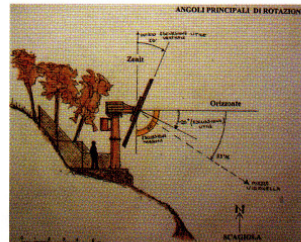


Fig. 9.- Angles principals de rotació

taïques o tèrmiques); amb el seu sistema informatitzat per al moviment i un comandament a distància per posicionar-lo des del poble, útil per mantenir l'alineació del raig reflectit o per a petites desviacions que siguin necessàries en particulars circumstàncies com ara festes, celebracions, o altres tipus.



Fig. 10.- El mirall vist des de Viganella

S'ha pensat d'adaptar el present projecte al sistema en ús des de fa alguns anys prop de les entrades als túnels de les autopistes italianes entre Liguria i Piemonte, sistema que al llarg del temps s'ha demostrat eficient i fiable. El moviment bi-axial del mirall, en aquest cas, és realitzat per accionament hidràulic.

Durant el període d'inactivitat de l'estructura, aquesta es posa en "stand-by" i el mirall es cobreix amb una tela de camuflatge, orientat de tal manera que no pugui ser activat pel sol, ja que en els dies d'il·luminació natural de Viganella, podria incidir en les hores matutines i postmeridianes i reflectir-se en llocs diferents dels establerts, creant possibles trastorns al medi ambient.



Fig. 11.- Aplicació pràctica del mirall en una entrada del túnel d'autopista

En un futur es podrà valorar també la seva utilització en altres períodes de l'any, orientant el mirall cap a la muntanya del davant (en les poques zones que encara resten a l'ombra durant uns mesos), o potser per alimentar panells fotovoltaics al servei de refugis de muntanya, o escalfar hivernacles per a cultius determinats.

A més del benefici purament diürn a l'hivern, una aplicació estiuenca pot ser la il·luminació lunar de la mateixa àrea de Viganella; com que la Lluna "baixa" a l'estiu, no és visible des del poble. Això pot ser una font d'atracció turística, però seria limitat als dies de lluna plena de juny i juliol. D'altra banda, també es pot realitzar alguna observació de caràcter astronòmic (eclipsis de lluna o sol).

Des del punt de vista psicològic, el sol reflectit pot comparar-se amb el sol vist des de l'hemisferi sud, ja que amb el mirall orientat i funcionant, el sol es veu al nord i no al sud. Tècnicament s'haurien pogut assignar més miralls de dimensions menors, també en nombre variable de dos a cinc, però l'administració va escollir la solució d'un únic sol reflectit i no només per motius econòmics, sinó

també psicològics, ja que el sol és en tot cas un únic astre.

Com es desprèn dels càlculs, la mida que es considera òptima per a la finalitat prevista, és un mirall d'aproximadament 8 x 5 metres (la primera versió era d'un mirall quadrat de 5 metres de costat). Això proporciona en el punt seleccionat de la plaça una radiació equivalent a prop del 80%, en una àrea directament

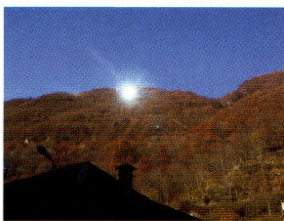


Fig. 12.- La simulació pràctica amb un mirall quadrat d'un metre quadrat

il·luminada, que, en comparació a l'obtinguda el mes de juny, està naturalment reduïda. En els períodes considerats, l'energia màxima assolida és de 5,4 mega joules per m² per dia el mes de novembre, de 3,6 MJ per m² el desembre i gener i de 6,2 MJ el febrer. Cal tenir en compte que la radiació solar en condicions òptimes en un pla perpendicular als rajos del sol en les nostres latituds i en la muntanya, és al voltant de 1200w per m².

Valors gairebé reduïts a la meitat en el cas del sol reflectit, però suficients pel fet de persistir l'escalfor de la massa tèrmica de la pavimentació il·luminada i escalfada per una superfície d'uns 240 m².

El problema per Gianni Ferrari

Com ja s'ha dit, el poble de Viganella, VB, es troba gairebé al centre, exactament sobre el costat nord, de la Vall d'Introna, que s'obre predominantment en direcció est-oest. Al sud del poble, el terreny s'enfila ràpidament i assoleix en poc més de 2 km la cresta, en la qual es des-

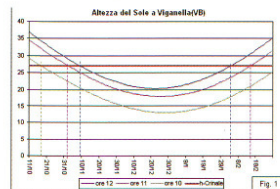
taquen els pics d'aproximadament 1600 metres d'alçada, i que amb un curs paral·lel a la vall i una altura gairebé constant, impedeix que en els mesos d'hivern la llum del sol arribi i il·lumini el poble situat 1000 metres més avall.

Mentre que el perfil de les muntanyes al sud de la població arriba a prop dels 26°-30° d'elevació, l'altura del sol a migdia es manté per sota d'aquest angle en el període comprès, aproximadament, entre el 10 de novembre i el 2 de febrer següent.

En el gràfic 1 es veu, a més, que a les 11 hores el Sol no és visible aproximadament des de l'1 de novembre al 15 de febrer, i a les 10 hores no és visible del 17 d'octubre al 6 de març.

En conclusió, el poble no rep els rajos solars durant uns 83 dies (quasi 12 setmanes), està il·luminat menys de 2 hores al dia per un període de 106 dies (aprox. 15 setmanes), i està il·luminat menys de 4 hores en 139 dies (20 setmanes).

Les dades i perfil de la vall



Gràfic 1: Altura del Sol a Viganella (VB)

Coordenades geogràfiques de l'Ajuntament de Viganella, (VB)

Latitud Nord: 46° 3'11.52"

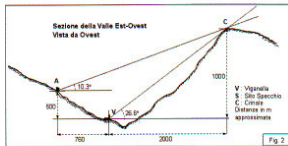
Longitud Est: 8° 11'48.48"

Altitud: 582 m.s.n.m.

En el dibuix indicat en el gràfic 2 està representada una secció de la vall a l'altura de Viganella, feta amb un pla nord-sud i vista des de la direcció oest. Estan indicats els perfils de les muntanyes al nord i de la cresta, al sud (a la dreta de la figura).

En un futur es podrà valorar també el seu ús en altres períodes de l'any

Viganella no rep els rajos solars durant 83 dies, els rep menys de 2 h/dia durant 106 dies, i està il·luminat menys de 4 h durant 139 dies.



Gràfic 2.- Secció Est-Oest, vista des de l'Oest
 V = Viganella
 S = Situació del mirall
 C = Cresta. Distància en m aproximada

Les mides i les altures indicades són aproximades, en no tenir la cresta, òbviament, una altura constant.

Pot observar-se com, des del centre del poble, la cresta al sud es veu sota un angle del voltant de 26-27°. En el gràfic n. 3, es mostra el perfil de la vall amb indicació de la zona que no està il·luminada pel sol al migdia del dia del solstici d'hivern, 21 de desembre, quan el sol està en el punt més baix.

Mirall il·luminador

Per tal de pal·liar parcialment el problema de la falta d'il·luminació solar directa per un període tan llarg, es va pensar a utilitzar més d'un mirall que es pogués col·locar sobre el costat nord de la vall i ser girat oportunament de manera que es poguessin redirigir els rajos solars al centre de Viganella, a fi de mantenir il·luminada una petita zona dins del poble per un cert període de temps

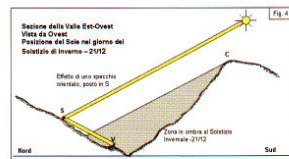


Gràfic 3.- Secció de la vall Est-Oest, vista des de l'Oest
 Zona a l'ombra en el solstici d'hivern -21/12»

centrat cap al migdia. El lloc adequat per acollir el sistema reflector està indicat pel punt S en les figures anteriors, i està a uns 760 m del centre del poble i a uns 500 metres més amunt.

Tal com està il·lustrat en el gràfic 4, els rajos del sol també assoleixen el punt S en el dia del solstici d'hivern i, per tant, si s'hi reflecteixen, poden arribar al poble.

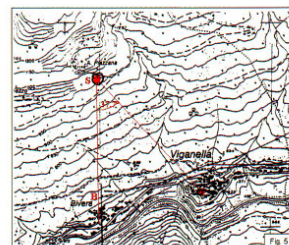
Per motius deguts a la naturalesa orogràfica del terreny, la ubicació identificada com a apta per acollir



Gràfic 4.- Secció de la vall Est-Oest, Vista des de l'Oest.
 Posició del Sol al solstici d'hivern -21/12
 Efecte d'un mirall orientat situat a S
 Zona a l'ombra en el solstici d'hivern

el sistema reflector no és exactament al nord de la població, sinó una mica desplaçada cap al nord-oest.

En el gràfic n. 5 es reproduïx un mapa que inclou els llocs d'interès:



Gràfic 5.- Llocs d'interès

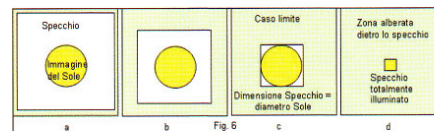
Per redirigir la llum del Sol cap a la plaça del poble (punt P) es poden calcular fàcilment els angles que determinen la direcció dels rajos reflectits:

Azimut = angle BSP = 37.7° de Sud cap a Est

Altura = angle en el pla vertical que passa per S i P, sota del qual des de S es veu P, = 33.3° per sota de l'horitzó de S.

Il·luminació deguda a un mirall

Per aclarir els problemes trobats quan es desitja il·luminar un punt P, que està a l'ombra, amb un mirall S situat a una certa distància, comencem per suposar inicialment que disposem d'un mirall molt gran. En aquest cas, un observador col·locat en el punt P veu en l'interior del mirall (degudament orientat) el disc solar complet i, per tant, rep una il·luminació igual a la que té en la ubicació S, directament il·luminada pel sol (gràfic 6a).



Gràfic 6.-
 a) Mirall il·luminat del sol
 b) Mirall de dimensions més reduïdes
 c) Cas límit. Dimensions mirall = diàmetre del Sol
 d) Zona arbrada darrere del mirall. Mirall totalment il·luminat

Si reduïm lentament la dimensió del mirall, l'observador posat en el punt P hi segueix veient el disc solar sencer (6b) fins que la dimensió transversal del mirall no es torna excessivament petita (6c).

Reduint encara més les dimensions, des del punt P es podrà veure sols una part del disc solar reflectit en el mirall, que apareixerà totalment il·luminat (6d).

Com a resultat directe, tindrem llavors que la quantitat d'energia lumínica que li arriba a l'observador en el punt P és inferior a la que li arriba a S i, per tant, la il·luminació de la plaça és menor que la produïda directament pel sol.

Atès que el sol té un diàmetre mitjà de $\Phi=32'$ (al voltant de mig grau), per tenir la condició límit que es representa al gràfic 6c, cal que el costat del mirall, si és quadrat, o bé el seu diàmetre, sigui igual al valor que es pot treure de la relació:

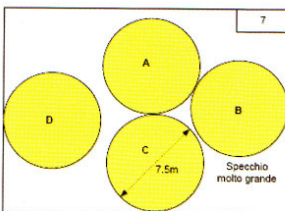
$$DP = L \Phi \text{ radiant} = L/107.5$$

en la qual s'indica amb L la distància SP mirall-observador.

Per tal de pal·liar parcialment el problema de la falta d'il·luminació solar directa per un període tan llarg, es va pensar inicialment a utilitzar més d'un mirall col·locat sobre el costat nord de la vall.

En el cas de Viganella, sent la distància entre mirall i plaça al voltant de 800 m, el diàmetre "crític" del mirall resulta igual a 7.5 m: per tenir, si més no en un punt de la plaça, una il·luminació igual a la present en ple sol, cal, per tant, un mirall que tingui com a mínim aquestes dimensions.

Amb una dimensió més gran, el valor d'il·luminació no augmenta però sí que resulta il·luminada no tan sols la zona restringida de la plaça vers la qual va dirigit el raig reflectit, sinó una zona de dimensions més grans. En aquest cas, un observador veuria el disc del Sol en la posició A del gràfic 7, un altre el veuria en la posició B, etc.



Gràfic 7.- Mirall molt gran

Si el mirall no estigués contínuament orientat, un observador veuria el disc solar travessar el mirall i seria "il·luminat" per un cert període de temps. Per exemple, amb un mirall de 25m de llarg, la il·luminació d'un punt duraria uns 7 minuts i s'il·luminaria una zona al voltant de 30 m d'amplada.

Il·luminació amb un mirall de dimensions reduïdes

Ara considerem el cas que el mirall (per senzillesa circular), no pugui, per diferents motius, tenir grans dimensions. Sigui D el seu diàmetre.

La zona del pla horitzontal de la plaça que és il·luminada té forma el·líptica allargada i s'hi poden localitzar dues zones:

o una zona central, en la qual la il·luminació J_s és màxima i constant, des de qualsevol punt de la qual un observador veuria el mirall completament il·luminat pel sol.

o una faixa que circumda la zona central (faixa en penombra), en la qual la il·luminació provocada pels rajos solars reflectits pel mirall disminueix gradualment i s'anul·la. Un observador posat en un punt d'aquesta zona veuria solament una part del mirall il·luminada pel sol.

Atès que en les vores de la faixa en penombra la il·luminació ja no és perceptible, amb bona aproximació es pot considerar il·luminada la zona inclosa dins de la línia mitjana de la faixa en penombra pròpiament dita.

Les relacions són les següents: $DP = L/107.5$

zona central [DP - D] el lípsi amb eixos $D_p - D / \sin(h)$

zona il·luminada [DP] - el lípsi amb eixos $D_p / \sin(h)$

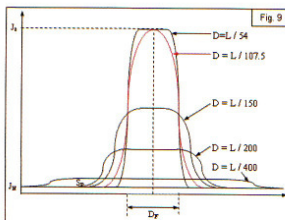
amplada de la faixa externa dèbilment il·luminada $[D/2] ; D/2 / \sin(h)$;

En el cas de Viganella es té $L = 800$ m i $h = 33^\circ$.

Amb un mirall de 3 m de diàmetre es tindria :

o una zona central de 4.5 x 8.1m
o una zona il·luminada de 7.5 x 13.6m

o una faixa poc il·luminada de 1.5 y 2.8m d'amplada, respectivament, en totes dues direccions.



Gràfic 8.- Il·luminació segons les dimensions del mirall

Atès que un punt P de la zona central rep solament la llum reflectida pel mirall, i donat que aquest, degut a les seves limitades dimensions, sols "cobreix" parcialment el disc solar (veure 6d), la il·luminació de la

zona central és inferior a la que es tindria a ple sol i directament proporcional a la superfície reflectora del mirall.

Indiquem amb J_o la il·luminació en un punt que rep els rajos del Sol en les mateixes condicions atmosfèriques, en el mateix dia i en la mateixa hora¹ i amb J_s la il·luminació produïda per la llum reflectida pel mirall. En el cas del mirall circular es té:

$$J_s = J_o \left(\frac{D}{D_p} \right)^2 = J_o \left(\frac{107.5}{D/L} \right)^2$$

i amb un mirall de forma qualsevol $J_s = 1,273$ Superfície _ Mirall / $D^2 P$
 $J_o = 14714$ Superfície _ Mirall / $L^2 J_o$

Per tant, amb les dades de l'exemple exposat, es tindria en la zona central una il·luminació semblant a 1/6 de la considerada normal [$J_s = 0.1625 J_o$].

Podem concloure, doncs, que en disminuir la dimensió D del mirall, la il·luminació màxima central baixa ràpidament, ja que l'energia lluminosa reflectida disminueix en proporció quadràtica, mentre roman pràcticament constant la superfície sobre la qual es distribueix.

Nombre de miralls

En el paràgraf anterior s'ha trobat que amb un mirall de dimensions relativament petites, la il·luminació resulta notablement més baixa que la "normal" i disminueix ràpidament quan les dimensions de l'àrea reflectora disminueixen, mentre que la zona "il·luminada" queda pràcticament constant.

En particular, per exemple, amb un mirall quadrat de 2 m de costat s'assoleix una il·luminació igual

¹ Amb el Sol a una altura propera a 45-50°, amb cel perfectament seré, el valor de J_o és d'uns 100000 lux. En comparació, recordo que el valor d'il·luminació sobre una superfície horitzontal produïda per un cel molt ennuvolat és d'uns 1000 lux; la produïda per una bombeta de 60W col·locada a 1 m de distància és d'uns 100 lux i finalment, la produïda per la llum de la Lluna plena és de 0.2 lux.

al 15% de la que s'assoleix en ple sol; amb un de 3 m de costat, una il·luminació del 21%, i amb un de 4 m, un valor del 37%. En aquests casos, les dimensions de la zona interessada són sempre d'uns 13 x 7 m. Per tant, per augmentar el valor de la il·luminació produïda pels rajos reflexos, cal augmentar l'àrea de la superfície reflectora utilitzant o bé un mirall de dimensions més grans o bé més miralls independents funcionant en paral·lel, cadascun dotat d'un sistema de motorització per a l'orientació (junts o en sèrie). Per exemple, un grup de 4 miralls de 3 m de costat donaria el mateix resultat que un únic mirall de les dimensions de 6 x 6 m o de 4 x 9 m, i produiria una il·luminació igual al 83% de la produïda directament pel Sol. En canvi, si es desitja només una il·luminació igual al 50% de la solar, n'hi hauria prou amb un mirall quadrat de 4,7 m de costat o bé 3 miralls de 2,7 m de costat. Finalment, per tenir una il·luminació en la zona central teòricament igual a la produïda pel Sol, seria necessari un únic mirall de poc més de 6,6 m de costat o bé 3 miralls de 3,8 m, 4 de 3,3 m, o si no, 5 de 3 m.

Mirall pla, esfèric i parabòlic

Per "focalitzar" millor els rajos procedents del Sol sobre el punt interessat, es pot pensar a utilitzar un mirall esfèric o, tal com es fa en astronomia, un mirall parabòlic. Atès que l'òptica ens diu que el raig de curvatura d'un mirall esfèric és exactament igual a la meitat de la seva distància focal, caldria fer servir un mirall esfèric amb raig R de prop de 400 m.

Si el diàmetre D és petit respecte al raig, s'obté que la longitud de la fletxa, és a dir, la desviació màxima de la superfície del mirall d'un pla val: $fletxa = D^2 / 4 R$ que amb $D = 3m$ ens porta a un valor de la fletxa de només 5.6 mm.

En un mirall parabòlic, la desviació d'una superfície plana seria igual al valor trobat més una centèsima de mil límetre aproximadament.

Es pot concloure, per tant, que no és necessari un mirall esfèric o més complex, sinó que és suficient comptar amb un mirall pla.

Tipologia dels miralls

Els miralls per il·luminar la plaça de Viganella podrien ser del mateix tipus que els utilitzats en algunes centrals per a l'explotació de l'energia solar per produir energia elèctrica o per obtenir molt altes temperatures². En aquests casos, es tenen sèries de desenes o centenars de miralls que circumden una estructura central i que reflecteixen els rajos del sol sobre una zona on hi ha un forn amb gresol, o bé un generador de vapor. En aquests casos, a diferència del nostre, es dirigeixen els rajos per concentrar l'energia tèrmica del Sol en una zona ben acotada i assolir altes temperatures.

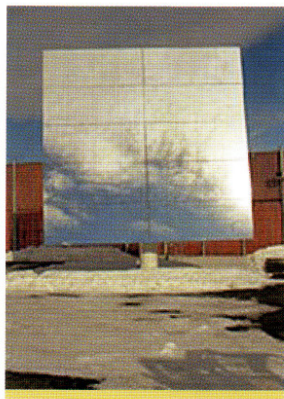


Fig. 13.- Mirall d'una central d'energia solar

² Aquests miralls mòbils s'anomenen normalment heliostats, mentre que es denominen celostats els sistemes anàlegs que permeten portar la imatge del Sol a l'interior d'observatoris o altres edificis, per tal de disposar d'una imatge fixa idònia per a les observacions. Els celostats s'usen en astronomia i generalment estan constituïts per un mirall principal mòbil, amb muntura equatorial, que envia els rajos solars cap a un o més miralls, que els reenvien.

En el nostre cas, en canvi, no es desitja concentrar l'energia solar per aconseguir valors elevats de temperatura, sinó per assolir una il·luminació "natural" en una zona estreta no il·luminada directament. Per tant, en el cas de Viganella,

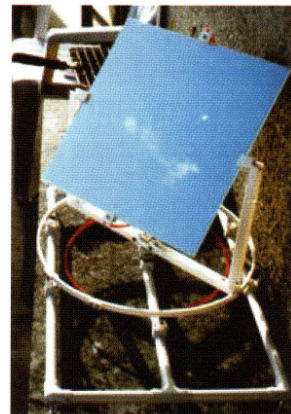


Fig. 14.- Model simplificat de prova

Els miralls per il·luminar la plaça de Viganella podrien ser del mateix tipus que els utilitzats en algunes centrals per a l'explotació de l'energia solar.

no havent d'aconseguir l'eficiència imposada per a una instal·lació industrial, és possible reemplaçar els miralls de vidre pels fets amb un altre material molt reflector que no s'alteri si es col·loca a la intempèrie; un material fàcilment disponible en el mercat amb aquestes característiques és l'acer inoxidable.

En qualsevol cas, cal fer notar que el sistema de control dels moviments dels miralls ha de ser bastant precís si es desitja que la zona il·luminada romangui fixa, és a dir, sempre en la mateixa posició. En efecte, un error d'1° sobre l'orientació porta a un desplaçament de la zona il·luminada de prop de 28 m, mentre que per a mantenir-la centrada sobre un punt amb una tolerància de ±1 m, cal una precisió en el moviment dels eixos superior als 4' d'arc (1/15°).

Giacomo Bonzani info@gimbonzani.it

Gianni Ferrari gjmerid@gmail.com