

La misure de radiazion solâr sui cilindris fotovoltaics a strât sutîl

LORENZO MARCOLINI*

Ristret. La misure de intensitât de radiazion solâr e je une des misuris ambientâls finalizade ae verifiche de prestazion (eficienze) intun implant fotovoltaic (FV). La procedure e fâs part de pratiche amministrative pe concession dal incentîf dal GSE (Gjestôr dai Servizis Eletricos) e in plui e je conseade al progettist a completament de declarazion di conformitât. Par solit, intai implants FV costruîts cun modui FV plans, cheste misure e ven elaborade in maniere automatiche. La strumentazion eletroniche – daspò vè inserît a man la potence nominâl dal implant e acuisidîs lis misuris ambientâls e eletrichis dai sensôrs e sondis – e calcole se la conversion de potence radiant dal soreli in potence eletriche (lât continue) e chê di continue in alternade (lât alternade) a superin i valôrs minimis fis-sâts de norme CEI. La misure de intensitât di radiazion su modui FV a cilindris no pues jessi misurade daûr des indicazioni de norme CEI EN/IEC 61646 (recepide te CEI 82-25) scrite pai modui plans, ancje se i sfueis tecnicos dal produtôr Solyndra a certificchin la potence nominâl cun riferiment propit a cheste norme. In chest studi e ven ilustrade la metodologjie seguite par misurâ lis components de lûs direte, rifletude e difondude su la superficie cilindriche di un element FV, e ven justificade la ipotesi, provade in vie sperimentâl, che la verifiche tecniche funzionâl e à sucès se la intensitât di radiazion globâl misurade sul plan e ven ridusude di une cierte quantitât percentuâl. Chestis verifichis a son stadis fatis in colaborazion cun Hessiana srl, dite proprietarie dal implant FV a cilindris su la cuvierature di un capanon industriâl intal Friûl di mieç.

Peraulis clâf. Intensitât de radiazion solâr, prestazion (eficienze), potence nominâl, modui FV plans, cilindris FV.

* Za docent ITI (cumò ISIS) “A. Malignani”, Udin, Italie. Component de Unitât di Ricercje in Didatiche de Fisiche (URDF), Universitât dal Friûl, Udin, Italie. E-mail: lorenzo.marcolini@uniud.it

1. Introduzion. Cuasi ducj i modui FV, a tecnologjie cristaline o a strât (film) sutîl, a vegnin fôr de filiere industriâl inte forme di modui plans, cu la ecezion dal tubul o cilindri a film sutîl CIGS costruît de societât Solyndra (Fremont, Californie), une tecnologjie particulâr che e cuvierç une piçule nicje di marcjât, marcjât dut câs restât congelât par cause dal procès di licuidazion de dite californiane (te Figure 1 si viôt il posizionament di un cilindri intune situazion di laboratori a cîl viert)¹.

Al di di vuê a vegnin proponudis sul marcjât centenârs di marcjis di modui plans. I guviers dai Paîs disvilupâts a àn incjadreât comissions di esperts cul compit di scrivi normis che a favorissin il cumierç, il rispjet dal ambient e la sigurece dai lavoradôrs e dai utilizadôrs, e istruzions su lis provis di davuelzi pe emission dai certificâts di garanzie sui prodots. Chestis normis, in ambit eletrotecnic, a son cognossudis cul acronim CEI EN/IEC (CEI par Comitât Eletrotecnic Italian, EN e je une sigle volude dal CENELEC che al sta par Comitât European di Standardizazion Elettriche e IEC par Comission Eletrotecniche Internazionâl). Inte vuide CEI 82-25 o cjatìn, tra l'altri, indicazions e formulis par verificâ se la funzionalitât e lis cundizions minims di prestazion di un implant a son sodisfatis.

Chestis operations a son in gjenerâl clamadis verificchis technichis e funzionâls. In particulâr il valôr di prestazion o eficiencie, cualchi volte e in maniere improprie clamade rindiment², al ven calculât metint intes formulis stabilidîs de norme i valôrs otignûts des misuris des grandecis ambientâls e elettrichis, e in plui il valôr di potence nominâl dal implant declarât dal costrutôr. Lis operations di misure des grandecis ambientâls, in particulâr la radiazion solâr e la temperadure, a domandin di doprâ un solarimetri e un sensôr di temperadure, poiant sul plan dal modul il prin e tacant sot dal modul il secont.

Si capis di bot che la procedure standard di misure de radiazion e riuvarde i modui plans e no pues jessi trasferide su superficiis cilindrichis che a ricevin no sôl la radiazion direte dal soreli difondude dal cîl, ma ancje chê rifletude de cuvierture dal capanon (clamade component di *albedo*). Te Figure 2 o viodìn i cilindris sistemâts a formâ un panel e tignûts a une cierte altece de base dal cuviert e inte Figure 3 un cilindri sot de lûs dal soreli che al ven investît di radiazion direte (rais cun direzions paralelis), difondude (rais cun direzions casuâls) e rifletude.

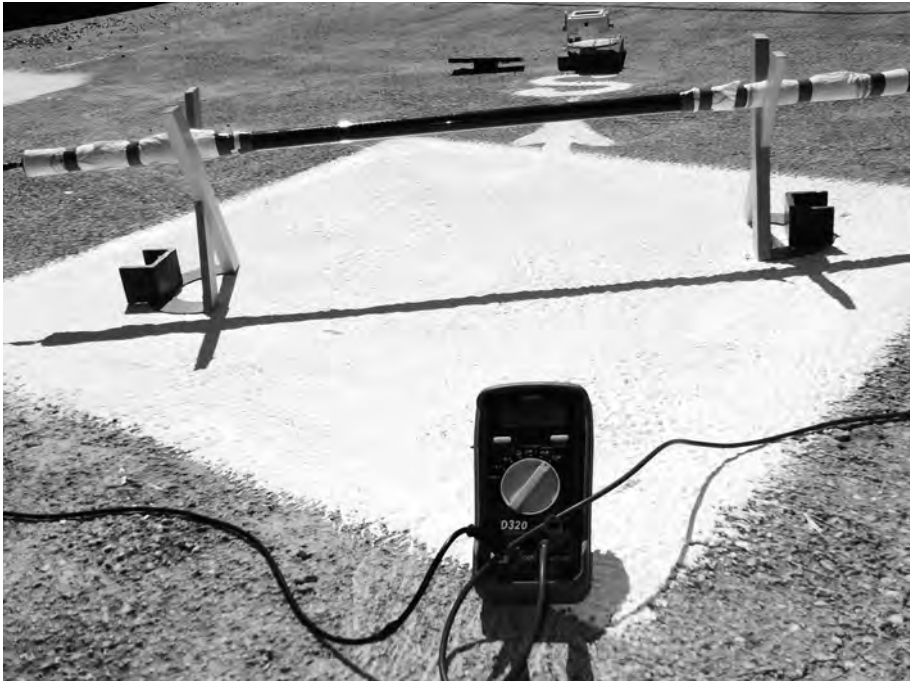


Figure 1.

Intal sfuei des specificis technichis dal modul Solyndra si cjate, inve-
zit, dentri de liste des certificazions, ancje la norme internazionâl IEC
61646 (recepide in Italie e in Europe zontant la sigle CEI/EN), une mi-
sure standard di prestazion otgnude metint dentri de cjamare scure di
un simuladôr solâr il modul plan, cristalin o a film sutîl, denant di une
batarie di lampadis a lûs solâr.

Lant daûr de directive de norme CEI 61646 e aplicant lis formulis de
CEI 82-25, no podin otignî un risultât positîf di colaut, e di fat il solari-
metri al misure dome la radiazion che e cole sul plan tangent $a - a$ (in-
tal câs particolâr de Figure 4 il plan al è stât posizionât in perpendicolâr
ae radiazion) e no chê distribuide su dute la superficie laterâl dal cilin-
dri, cence considerâ che la radiazion e cole suntune superficie semicilin-
driche in mût diviers rispjet a une plane.

Par dutis lis considerazions che a vignaran fatis plui indenant si da
cualchi informazion su la fisiche, la tecnologjie e i dâts di implant.



Figure 2.

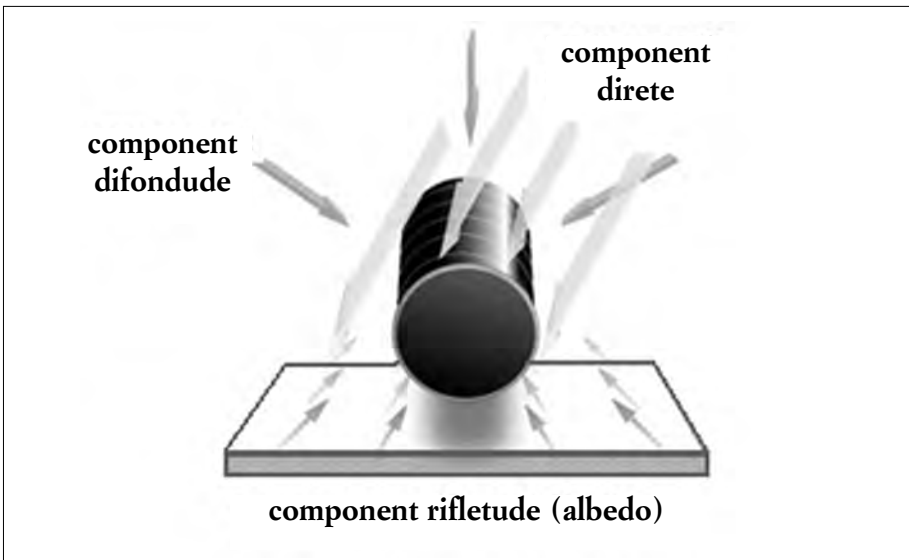


Figure 3.

Il model di propagazion de lûs fondât sui postulâts de otiche gjeometriche si preste ben a lis finalitâts di chest lavôr. Seont chest model lis sorzints di difusion des ondis eletromagnetichis secundariis dal front de onde principâl plane e di fase costant a puedin sei sostituïdis des liniis dretis che o clamìn rais. Considerât che pes aplicazions dentri de atmosfere il soreli e je une font al infinît, i rais che a colin suntune cualsisei superficie su la tie-re a puedin sei considerâts paralêi e uniformementri distribuïts intal spazi.

Il studi de propagazion de lûs intai gâs e de incidence su lis superficiis al considere altris fenomens come la difusion, la riflessione, la rifrazion e la difrazion. Chestis proprietâts de lûs a puedin sei spiegadis ben cul model a rais e i prins trê a jentraran intes considerazions dai paragrafs seguitîfs. Invezit la difrazion, ven a stâi la proprietât des ondis di involuçâ l'ostacul e la conseguente dispersion di lûs daûr dal ôr e pues sei trascurade, che al è ce che il nestri voli par solit al percepîs, ven a stâi une linie nete di division tra la zone inluminade e chê in ombrene.

La tecnologjie Solyndra e derive de costruzion des lampadis fluorescentis. Ogni cilindri al è fat di doi tubui, un dentri di chel altri. Su la superficie laterâl externe dal tubul interni a son stadis rigjavadis 200 celis FV di CIGS dut ator de superficie laterâl dal cilindri³. Parsore des celis al è stât depositât un strât di un particolar "agent otic" che al concentre la lûs che e scjame zontraviers il spessôr dal tubul plui esterni. Ogni tubul al è sigjilât cun veri e metal cuintri de umiditât, un agent che se al jentre a contat cu la cele al va a decessi la prestazion, e fissât rigjidementi intal panel. Ogni panel al à dentri 40 cilindris metûts a une altece di sù par jù mieç metri dal cuviert.

Il principâl dât tecnic di riferiment di un panel e je la potence di pic o nominâl⁴. Sul capanon Hessiana e ven calcolade semplicementri adizionant lis singulis potencis nominâls di ogni panel (o matricj) scritis intal sfuei dai dâts tecnis furnît dal costrutôr; intal nestri câs di studi sun-tun numar di paneli $N_m = 576$ di $P_n = 200$ W par panel o tirîm fûr une potence nominâl di cjamp FV di $P_{n,fv} = 115,2$ kW.

Intai paragrafs seguitîfs al vignarà stimât, par prin, il rapuart tra cuantitât di radiazion globâl di soreli che e cole sul panel plan e la cuantitât

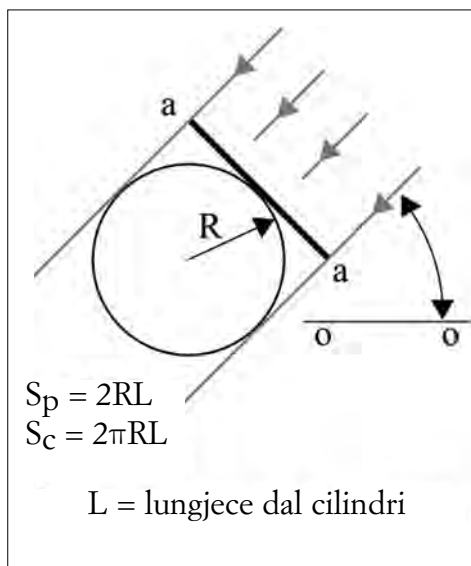


Figure 4.

che si distribuì sul cilindri di superficie ecuivalent; po dopo si furnìs una justificazion teoriche dal valôr stimât; ae fin a vignaran discutûts i risultâts sperimentâi gjavâts des provis di laboratori e dal colaut sul implant.

2. Valutazion dal metodi di misure de radiazion solâr e stime de difference tra la misure su superficie plane e cilindriche. In gjenerâl une superficie FV sot dal soreli e ven inradiade di trê components di lûs: direte, difondude e rifletude. La direte e je formade dai rais dal soreli, la difondude e ven dal cîl (e dai nûi) e la rifletude di elements che a rifletin la lûs (aghe, vegjetâi, costruzions, e v.i.). In dutis lis considerazions che o fasarìn plui indenant o trascurarìn la riflessione e l'assorbiment di lûs di bande dal veri di protezion.

I cilindris a son stâts orientâts te direzion soreli jevât (est) viers soreli pognet (ovest) e paralêi ae superficie de cuvierture; chest par otignî una distribuzion de lûs uniforme dilunc des diretories dal cilindri vie pe zornade, ven a stâi cui rais di soreli che a colin sul cilindri cu la instesse inclinazion dilunc di ogni diretorie⁵.

Si rindin cont sul plan intuitîf che un modul plan FV al presente, considerant dome la component direte e difondude de radiazion, une eficiencia di conversion plui grande di chê dal cilindri di superficie avuâl e costruît doprant l'instès materiâl fotosensibil. Di fat il semicilindri in ombrene al ven investît di une cuantitât di lûs, rifletude dal cuviert, inferiôr ae cuantitât di lûs che e larès a colâ suntune superficie plane de instesse estension metude sul plan cuintri soreli. O justificin cheste intuizion considerant il câs limit di un cilindri isolât: la component direte di intensitât I che e finis sul semicilindri, part in ombrene (omb) e part inluminât (inl), rifletude dal cuviert si sorepon e si some a chê direte di mi-diesime intensitât che e cole sul semicilindri cuintri soreli dome intal câs ideâl di superficie rifletent perfetementri specular (Figure 5).

Ma intal câs reâl il cuviert in part al supe la radiazion e in part le dispiert in dutis lis direzions (Figure 6) e di fat un cuviert nol è un spielî tant che un lâc di montagne che al riflet dute la component di lûs direte e difondude intune biele zornade di soreli, tant al è vêr che il paisaç des monts ator dal lâc al ven rifletût tâl e cuâl il reâl. Cun di plui il cilindri nol è isolât ma la superficie de cuvierture e ven disegnade des ombrenis dai cilindris metûts un dongje di chel altri e chest al ridûs la superficie

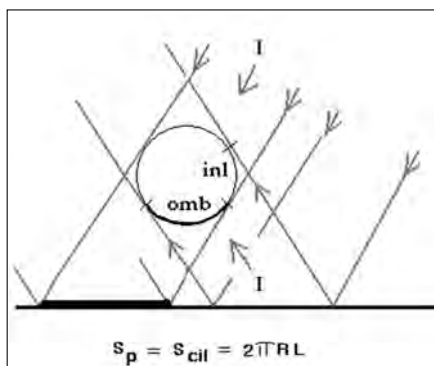


Figure 5.

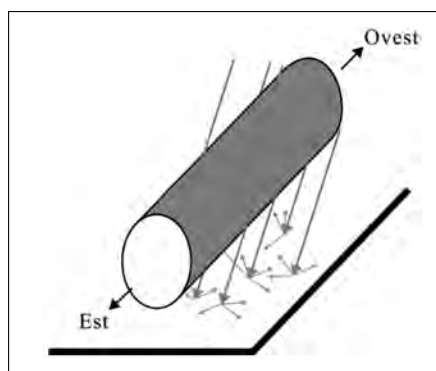


Figure 6.



Figure 7.

nete rifletent (viôt te Figure 7 i cilindris intune situazion di laboratorî sot dal soreli). A rinfuarç de intuizion viodin di fâ cualchi resonament operatîf e cuantitatîf su la misure di efficienze considerant il semicilindri FV sot dal soreli e cul solarimetri poiât sul plan $a - a$ (viôt la Figure 8). La prime osservazion e ven di bot a pene che si considere che la superficie semicilindriche sot dal plan tangent $a - a$ dal cilindri di rai R e je plui grande de superficie plane che e sta parsore e duncje la densitât di potence misurade su la superficie plane tangent al cilindri e je superiôr ae densitât dal semicilindri che i sta sot⁶.

Considerin alore un bon indizi stimâ la riduzion percentuâl de densitât di potence dal plan tangent ae superficie dal semicilindri su la base dal rapuart tra lis dôs superficiis.

Calcolin il rapuart tra lis dôs superficiis che al risulte: $(S_c/2)/S_p = \pi/2$.

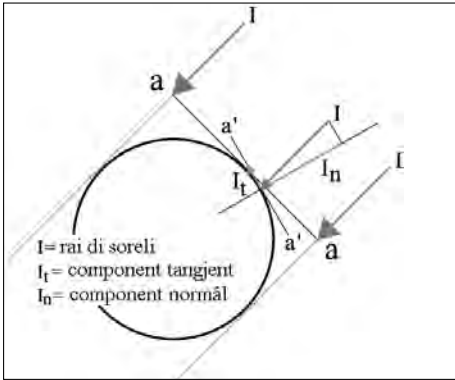


Figure 8.

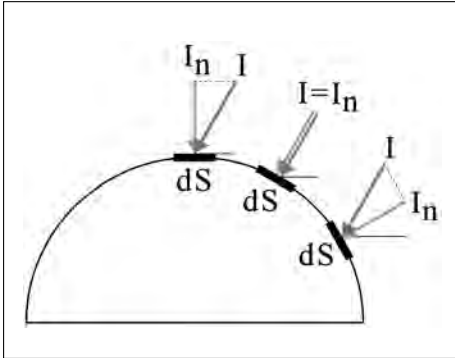


Figure 9.

No pođin considerâ chest un coeficient di aplicâ al rapuart tra lis densitâts di potence se o resonin che la riduzion di densitât di potence si riferis aes components perpendicolârs al plan $a - a$ e $a' - a'$. Di fat il rapuart a pe-ne calculât $(S_c/2)/S_p$ nol è proporzionâl al rapuart tra lis densitâts di radiazion direte $(I/S_p)/(I_n/(S_c/2))$ e alore al ven di bot che il rapuart tra lis intensitâts I/I_n nol è unitari ma $I \geq I_n$ (la tangjent I_t al plan tangjent $a' - a'$ e sbrisse vie di une quantitât che e dipint de inclinazion dal rai di soreli par ogni superficie elementâr dS) (Figure 9). Un calcul par rindi cont quantitativementri, seont une leç analitiche precise, de variazion di I rispjet a I_n al è stât fat e al vignarà utilizât intun prossim paragraf.

Par intant se o fasìn l'assum che la part dal semicilindri che e sta te ombrene, ven a stâi de bande contrarie al semicilindri cuintri dal soreli, no ricevi nissune des trê components (rifletude, direte e difondu-de), alore la misure de riduzion percentuâl di intensitât di radiazion passant dal plan tangjent $a - a$ di superficie S_p ae densitât distribuide su la superficie dal cilindri S_c si pues calculâle cu la formule:

$$\Delta J\% = [I/S_p - I_n/(S_c/2)]/(I/S_p) \cdot 100 \quad (1)$$

Se o trascurin dal dut la pierdite di component tangjent su la superficie dal cilindri in duj i ponts de superficie ($I = I_n$) o cjatìn, fats i calcuri, il valôr percentuâl dal 36,3% cirche.

Se invezit o fasìn l'assum di considerâ un cilindri ideâl isolât di rai tant grant di podê pensâ la superficie dal cilindri praticementri plane (al limit $S_p = S_c/2$ e di consequence $I = I_n$) alore, banalmente, no si verifiche nissune diminuzion di densità di radiazion, ven a stâi o cjatin un risultât di 0% di diminuzion percentuâl.

Vint calculât i doi valôrs limit o podìn trai in struc la conclusion: il valôr percentuâl di riduzion di component direte, passant dal plan $a - a$ al semicilindri

sot dal plan, misurate cuntun solarimetri poiât sul plan e cul assum di trascurâ la riduzion de component di radiazion direte passant dal plan $a - a$ al semicilindri a cause de pierdite de component tangjent, no je superiôr dal 36,3% cirche, ven a stâi che il valôr percentuâl di densità al svarie dentri dal interval:

$$0 < \Delta J\% < 36,3\% \quad (2)$$

Plui inlà o larìn a justâ il limit superiôr di (2) tignint cont di chel che o vin trascurât, vâl a dî la riduzion de component direte passant dal plan al semicilindri, la component difondude dal cîl e par ultin, ma no di sigûr mancûl impuartant, la component di albedo sul semicilindri in ombrene.

A chest pont fermînsi par cualchi rie par une precisazion: intal procès di misure in laboratori un modul al ven interessât dome de component direte di lûs, invezit sot dal soreli il modul al cjape sei la component direte che la difondude. Viodìn alore di cjapâ in considerazion lis proprietâts e la incidence su la produtivitât FV de component difondude⁷. La radiazion difondude e ven dal cîl e in part e je rifletude de cuverture (Figure 10).

La component difondude de lûs e pues sei paragonade al moviment disordenât des cjariis eletrichis dentri dai condutôrs e semicondutôrs: cussì co-

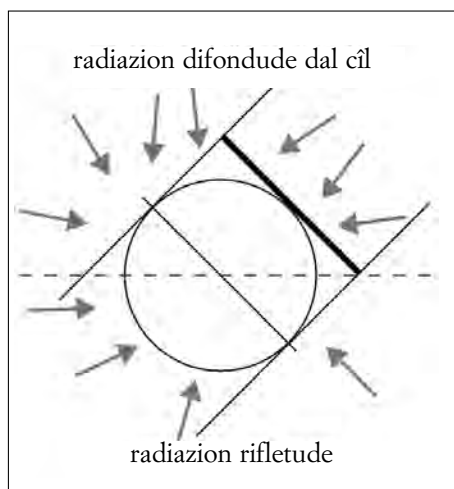


Figure 10.

me i puartadôrs di cjarie eletriche cence un cjamp eletric si movin in maniere casual dentri de materie, cussì a fasin i fotons de lûs difondude in atmosfere. Se si puedin scrivi elegantis ecuazions par spiegâ un moviment ordenât di parteselis, e di fat si poiârìn sul metodi gjeometric par studiâ la propagazion de component direte de lûs tal aiar, o vin di fidâsi dai dâts statistics cuant che o vin a ce fâ cul moviment casual di grandis popolazions di parteselis che si movin in maniere disordenade.

Si proponin alore di stabilì la percentuâl di ripartizion de component difondude fra lis dôs semicirferencis sot e parsore dal plan tangjent $a - a$. O considerin il câs ideâl di un cilindri isolât par sghindâ il probleme de influence des ombrenis su la riflessione, cun di plui par dutis lis considerazions che a vignaran daurman o considerin la condizion ambientâl ideâl cuntun cîl seren e libar di nûi, ven a stâi lis condizions che si volarressin cjatâ par un colaut di implant FV.

Strenzin par prin la nestre analisi ae singule *superficie semicilindriche cuintri soreli*. Si domandin se o cjatìn diferencis di intensitât di lûs difondude metint a confront une superficie cilindriche cuintri soreli e une plane ecuivalent in estension.

Inte Figure 11 al è mostrât un câs particolâr di riduzion de component normâl passant dal plan $a - a$ al plan tangjent $a' - a'$ di une radiazion di intensitât I gjeneralmentri inclinade sul plan $a - a$. Se o considerin dilunc de semicirconference dal cilindri sot dal soreli il rapuart fra la component normâl $I_{n,p}$ sul plan $a - a$ e la normâl $I_{n,c}$ dilunc de instesse direzion dal rai di soreli relative al plan $a' - a'$ o viodìn che par une inclinazion $\alpha < 90^\circ$ al seguìs $I_{t,p} > I_{t,c}$ ($I_{n,p} < I_{n,c}$) e il risultât contrari se $\alpha > 90^\circ$, ven a stâi $I_{t,p} < I_{t,c}$ ($I_{n,p} > I_{n,c}$). Il teoreme in note⁸ nus puarte a ritignî che la component normâl di lûs difondude che e cole vie pe zornade sul plan tangjent $a - a$ e sul semicilindri $a' - a'$ cuintri soreli e sarâ tendenzialmentri la instesse: $D_{inl} \cong D_p = D_c$.

In condizions di cîl cuviert i fotons di lûs a colin su lis dôs superficiis in dutis lis direzions, e duncje no je nissune reson par pensâ che i fotons a vedin preference pe superficie plane pluitost che par chê cilindriche e partant la conclusion disore e ven confermade in maniere inmò plui strente.

Considerin il semicilindri che al *disegne la ombrene su la cuvierture* (viôt la Figure 1 parsore). La lûs difondude che no cole sul cilindri cuin-

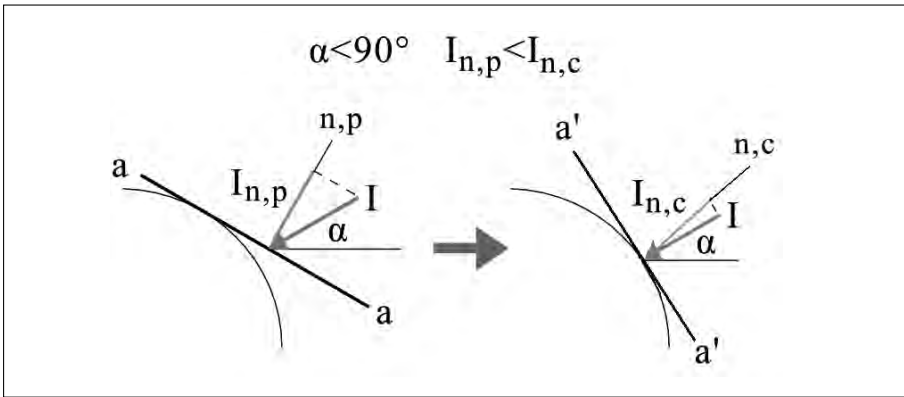


Figure 11.

tri il cîl si spant su la cuvierture dal capanon. Cheste component di albedo D_{alb} no pues sei plui grande de lûs difondude che e colarès su la superficie dal cilindri se e fos metude cuintri soreli. Par assurt se cussì e fos la cuvierture dal capanon e produsarès un efiet concentrazion, ma chest nol è pussibil. Cun di plui, se o considerìn che la superficie dal cuviert e supe part de radiazion e no riflet specularmentri, o podìn concludi cun chest principi: *la component difondude totâl e podarà al plui svicinâsi al valôr globâl de densitàt D che e larès a colâ su la superficie plane ecuivalent in estension ae superficie laterâl dal cilindri:*

$$D < D_{inl} + D_{alb} \quad (3)$$

Par decessi la difference $\Delta D = D - (D_{inl} + D_{alb})$ l'instaladôr al racomande di piturâ di blanc la superficie sot dai cilindris. Di fat il costrutôr, su la base di sôs valutazions, al declare un recupâr dal 15% al 20% di radiazion globâl rispjet ae superficiis neris⁹.

Fin chi o vin considerât la intensitàt de lûs ator dal cilindri. Viodìn, cumò, di considerâ il *cjamin de lûs dentri dal cilindri*. Al è za stât dite che il cilindri Solyndra al è fat di doi tubui: un esterni di veri e un interni cuviert di un concentradôr otic depositât parsore dal strât fotosensibil di CIGS. Prime dal concentradôr otic, il veri dal tubul esterni al davuelç une parziâl concentrazion de lûs par efiet de rifrazion, ven a stâi un fenomen di "dreçament" dal rai di soreli che al passe di un mieç a un altri

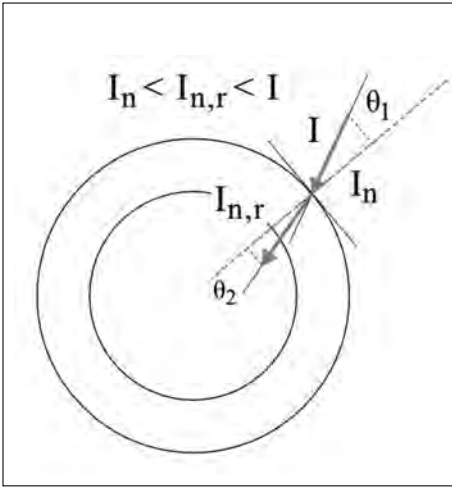


Figure 12.

di diverse densità, intal nestri câs aiar-veri. Chest efiet di dreçament al va naturalmentri a zontâsi cun chel dal agent otic in ogni moment de zornade. La concentrazione alore e va a inçessi la prestazion di une cele FV (la potence unitarie e ven concentrate suntune superficie plui piçule), consequence de minôr riduzion de component normâl e duncje di une pierdite minôr di component tangent ($I_{n,r} > I_n$ inte Figure 12).

Sot di chest aspjet il cilindri FV si compuarte tant che un in-

seguidôr solâr passîf ançe se il so rindiment al restarà simpri une vore inferior a chel di un inseguidôr dinamic.

La declarazion de Solyndra che un dai vantaçs dai cilindris al è chel di produci l'efiet inseguiment dal soreli cence argagns in moviment e je parzialmentri vere cun riferiment al inseguidôr dinamic (che al manten continuativementri la relazion di avualità $I = I_n$) in oris ator dal misdì ma si slontane cun rais inclinâts de bande soreli jevât a soreli pognet.

Rispiet ai sistemis ecuivalentis a modui plans cence concentradôrs la concentrazione e influence sei la produzion di energjie sei la prestazion. La curve di potence e risulte plui plate a pet dai modui cence concentrazione che a presentin un pic, e la variazion di $\Delta J\%$ in (2) si sposte viers dal zero.

Fasìn un poçje di stime quantitative cun riferiment ae sole rifrazion. L'angul di rifrazion θ_2 al ven rigjavât de leç di Snell e al dipint dal angul di incidence θ_1 : $\text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2 = n_{12}$ cun coefficient aiar/veri $n_{12} = 1,55$. Dut câs il calcul integrâl de variazion de component normâl par cualsisei inclinazion α dal rai di soreli sul plan dal orizont ae latitudin di Talmassons (dulà che si cjate l'implant) jenfri i doi solstizis ($21^\circ < \alpha < 67^\circ$) e dut dilunc de circonferenze par ogni dât valôr di $J = f(\alpha)$ al è dât de formule:

$$\Delta J = J - \iint \cos(\arcsen[1/n_{12} \text{sen}(\theta_1(\alpha))]) da \quad (4)$$

e chest al vûl dî che la variazion $\Delta J\%$ si sposte viers il limit inferior ma no deventarà mai zero. Cun posizion dai rais di soreli ator dal misdî la variazion e ven di cualchi pont percentuâl.

O traîn ae fin la conclusion sul plan intuitîf, ma justificât dal calcul e dal metodi de otiche geometriche, cun chest enunciât: *la densità di radiazion solâr globâl su la superfice di un cilindri FV esponût al soreli dilunc de diretorie est-ovest (estensibil a cualsisei altre diretorie) e je minôr de radiazion globâl intercetade di une superfice plane di estension avuâl e in cualsisei condizion meteorologjiche.*



Figure 13.

Dut al sta a stabilî une misure plui precise di cheste riduzion.

3. La verifiche tecniche funzionâl daûr de norme CEI. La norme CEI 82-25 e stabilis une suee minime di eficiencie di un implant FV dal 75% par une intensità di lûs di soreli di almancul 600 Wm^{-2} . Il concet di eficiencie globâl di un implant FV al mostre trope potence di lûs che e ven trasformade in eletriche. A mont dal grup di conversion de corint eletriche di continue in alternade (cc/ca), clamât comunementri *inverter*, la eficiencie e met a confront la potence nominâl dal implant cu la potence di lûs.

Stant il fat che un implant al è un sisteme fisic liniâr, la eficiencie dal implant FV e pues sei ripuartade ae potence dal cilindri Solyndra considerât tant che une batarie solâr cui segns eletrics tai doi cjaveçs (Figure 13).

Il costrutôr Solyndra al certifiche intal sfuei tecnic une potence nominâl par ogni panel di $P_n = 200 \text{ W}$; il calcul de eficiencie al ven dât alore de formule:

$$\varepsilon \% = [P_n / (N \cdot S_c)] / G_{\text{STC}} \cdot 100 \quad (5)$$

cun $N = 40$ numar di cilindris, $G_{\text{STC}} = 1000 \text{ Wm}^{-2}$ valôr de intensità in condizions standard misurade sul plan, $S_c = 3,14 \cdot 2R \cdot L$ (cun $2R = 2,2 \text{ cm}$

il diametri; $L = 100$ cm la lungjece) la superficie dal cilindri; dai calcui o cjatìn un valôr di eficiencie di $\varepsilon\% = 7,24\%$ une vore distant de eficiencie STC di un modul cualseise a film sutîl.

Il costrutôr nol à metût in clâr il dât di eficiencie di laboratorî des celis CIGS e tant mancûl la eficiencie dal modul, ma la letérature tecniche e mostre un 13% di eficiencie di cele e ancje plui¹⁰. Cun chest dât ultin o misuraressin une variazion di eficiencie dal $44,3\%$ cirche che al è plui dal valôr massim dal interval (2), cuntun scart rispjet al valôr precedent di un $\varnothing = 44,3\% - 36,3\% = 18\%$. Considerât che la (2) no considere il semicilindri in ombrene o vin motîf di justâ la (2) al gnûf interval:

$$0 < \Delta J\% < 44,4\% \quad (6)$$

Se o rigjavìn dal valôr di eficiencie no cognossût il valôr dal limit superiôr di (6) o otignìn il valôr di eficiencie dal 12% , dongje di chel declarât dai costrutôrs di film sutîl.

Fûr des condizions STC si sostituìs a G_{STC} il valôr misurât G : $0,6 G_{STC} < G \leq G_{STC}$ e la formule (5) alore e devente:

$$\varepsilon\% = [P_n / (N \cdot S_c)] / G \cdot 100 \quad (7)$$

dulà che P e je la potence eletriche convertide.

Seont i resonaments disvilupâts intal paragraf precedent la radiazion misurade dal colaudadôr su la superficie dal cilindri disvilupade sul plan e je inte realtât superiôr ae intensitât di radiazion che e cole su la superficie cilindriche. Ma se la potence reâl si pues facilmentri misurâ cu la strumentazion in dotazion al colaudadôr, cul solarimetri nol è pussibil misurâ la radiazion globâl che e cole su dute la superficie dal cilindri intes condizions standard proviodudis de norme CEI scrite pai modui plans.

O podìn capî il motîf de impossibilitât di superâ la suee di eficiencie (la norme CEI 82-25 le clame rindiment) ricjapant lis dôs formulis dal software de unitât di elaborazion doprade dal colaudadôr intes misuris stabilidîs par un colaut, cussì come che a son ripuartadis de norme:

$$P_{cc} > 0,85 P_n \cdot G_p / G_{STC} \quad P_{ca} > 0,9 P_{cc} \quad (8)$$

dulà che si lei:

- P_{cc} potence (in kW) misurate in jessude dal gjeneradôr FV, cuntune inciertece di no plui dal 2%;
- P_{ca} potence ative (in kW) misurate in jessude dal grup di conversion cuntune inciertece di no plui dal 2%;
- P_n potence nominâl (in kW) dal gjeneradôr FV, calcolade somant lis singulis potencis dai panei come che al risulte dal sfuei tecnic dal costrutôr;
- G_p intensitât di soreli (Wm^{-2}) misurate sul plan dai modui cun inciertece su la misure dal sensôr solâr a celute FV di no plui dal 3% e cun inciertece di misure su la tension di jessude di misure dal sensôr a cele termoeletriche di no plui dal 1%;
- G_{STC} (I_{STC}) intensitât di soreli (Wm^{-2}) in STC.

Daûr de interpretazion de CEI 82-25, te (8) la prime formule e calcole il valôr dal rindiment η_{cc} sul lât de continue e la seconde il rindiment η_{ca} sul lât alternade. Inmò la formule e mostre a clâr che la verifiche e fale se il valôr dal prodot dai fatôrs $P_n \cdot G_p$ al è plui grant di chel reâl misurât. Par validâ la disavualitât al è necessari decessi il prodot.

Il prin fatôr nol pues sei modificât parcè che al è certificât, e alore par verificâ la formule o vin di decessi il valôr G misurât dal solarimetri sul plan. Partant il valôr di variazion percentuâl di radiazion globâl di meti drenti de formule si cjate gjavant de radiazion globâl misurate sul plan la percentuâl di intensitât di lûs che no prodûs efiet FV, ven a stâi la percentuâl di radiazion di soreli che no jentre intal cilindri.

Intai doi paragrafs seguitîfs o larin a disvilupâ considerazions sei teorichis che praticis par calculâ la radiazion efetive che e prodûs efiet FV.

4. Metodi teoric pal calcul de variazion di distribuzion de radiazion globâl di une superficie plane a une cilindriche. Il rindiment di un implant FV al dipint de esposizion al soreli dal sît, e duncje la prestazion di un element FV e dipindarà de ore, de zornade e des condizions atmosferichis. Dutis lis considerazions a seguî a vegnin fatis pensant a une situazion ambientâl plui dongje pussibil ae condizion STC di laboratori, ven a stâi cîl seren cence nûi, umiditât relative trascurabil, temperature frescje e nancje une bave di aiar. Chestis condizions a son raris e a fasin pensâ al “Paradîs in Tiere”, pardabon! Si capîs alore che lis operazions di colaut a son ativitâts pe plui part scritis su la cjarte o metudis in vore

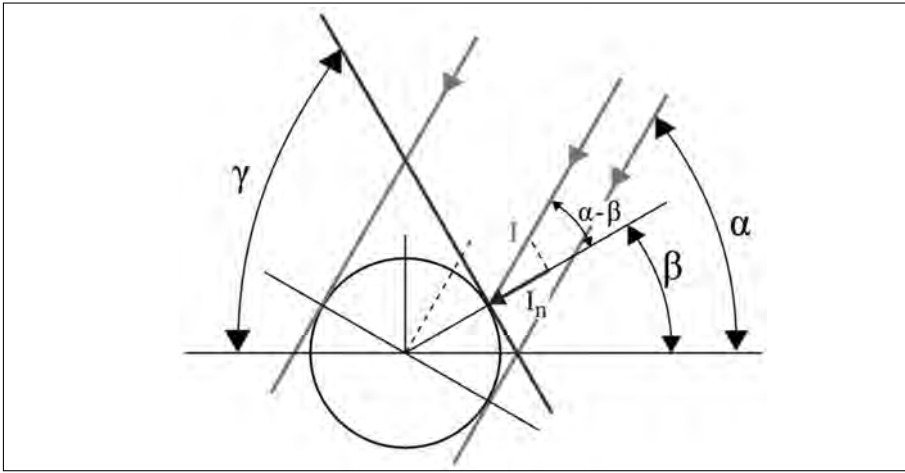


Figure 14.

di necessitât intal câs di contestazion dal proprietari cuintri de imprese parcè che la produzion previodude no je otignude inte realtât.

Chi daûr al ven disvilupât un procediment analitic pal calcul dal valôr plu probabil dentri dal interval di inciertece dât di (6).

Al è bielzà stât scrit che la radiazion solâr globâl e ven dade dal contribût di trê components: direte (I), difondude (D) e di albedo, o rifletude (R):

$$G = I+D+R \quad (9)$$

dulà che o intindìn cun G la radiazion globâl a nivel di tiere.

O considerìn par prime la radiazion solâr che e cole sul semicilindri *cuintri soreli*.

Calcu e considerazions si poin su chescj ponts:

- il valôr de component direte I_n che e jentre normalmentri ae superficie dal cilindri al ven calcolât cuntun procediment integrâl numeric doprant un sfuei di calcul (viôt Figure 14);
- si è trascurade la incidence de component di albedo su la part iluminade;
- la component direte I_n si manten costant par dute la diretorie dal cilindri gjavadis lis estremitâts dulà che si cjate une variazion di cualchi pont percentuâl, che si pues trascurâ dal dut inte economie dal nestri discors. Prin di fâ ogni altri pas indenant viodìn di fâ cualchi considerazion.

In linie di principi la superficie FV no je inradiade di lûs direte uniformementri dilunc de circonferenze e duncje il vetôr intensitât I_n al larà riferî a un valôr di superficie elementâr, piçule trop che si pues inte misure e piçule trop che si vûl intal calcul, par svicinâsi al valôr reâl e daspò procedi cuntune integrazion. La component I_n dilunc de semicirconferenze e svarie intun interval di valôrs che a van di un valôr nul in corrispondence de estremitât dal diametri (intal pont di tangjence dal rai cu la circonferenze) e un valôr massim inte situazion particolâr che si verifiches cuant che la direzion dal vetôr I si sorepon ae direzion di I_n ($I = I_n$).

Lis formulis pal calcul de component normâl de intensitât di potence distribuide su la superficie dal cilindri FV inluminât a son in note¹¹. La simulazion e da par ducj i angui di inclinazion dai rais solârs une riduzion di cirche il $\Delta I = 36\%$, in pratiche l'instès risultât burî fûr calcolant la variazion di densitât $\Delta J\%$ cu la (1).

De ipotesi b) o rigjavìn la posizion $R = 0$ e alore la (9) e devente:

$$G = I+D \quad (10)$$

La misure de radiazion solâr sul plan tangjent, di decessi dal valôr percentuâl, e sarà calcolade posizionant il solarimetri cun angul di tilt¹² dât de formule $\gamma = 90 - \alpha$, che e je la situazion tipiche che si verifiches posizionant il solarimetri cuintri soreli.

La formule pal calcul de radiazion globâl sul plan dal semicilindri cuintri soreli, valôr che al vignarà ridusût in percentuâl, al ven a jessi:

$$G_{inl} = k_S (I+D) = k_S [k_{rid} \cdot (G-D) + D] \cong 0,23 \cdot G = 23\% G \quad (11)$$

dulà che:

- $D = k_{dif} \cdot (1 + \cos\gamma) / 2 \cdot G$, $k_{dif} = 0,2$ coeficient di difusion (viôt note⁷);
- $k_{rid} = 0,36$ coeficient di riduzion de superficie plane ae cilindriche.

Viodìn cumò di calcolâ la percentuâl di *component di albedo su la part dal cilindri in ombrene*.

Il sfuei tecnic de Solyndra al declare une component di albedo dal 23,9% a regjim¹³. Se ae dispersion de component di albedo o zontin la condizion no ideâl de cuvierture dal capanon Hessiana e altris fatôrs secundaris, chest valôr al è di ritignî un valôr limit superiôr. Sostituint inte

(9) $I+D = 0$ e scomponint la rifletude inte dôs components $R = I_r + D_r$ o otignìn:

$$G_{omb} = I_r + D_r \quad (12)$$

Se o butìn il voli ae Figure 7 o viodin che la superficie e ven disegna-
de des strichis di ombrenis dilunc vie la schirie di cilindris. Par calculâ la
cuantitât di radiazion rifletude o vin alore di calculâ trope superficie e rife-
let la lûs, ven a stâi il rapuart S / S_{omb} , tignint presint une cubie di ipotes-
is semplificativis:

- a) o trascurìn la riflessione de component difondude rifletude des strichis
di ombrenis;
- b) o considerìn plane e cence pependencis la cuvierture sot dai cilindris¹⁴.

La Figure 15 (disegnade no in scjale e cul sôl obietîf di judâ la intui-
zion) cun $h = 30$ cm e $d = 3,5$ cm e mostre une pussibil distribuzion dai
rais riflès intal cors dal an.

Sot dai cilindris lis strichis in ombrene e chês rifletints si spostin vie
pal an e ancje al cambie il rapuart tra lis superficiis S / S_{omb} . Fasin il cal-
cul dal rapuart intun particulâr timp dal an.

La superficie scure disegnade de ombrene dal cilindri si calcole facil-
mentri cu la formule $S_{omb} = 2R / \sin \alpha \cdot L$ cun $R = 1,1 \cdot 10^{-2}$ m e $L = 1$ m.
Chest valôr al ven gjavât de superficie totâl sot dai cilindris tra un e chel
altri dade de formule $S = (d + 2R) \cdot L = 5,7 \cdot 10^{-2}$ m² cirche. La percentuâl
di superficie rifletint e ven dade dal coeficient $k_{Su} = (S - S_{omb}) / S = 1 -$
 $0,386 / \sin \alpha$. O podìn zontâ la osservazion: se l'angul α al incrès, ancje
la superficie rifletint e incrès e l'incontrari¹⁵ e cun di plui, come che si
viôt inte Figure 15, no dute la component direte e ven rifletude sul se-
micilindri ma dome une part.

Cun chê di calculâ la component I_r , o tirìn la conclusion: *la riflessione
de component direte di lûs e cjararà sôl une part dal semicilindri sei a cau-
se des ombrenis sei a cause de dispersion zontraviers i barcons fra un ci-
lindri e chel prossim. Se o clamìn I la component direte di lûs rifletude di
une superficie perfetementri specular suntun cilindri isolât, e vâl cheste li-
mitazion:*

$$I_r < I \quad (13)$$

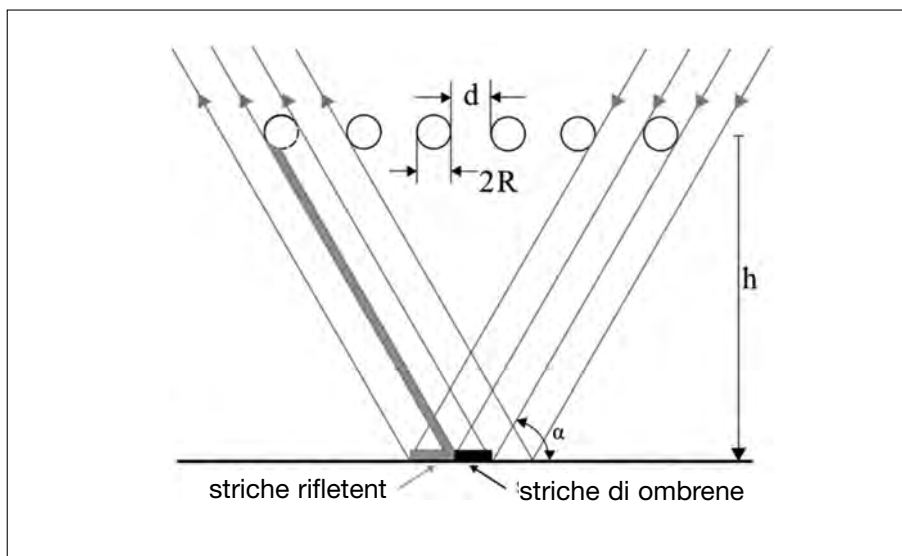


Figure 15.

dulà che I_r e je la component di radiazion direte che e cole sul cilindri esponût ae riflission.

La pierdite $\Delta I_r = I - I_r$ e dipint dal coeficient di albedo e la cuantitât di I_r e dipint de proprietât de superficie rifletint e dal angl di inclinazion dai rais di soreli. La component I_r , considerant la intensitât de radiazion riflitude proporzionâl ae superficie rifletint, e je dade de formule:

$$I_r = k_{Su} k_S (G-D) \quad (14)$$

cun $I = G-D$, valide par riflission specular. Sostituint il valôr $\alpha = 45^\circ$ (valôr corispuindint al ecuinozi ae latitudin di Talmassons dulà che $\gamma = \alpha$) o otignìn cun $k_{Su} = 0,45$ il risultât di $I_r = 0,033 G$ e in percentuâl cirche $I_r\% = 3,3\% G$.

Che altre component D_r e je dade de formule:

$$D_r = k_S k_{Su} k_{dif} \rho (1 - \cos(180 - \gamma)) / 2 \cdot G \quad (15)$$

e sostituint i valôrs $\rho = 0,7$ o rivìn al risultât di cirche $D_r\% = 0,027 = 2,7\% G^{16}$.

La component di radiazion globâl sul semicilindri in ombrene e risulte:

$$G_{\text{omb}} = I_r + D_r = 0,033 \text{ G} + 0,027 \text{ G} \cong 0,06 \text{ G} = 6\% \text{ G} \quad (16)$$

In definitive la variazion percentuâl di radiazion di parsore a sot il plan rispjet ae complessive e risulte sù par jù:

$$G_c = G_{\text{inl}} + G_{\text{omb}} = 0,23 \text{ G} + 0,06 \text{ G} \cong 0,3 \text{ G} = 30\% \text{ G} \quad (17)$$

Bisugne considerâ che la superficie plane ecuivalent ae cilindriche no intercete sul lâf posteriôr dal panel la component di albedo parcè scurît di un rivestiment protetîf, e alore par otignî la stime de G_m misurade dal totâl G o scrivîn:

$$G_m = G - D_r \cong 0,97 \text{ G} \quad (18)$$

In conclusion la variazion di radiazion globâl e ven a jessi:

$$\Delta G = G_m - (1 - G_c) = 0,97 \text{ G} - 0,62 \text{ G} \cong 0,34 \text{ G} = 34\% \text{ G} \quad (19)$$

ven a stâi che al valôr misurât sul plan o vin di tirâ vie cirche il 34% par otignî la efetive radiazion distribuide sul cilindri. Intal nestri câs o vin di misurâ, par esempi, 950 Wm^{-2} sul plan par rivâ a une radiazion efetive di 627 Wm^{-2} .

Chest esempi al è indicatîf e nus dîs che al è une vore difcil passâ la verifiche tecniche funzionâl stant che par misurâ plui di 900 Wm^{-2} a mi-sdî o vin di vê biel timp; ancje se la misure e je judade dal fat che il solarimetri al ven metût cuintri dal soreli e che al è facil cjatâ valôrs ator dai 1000 Wm^{-2} al nivel dal mâr e ae latitudin di mieze Europe. Cun di plui lis condizions de cuvierture a àn di sei une vore buinis considerât che par discuti la component di albedo o vin fat la ipotesî di disponi di une cuvierture specular. Inte realtât si svicinìn tant plui ae condizion ideâl tant plui buine che e je la cualitât de vernîs blancje rifletint spandude su la cuvierture dal capanon.

Sul puest a son stadis fatîs diviersis provis. Intune di chestis, o viodarìn, e je stade superade la suee di 600 Wm^{-2} cuntune misure di inten-

sitàt di plui di 900 Wm^{-2} sul plan dal solarimetri. I coeficients e i dâts che nus àn puartât a burî fûr un risultât dal 34% a son presumibilmente di riviodi in altris tims dal an. O zontin il fat che lis misuris intun ambient esterni a son une vore sensibils a lis grandecis ambientâls (ventilazion, umiditât e temperadure dal aiar) e a dipindin, cun di plui, dal snait dal operadôr che al à di ridusi al minim il timp di ritart tra la racuelte des misuris in automatic e la elaborazion. Il dât teorico cjatât, e confermât inte misure, al à dut câs di sei considerât di tindince, cuntun interval di erôr pindulant e no definibil a priori.

Inte prossime sezion o viodarìn che chest dât al ven tendenzialmenti confermât cun misuris fatis doprant un solarimetri circolâr costruît a pueste par tirâ sù misuris tor ator de circonferenze. La costant di leture dal solarimetri circolâr e je stade calcolade cuntun procès di taradure cuntun solarimetri campion¹⁷.

5. Metodi empiric sperimentâl pal calcul de variazion di distribuzion de radiazion solâr di une superficie plane a une cilindriche. Par stimâ sperimentalmenti la distribuzion de radiazion solâr su la superficie cilindriche al è stât costruît un solarimetri circolâr a celute FV di silici, bon di spostâsi dilunc de circonferenze par pas discrets di 15° ; a ogni pas e je stade misurade la corint cuntun multimetri e daspò convertide in intensitàt di radiazion moltiplicant la corint par une costant di conversion. I risultâts a son ripuartâts te Tabele 1.

Lis misuris a son stadis fatis intun interval di timp di cirche $15'$ (prime misure $15:50$, ultime $16:05$).

Al inizi de session di misuris il solarimetri campion al ripuartave sul plan une intensitàt di 664 Wm^{-2} e ae fin un valôr di 651 Wm^{-2} cuntune arossimazion dal $\pm 5\%$. La medie des misuris che si lein su la ultime colone e ven di $G' = 494 \text{ Wm}^{-2}$.

La tabele e je stade implenade di dâts ai 15 di Avost, duncje in Istât plene. In cheste zornade a misdì la inclinazion dai rais dal soreli sul plan dal orizont e risulte cirche $\alpha = 60^\circ$ (angul di tilt $\gamma = 30^\circ$) ae latitudin di Talmassons¹⁸.

Al è il câs di fâ une verifiche su la variazion percentuâl di radiazion misurade sul plan cun tilt $\gamma = 30^\circ$ ($G_{\text{inl}} = 971 \text{ Wm}^{-2}$) e la medie ponderade dai valôrs ripuartâts te ultime colone: $G' = 522 \text{ Wm}^{-2}$. Si cjate une

Tabele 1. Misuris di intensitât di lûs dilunc de circonference.

numar di misuris	inclinazion de celute	corint di curt circuit	intensitât radiazion su la celute	temperadure costant di leture dal solarimetri circolâr: $k = 2,75 \text{ mA}/(\text{Wm}^{-2}) \pm 10\%$ as dal cilindri est-ovest	temperadure dal aiar $T = 36^\circ\text{C}$
N	grâts	Isc(mA)	Wm⁻²	NOTIS	
1	0	313	861		
2	15	345	949		
3	30	353	971		
4	45	357	982		
5	60	343	943		
6	75	309	850		
7	90	281	773		
tot		6328	G' (Wm ⁻²) medie	904	
1	105	234	644		
2	120	193	531		
3	135	149	479		
4	150	161	454		
5	165	174	443		
6	180	165	429		
tot		2959	G' (Wm ⁻²) medie	497	
1	195	156	410		
2	210	148	407		
3	225	135	371		
4	240	123	338		
5	255	110	303		
6	270	100	275		
tot		2123	G'(Wm ⁻²) medie	351	
1	285	81	223		
2	300	77	212		
3	315	61	168		
4	330	57	157		
5	345	135	371		
tot		1130	G'(Wm ⁻²) medie	226	

variazion percentuâl di cirche il 46% cuntune deviazion dal valôr teoric calculât in (19) di cirche il 26%. Cheste deviazion evident rispjet al valôr teoric si sbasse se o considerin che la component di albedo de cuviertu-

re no je otimâl ($\rho < 0,7$) e la costant di leture dal solarimetri¹⁹ te Tabele 1 e je plui dongje dal valôr minim $k - 10\% k$. Di fat cun chest ultin valôr il dât dal 26% al vignarès sù pat jù la metât.

Se invece o fasìn une stime su la variazion percentuâl des misuris sul semicilindri inluminât e chel in ombrene, ven a stâi sui doi intervai:

$$\begin{aligned} \text{semicilindri inluminât } 330 < \alpha \leq 120 \text{ (0)} \\ \text{semicilindri in ombrene } 120 < \alpha \leq 330 \end{aligned}$$

cun $G_{\text{inl}} = 686 \text{ Wm}^{-2}$ cirche il valôr medi calculât sul prin interval e $G_{\text{omb}} = 353 = \text{Wm}^{-2}$ calculât sul secont, o otignìn il valôr di cirche 48,5%. Se, di chê altre bande, o calculin la difference fra $G_{\text{inl}} = 23\% G$ calculât in (11) sul semicilindri inluminât e il $G_{\text{omb}} = 6\% G$ sul semicilindri in ombrene dât di (16), o cjatìn une variazion percentuâl dal 73,9% cuntune difference di variazion dal 34,4%. Cheste variazion si spieghè facilmentri a pene che o considerin che i valôrs in tabelle a fasìn riferiment a un cilindri isolât e che nol cjape ombrenis come che al sucêt inte realtât, dulà che i cilindris a son metûts adun intun panel a ristiel.

A chestis considerazions ur podin zontâ ancje une cubie di altris. Il procès di integrazion sperimentâl al è distant une vore dal procediment matematic (o vin considerât 24 pas cuntune placute di silici che e cuvierç un poligon esagonâl): un numar di pas plui grant al permetarès une misure plui precise. Cun di plui, bisugne considerâ che la corint fotoinduse e dipint dal spetri di lûs e, se la component direte e à dutis lis frecuencis di radiazion di un cuarp neri, la lûs rifletude e à un spetri diferent daûr di ce porzion dal spetri che e ven supade de cuvierture. Di chê altre bande ancje il nestri procediment teorico al presente limits stant che si fonde su dâts statistics; in particolâr la component di albedo e ven da cunctun valôr statistic che al pues variâ une vore in riferiment a lis proprietâts di rifletance de cuvierture.

6. Procedure di verifiche tecniche funzionâl. Colaut. Un implant FV inte sô architettura plui semplice al è fat di dôs sezions: la seziun in corint continue (cc), dulà che e ven la conversion de potence di lûs in potence eletriche, e la seziun di conversion de potence continue in corint alternade (ca).

Prime dal colaut²⁰ o vin fat une verifiche preventive: o vin colegât une



Figure 16.

cubie di pinzis amperometrichis e voltometrichis in jentrade (lât dc) e une cubie in jessude (lât ac) dal inverter colegât al cjamp FV posizionât bande soreli pognet²¹.

La misure de intensitât de radiazion e je stade fate in doi timps: prime e je stade misurade la radiazion solâr cuintri soreli e daspò dentri de stanziute dulà che a jerin i doi grups di conversion (inverters), là che o vîn poiât il solarimetri campion furnît de Dite proprietarie sot di une lampade al xen. Il piranometri al è stât montât suntun dispositîf a plan mobil (Figure 16) in mût di modificâ l'angul di inclinazion e/o la altece dal plan de lampade e duncje la intensitât di radiazion sul sensôr.

Daspò vê misurade la intensitât di radiazion direte cuintri soreli e tal viert, o vîn posizionât il piranometri sot de lampade al xen e diminuît a man a man il valôr misurât. I valôrs otignûts a vignivin di volte in volte trasmetûts a une unitât di elaborazion che e presentave il risultât dal test suntun visualizadôr.

Par rivâ a verificâ il superament de prestazion globâl dal 75% al è coventât ripeti lis misuris plui voltis. Il superament dal test di laboratori e je stade la prove dal assum fat, vâl a dî che la potence nominâl declarade dal costrutôr e je inferiôr di chê reâl.

La esperience e à ancje mostrât che il superament de prestazion globâl dal 75% si à ancje se no ven passade la suee dal 85% sul lâf continuu (cc), ven a stâi dulà che si valute la eficiencie dal procès di conversion de potence radiant dal soreli in potence di corint continue. Il motîf al ven di bot spiegât se o scrivìn la formule de eficiencie (clamade in maniere improprie rindiment) globâl:

$$\eta = \eta_{dc} \cdot \eta_{ac} \quad (20)$$

La eficiencie sul lâf ac (η_{ac}) e je simpri verificade considerant che il convertidôr par sô costruzion al manten rindiments elevâts parsore dal 95% e partant, ancje se la eficiencie lâf continue (η_{dc}) e je mancul dal 85%, la eficiencie globâl η e pues superâ la suee dal 75%. Intal nestri câs specific o sin rivâts a lâ parsore di ducj i doi fatôrs dome sbassant il valôr reâl di radiazion misurât posizionant il sensôr dal solarimetri suntun plan perpendicolâr ai rais di soreli.

Considerât che la norme e impon ae procedure di colaut di misurâ une intensitât di plui di 600 Wm^{-2} , il superament dal colaut al domande une potence di rais di soreli ator dai 900 Wm^{-2} . Ven di bessôl che o vevin di spietâ une biele zornade e fâ lis misuris difûr e tor misdi.

I dâts vignûts fûr in automatic de unitât di elaborazion SOLAR300-HT303 furnide de Hessiana srl a vegnî ripuartâts culi.

$P_{dc} = 22,27 \text{ kW}$	$P_{ac} = 21,24 \text{ kW}$	
$\eta_{dc} = 0,87$	$\eta_{ac} = 0,95$	
$V_{dc} = 560 \text{ V}$	$P_f = 0,961$	
$I_{dc} = 40,48 \text{ A}$	$V_{AC1} = 419,6 \text{ V}$	$I_{AC} = 30,57 \text{ A}$
$I_{rr} = 476 \text{ Wm}^{-2}$	$V_{AC2} = 419,12 \text{ V}$	$I_{AC2} = 31,9 \text{ A}$
$P_{nom} = 50,57 \text{ kW}$	$V_{AC3} = 420,2 \text{ V}$	$I_{AC3} = 29,97 \text{ A}$
$T_{PV} = 36,5^\circ\text{C}$		
$T_{INV} = 33,6^\circ\text{C}$		

Intal câs specific il valôr di intensitât $I_{rr} = 476 \text{ Wm}^{-2}$ al è mancul di 600 Wm^{-2} e duncje la prove e à vût dome un significât di conferme di une ipotesi di lavôr.

La pratiche di colaut, o precisementri verifiche tecniche funzionâl di



Figure 17.

un implant FV daûr des indicazions de CEI 82-25, e dovarès sei un com-pit obligatori par ducj i professioniscj considerât che cheste vore e conferis ae declarazion di conformitât la garanzie de prove sul cjamp.

Ben si intint che intai implants colegâts ae rêt la jessude dal grup di conversion e furnîs energjie o ai carics eletrics locâi o ae rêt publiche (ENEL). Intal câs dal implant FV de Hessiana srl il grup di conversion al è constituît di doi inverters a trê fasis IGEATEAM colegâts in paralêl e il cjamp FV al è dividût in doi sotcjamps, ognidun cuntun numar di modui compagn (viôt la Figure 17): il prin cun filis di pôc inclinadis bande soreli jevât colegât al prin inverter e chel altri cun filis di pôc inclinadis bande soreli pognet colegât al secont inverter. I cilindris intes matriçs a son orientâts inte direzion est-ovest (viôt te Figure 18 la gusele magneti-che che e je orientade di nord a sud). Stant che lis filis a son a pene inclinadis i doi sotcjamps FV a dan une produzion pôc diferente intes primis oris de matine e intes ultimis oris dal dopomisdì. Une prime verifi-che e je stade fate ai 16 di Otubar dal 2012 a une daspò misdì (che e corrispuindeve al misdì solâr) in condizions di timp cun umiditât relative 75% e temperadure dal aiar 17,4°C. Il soreli al veve une inclinazion sul



Figure 18.

orizont di 37° , ven a stâi sù par jù 8° mancûl de latitudin. Par tirâ sù lis misuris al è stât doprât un piranometri HT303 (adun cu la unitât di memorizazion SOLAR-01); il solarimetri Mac Solar al è coventât par controlâ la costance de radiazion e la inclinazion dal plan di poie, in mût di gjavâ de misure de radiazion cuintri soreli la percentuâl proviodude dai calcui.

Ai 24 di Otubar dal 2012 a lis 12 e 45 sù par jù si son presentadis lis condizions meteo ideâls par davuelzi lis operazions²². La unitât SOLAR-300 e je stade colegade al inverter colegât cul sotcjump FV a soreli pognet. Daspò de operazion di sincronizazion cu la unitât SOLAR-01, si è seguide la procedure di misure de intensità sul plan perpendicolâr rispjet ai rais e regolazion dal plan inclinât dal supuart de Figure 16, in mût di rivâ a une riduzion de misure de radiazion di sù par jù il 30% rispjet a chê misurade sul plan; dopo cualchi minût di racuelte dâts la unitât SOLAR-01 e je stade colegade ae unitât di elaborazion SOLAR-300 inte stanzie dai inverters. I dâts visualizâts a son ripuartâts intes Tabelis 2 e 3.

Conts in man la radiazion sul plan e je stade ridusude di cuasi il 35% cuntune diference rispjet al dât teoric di cirche il 3%.

Tabele 2. Intensitâts di lûs misuradis dai doi solarimetris.

Mac SOLAR	930 Wm^{-2}	$\pm 5 \text{ Wm}^{-2}$
HT303	$4,3 \text{ mV}/7 \text{ mV}/1\text{kW m}^{-2} = 615 \text{ Wm}^{-2}$	$\pm 0,5 \text{ mV}$

Tabele 3. Misuris di intensitât scjamâdis de unitât SOLAR-01.

Irr_Avg [W/m^2]	Irr_Max [W/m^2]	Irr_Min [W/m^2]	TC_Avg [$^{\circ}\text{C}$]	TC_Max [$^{\circ}\text{C}$]	TC_Min [$^{\circ}\text{C}$]
610	610	609	30,9	30,9	30,9
610	610	610	30,9	30,9	30,9
610	611	610	30,9	30,9	30,9
610	611	610	30,8	30,8	30,7
610	610	609	30,6	30,6	30,5
	Eff_AC	Eff_DC	PRP		
	0,937	0,868	0,813		
	0,937	0,867	0,813		
	0,938	0,867	0,813		
	0,937	0,868	0,813		
	0,937	0,868	0,814		

La temperature e je stade misurade cuntune termocopie PT 100 diretamentri in aiar (la norme CEI 82-25 e domande che il sensôr al vegni aplicât daûr dal modul) par verificâ che la instesse si mantegni une vore sot dal valôr di 40°C , un valôr limit che parsore di chel si aplichin lis co-rezions in temperature de potence eletriche. Al è dificil che i cilindris FV a rivin a cheste temperature sei pal fat che une part e je simpri in ombrene sei pal fat che a son simpri ventilâts e partant cheste misure no à pesât par nuie sul risultât dal colaut. Si enfatize inmò che il valôr di Eff-DC contignût dentri dal interval di $609 \div 610 \text{ Wm}^{-2}$ al è di pôc parsore de minime de norme, invezit la radiazion sul plan e je ben disore.

I colegaments di sensôrs e sondis a son mostrâts te Figure 19.

In conclusion dome sot dal assum de riduzion de radiazion sul plan, teorichementri dimostrât e provât cun misuris sul cjamp al aiar viert, la unitât di elaborazion che e trate i dâts sperimentâi seont il vinculo des formulis de CEI 82-25 e à dât un riscuintri positif. Par une ricercje complete si varès di ripeti lis operazions di racuelte dai dâts e verifiche dai risultâts in altris zornadis e in diviersis oris cun valôrs di radiazion alts e

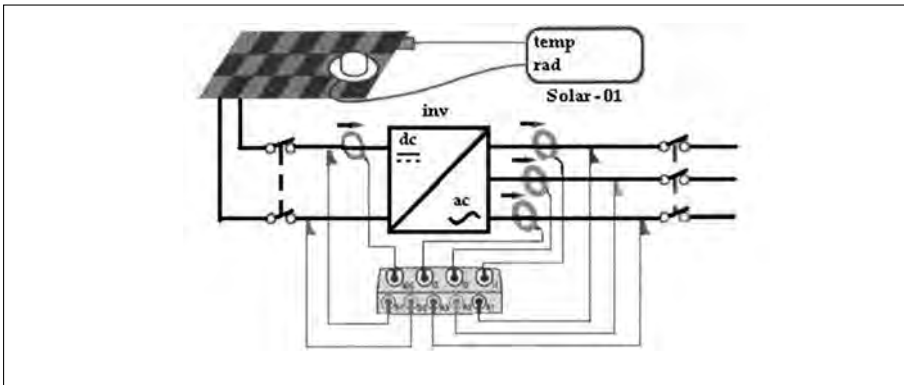


Figure 19.

bas. Al è un compit che al dovarès sei consegnât a un laboratori specializât che al riprodusi une part di implant FV e cun racuelte continuative e automatiche dai dâts²².

7. Considerazions finâls. Chest studi nol à volût considerâ e valutâ il rindiment globâl intal timp dal implant – ven a stâi la medie di oris solârs di funzionament ae potence nominâl ESH (Equivalent Solar Hour) –, il timp di restituzion de energjie spindude par produci l’implant EPBT (Energy Pay-Back Time) e i parametris finanziariis par valutâ il timp di restituzion dal capitâl investît dal client FPBT (Financial Pay-Back Time). La promozion di un prodot su la fonde de sô efficiencie/prestazion come la STC e pues no sei la soluzion che e puarte al sucès competitivîf une tecnologjie solâr.

In considerazion di chest ultin aspjet il proprietari produtôr – clamât ancje sogjet responsabil dal GSE (Gjestôr dai Servizis Eletrics) che al garantis par vincj agns un incentîf in euros par ogni chilowattore produsût (€/kWh) – al podarès sui tims luncs valutâ in maniere positive l’investiment fat, tignint cont dal cost dal implant (€/Watt) e dal BOS (Balance Of System, ven a stâi il cost dal implant FV gjavant i paneli). Di fat il proprietari de Hessiana srl al è stât indreçât a sielzi la instalazion des matris Solyndra pontant sul BOS. E di fat la cuvierture no si prestave a soquartâ struturis di posizionament dai modui che a varessin obleât la dite a sbusâle o a zavorâle cun blocs pesants.

Al è il câs di fermâsi a considerâ la sostanzial diference tra efficienze dal implant FV daûr de norme CEI 82-25 e rendimento. Par clarece o consideri il colaut, o verifiche tecniche funzionâl di un implant FV, une misure di efficienze dal implant FV ta chel moment particolâr; invezit il rendimento di un implant al ven de azion de prestazion tal timp e al ven valutât dal parametri ESH, bielzà nomenât prin, che cumò o lin a definî cuntune formule:

$$ESH = E / (P_n \cdot zz) \quad (21)$$

dulà che E e sta par energjie produsude intal timp di zz zornadis e P_n par potence nominâl.

La misure de energjie e ven dal calcul integrâl de produzion istantanie intal timp daûr de formule:

$$E = \int \epsilon(t) \cdot J(t) \cdot S \quad (22)$$

Si capîs di bot che la energjie produsude e dipint de efficienze istantanie $\epsilon(t)$, ven a stâi la percentuâl di densitât unitarie di potence di lûs (Wm^{-2}) convertide in potence elettriche (W) par dute la superficie (m^2) dal implant FV.

In ducj i implants colegâts ae rêt l'inverter al manten la potence nominâl (o di pic) P_{mp} su la carateristiche di lavôr in cualsisei condizion di timp meteorologjic, partant la conversion di energjie e corispuint ae massime efficienze dal implant. La diference tra la energjie produsude teoriche a efficienze STC e la energjie contabilizade dal contadôr ENEL:

$$\Delta E = \int \epsilon_{STC} \cdot J(t) \cdot S - \int \epsilon(t) \cdot J(t) \cdot S \quad (23)$$

al pues sei considerât un indicadôr di cualitât par une valutazion sul rendimento dal implant.

Sul plan finanziari la bontât dal investment si calcole cu la formule:

$$\Delta = ESH \cdot P_n \cdot zz \cdot R_u - C_u \cdot P_n \quad (24)$$

dulà che R_u al sta par rigjâf €/kWh riferît al incentîf (costant sul arc dai vincj agns) atualizât tignint cont di ducj chei altris coscj e C_u il cost uni-

tari dal implant in €/kW nominâi. Il segn dal delta (se negatîf: no soi in mò rivât a recuperâ l'investiment; se positîf: o stoi vuadagnant) al à il significât di indicadôr di bontât dal investiment.

Il valôr dal delta al dipent une vore de riduzion de eficiencie intal timp che e à influence sul valôr di ESH. La dificile valutazion di chest parametri al è chel che al rint il calcul di prevision dal delta une vore problematic, e di fat nissun costrutôr al furnìs l'andament de eficiencie intal timp. La norme CEI 61646 (come la 61215) sui elements a film sutîl prudenzialmentri e certifiche i modui par un degrât di eficiencie di no mancul dal 90% in 10 agns e no mancul dal 80% dentri di 25 agns. Chest aspjet al reste critic so redut pai modui, come intal câs dai cilindris Solyndra, che a vegnin certificâts cun tolerance STC dentri di une fasce di pluì o mancul. Fatôrs competitîfs a stan sburtant i produtôrs a meti sul marcjât modui cun tolerance positive, ven a stâi cun potence nominâl minime garantide.

Cui cilindris FV Solyndra la prevision di producibilitât e risulte in mò pluì complicate par il fat che la potence nominâl si riferìs a une norme scrite pai modui plans. La societât e je jentrade sul marcjât european certificand il film sutîl CIGS cilindric cu la instesse norme doprade pe certificazion dai modui plans. Cheste sielte e je stade obleade par mancjançe di une norme su la procedure di seguî par misurâ la reâl eficiencie di un cilindri FV in laboratori in condizions standard. Mancjant cheste pussibilitât e no podint meti sul marcjât un prodot certificât sul film sutîl plan, considerât che une metât superficie non ven investide di radiazion direte, e je stade fate la sielte di meti sul marcjât la potence nominâl riferide a cirche metât superficie FV.

Di fat, se la potence nominâl e fos stade misurade in radiant dute la superficie plane ecuivalent ae superficie laterâl cilindriche, la potence nominâl dai cilindris FV e sarès risultade pluì grande di chê certificade, e si sarès riscuintrade une rese pluì piçule rispjet ai modui plans. Cheste sielte, di furnî al client une potence certificade par sòl metât superficie plane ecuivalent ae superficie di un semicilindri, e à l'instès significât di "tolerance positive". Il mancjât riscuintri sui visualizadôrs dal inverter di potencis pluì grandis di chê nominâl di 115,20 kW in condizions dongje dal valôr STC di soreli al è leât al bas rindiment di conversion sul lâc continue che dificilmentri al va parsore dal 85%.

Fûr dal discors tecnologjic si pues tirâ cualchi conclusion in chel economic. Il contrat di compre-vendi su la cjarte al è favorevul al client parcè che al à paiât mancûl €/W dai implants a film sutîl o a modui cristalins di avuâl potence nominâl. Cemût aie podût alore la company californiane doprâ plui materiâl FV rispjet a chel che al sarès servît a produci un modul plan de instesse potence nominâl e intal instès timp pensâ di meti sul marcjât un prodot concorenziâl?

O pues presumi che la societât Solyndra e vedi valutât il plui alt cost €/W di materiâl FV necessari a cuvierzi dute la superficie FV dai cilindris, belançade di fatôrs di scjale dal cicli produtîf; in struc une produzion plui grande di matriçs a cilindris rispjet ai modui plans di potence nominâl compagne. Sul marcjât l'alt rindiment cumbinât cul BOS decimementri competitîf al varès in tims curts sostituît il film sutîl CIGS plan cui cilindris al mancûl su lis cuvierturis dai capanons industriâi. Ma alc al è lâst Stuart.

La spiegazion plui credibil e cjale ae prevision fate de Solyndra sul presit dal silici intes dôs tecnologjîs dal film sutîl e de cele di silici cristalin. Si spietave di une bande la decessite dal presit di produzion dal film CIGS e il mantigniment dal presit €/W dal silici cristalin. Dutis dôs lis previsions si son mostradis sbaliadis. Soredut al devi vê pesât il crol dal presit €/W dal silici cristalin.

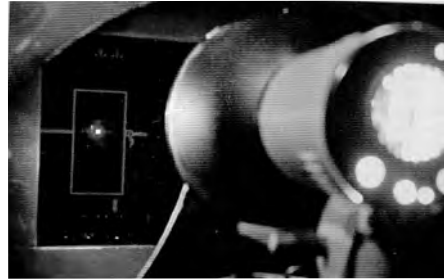
Un judizi definitîf su cheste tecnologjie al pues vignî dai risultâts di produzion dai tancj implants realizâts de Solyndra ma ancje di une normative che e definissi un standard procedurâl. Chest ultin proviodiment al podarès di une bande orientâ la ricercje e la inovazion e di chê altre furnî ai verificadôrs un percors clâr di seguî par compagnâ la declarazion di conformitât cuntun procediment clâr par rivâ a misurâ la eficiencie di un implant cui cilindris FV. Ma ta chest moment la produzion dai cilindris FV e je ferme e il procediment di licuidazion falimentâr de 'company' in cors.

¹ La sigle CIGS e sta par Copper Indium Gallium (di)Selenide; si trate di une eterozonte FV che in laboratori e pues rivâ a une prestazion (eficienze) fin al 20%. Il cilindri FV al è stât prestât pes operazions di misure dal dot. Daniele Della Toffola de Agenzie Regionâl pe protezion dal ambient AR-PA FVJ sede di Palme (Ud).

² Plui inlâ o doprarin di preference il tiermin “prestazion”, plui dongje dal significât di ‘performance’, considerât che la procedure di colaut e intint superâ une prove cuntune procedure e regulis di calcul ben definidis. L’instès concet al ven pandût te norme CEI 82-25 cui tiermins “eficienze” e “rindiment”; in chest scrit o doprarin pal plui il vocabul efficienze, stant che cul tiermin rindiment o intindin invezit la misure de prestazion intal timp che e da come risultât la energjie produsude di un gjeneradôr FV. Cuantitativementri la efficienze o prestazion al è un valôr numeric che in percentuâl al mostre trope potence radiant di soreli (Wm^{-2}) e ven convertide in potence elettriche (W).

³ Il sfuei tecnic de Solyndra al mostre par ogni cilindri FV i dâts a seguî: $P_n = 5$ W cun tolerance di potence $\pm 4\%$; $V_{mp} = 91,7$ V; $I_{mp} = 50$ mA; $V_{oc} = 124,6$ V; $I_{sc} = 59$ mA.

⁴ La potence nominâl o di pic e ven definide de norme CEI 61646 pai panel plans in condizions STC (Standard Test Condition). La prestazion STC di laboratori e ven misurade dentri de cjamarre scure di un simuladôr solâr, lampant i modui cuntune lûs solâr produsude di une batterie di lampadis al gâs xen in direzion perpendicolâr al plan dai modui (viôt inte foto il simuladôr solâr dal laboratori Esti di Ispra) (Rutschmann 2009). Il simuladôr solâr al è calibrât par lampâ 1000 watt par metri cuadri (Wm^{-2}), cuntune temperaturade di cele di $25^\circ C$ ($77^\circ F$) e spessôr di aiar riferit ae mieze Europe (AM = 1,5); un computer al elabore i dâts e al calcule la potence nominâl (o potence di pic parcè che a nivel dal mâr la radiazion no va plui inlâ di chest valôr). Se la potence nominâl dal panel Solyndra e je stade misurade metint i cilindris cuintri de parêt scure, alore la superficie dal cilindri lampât di lûs e ven a jessi, sù par jù, metât de superficie dal cilindri (la superficie dal plan tangjent al cilindri denant de batterie di lampadis), e duncje la potence elettriche e risulte inferiôr ae reâl misurade tal viert in condizions dongje STC pal fat, come che al è stât fat mot, che in plui de component direte i cilindris a vegnin investîts anje de component di albedo.



Simuladôr solâr.

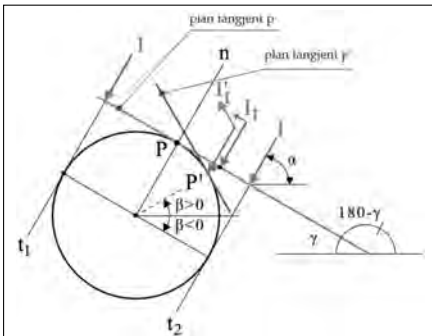
⁵ Plui indenant o considerarin la posizion dai rais di soreli perpendicolârs ae diretorie dal cilindri, ven a stâi in oris ator dal misdi; in oris lontan dal misdi, cui rais di soreli cuntune inclinazion divierse dai 90° , lis considerazions a restin validis se o scomponin il rai intes dôs componentis, la normâl ae diretorie che e jentre intal cilindri e la tangjent che no ven considerade, stant che e je paralele ae diretorie e duncje no prodûs efiet FV.

⁶ Di chi indenant cul tiermin “intensitât” o intindin sei la “intensitât di potence” sei la “densitât di potence”; intes formulis invezit cun I o intindin propriementri la intensitât di potence (W) e cun I / S la densitât di potence (Wm^{-2}). Se alore o considerin che la potence in W sul plan $a - a'$ e passe dute su $a' - a'$, la densitât di potence suntune superficie e incres cu la decessite de superficie e l’incontrari.

⁷ La component difondude in fisiche e cjape il non di scattering di Rayleigh. Il fenomen di *scattering* o “deviazion” si verifiche cuant che une onde di lûs e cjate une partesele di dimension plui picule de lungjece de onde di lûs, e chest al sucêt soredut cuant che la lûs e passe zontraviers mieçs sostanzialmentri trasparentis, soredut gâs e licuit. In Italie la densitât di radiazion difondude intune biele zornade di cil seren e pues svariâ dal 15% al 25% sul totâl de intensitât di lûs; plui indenant o vin sielt un fatôr di riduzion $k_{diff} = 20\%$; la sielte no je stade ispirade di un particolâr criteri ma pluitost de etiche aristoteliche sintetizade dal sproc latin “in medio stat virtus”, che provocatorientri voltât intal lengaç tecnic al ven a dî che il valôr plui probabil al è il valôr medi calcolât sui doi valôrs limit in plui e in mancul.

⁸ Inte Figure o viodin la gjeneriche situazion di rais di soreli I inclinâts di un angul $\alpha < 90^\circ$ sul plan

dal orizzont e di un plan p tangjent in P ae circonferenze dal cilindri posizionât dilunc dal as soreli jevât viers soreli pognet (est viers ovest) inclinât di un angul di tilt γ sul plan dal orizont; in figure si viôt ancje l'angul di scoriment β che al va cun viers positif cuintri orloi fin ae tangjent t_1 e in sens negatîf secont orloi fin a t_2 . Si pues dimostrâ il teoreme: dât un fas di liniis dretis e paralelis t framieç t_1 e t_2 , cun t_1 e t_2 partignintis al fas, che a intersechin il plan tangjent p , la component tangjent I_t di I dilunc dal plan e je simpri di valôr inferiori ae component tangjent I'_t di I dilunc de semicirconferenze che si rigjave sul plan tangjent p' intal pont corint P' se e sôl se $\alpha = 90 - \gamma$, ven a stâi se la direzion di I e je perpendicolar al plan tangjent p ; al ven daûr il corolari: se $\alpha \neq 90 - \gamma$ al esist un arc \hat{C} di circonferenze dulà che $I'_t < I_t$, e cun di plui la lungjece di \hat{C} e je minôr de lungjece dal arc corispundint al interval angolar $180 - \text{arc}(\hat{C})$.



Rais di soreli cun inclinazion gjeneriche.

⁹ Il vincj par cent al è stât provât par une situazion tipiche e verificât tra l'altri dal Fraunhofer Institute (deklarazion gjavade dal sfuei tecnic di Solyndra).

¹⁰ Intal sfuei tecnic de Solyndra no son scritis a clâr la eficienze di cele o di panel; la societât e à declarât che lis celis a trasformin dal 12% al 14% la lûs solâr in potence elettriche ma si trate di valôrs che si riferissin aes celis planis e no aes celis dilunc des diretoriis dal cilindri. Chesj dâts a son in linie cun chei declarâts suntun sfuei tecnic di un produtôr di modui CIGS; dai dâts di potence nominâl $P_n = 36 \text{ W}$ e superficie $S = 0,54 \times 0,954 \text{ m}^2$ si rigjave un valôr ator dal 13,5% in STC; si trate di mi-

suris otignudis irradiant uniformementri superficiis planis cun component direte di lûs prossime e profil spetrâl di cuarp neri (il soreli al à un profil di spetri fûr de atmosfere une vore prossim al contignût spetrâl di cuarp neri) in STC. Di chestis provis un sisteme automatic al elabore i dâts produsint la stampe de carateristiche di lavôr dal modul cul pont di massime potence (potence nominâl) e il calcul de eficienze seont la (5). Se la potence nominâl dal panel Solyndra e je stade misurade irradiant il panel (o un cilindri) cuintri la parêt de cjamare scure dal simuladôr, alore la potence nominâl si riferis a metât superficie dal cilindri (aprossimant la superficie curve dal semicilindri al plan tangjent viodût dal grup di lampadis), o ancje la potence nominâl e je stade calcolade dividint a metât la potence nominâl certificade pai panelis plans CIGS.

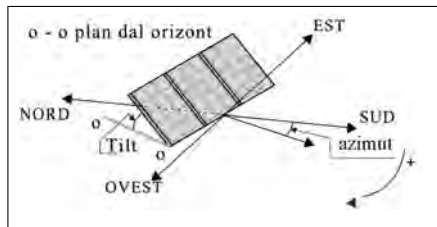
¹¹ Al è stât disvilupât sul sfuei di calcul un procediment di calcul iteratîf par pas di integrazion di 0,1 decim di grât su doi arcs di semicirconferenze cu lis formulis scritis sot:

– $\Sigma I \cdot \cos(90 - \beta)$ cun angul corint dentri l'interval: $0 < \beta < 90$;

– $\Sigma I \cdot \cos(\beta - 90)$ cun angul corint dentri l'interval: $90 < \beta < 180$,

dulà che ogni pas al da come risultât la component normal sul pont de semicirconferenze.

¹² L'angul di tilt al è formât dal plan dal modul cul plan dal orizont (viôt la Figure). A misdi solâr (angul di azimut zero) il modul al ricêf i rais dal soreli perpendicolarmentri (in cheste situazion no vin component tangjent dal vetôr radiazion che duncje al jentre par intôr dentri dal modul) e il valôr dal angul di tilt al devente $\gamma = 90 - \alpha$.



Angul di tilt e azimut.

¹³ La cuverture piturade di blanc no riflet la lûs tant che un spielî ma di une bande e supe part de

radiazion (fenomen che macroscopicamentri si manifeste in riscjaldament) e di chê altre la lûs si spant in dutis lis direzions pal fat che lis irregolaritâts de superficie a son tant plui grandis de lungjece di onde de lûs. Se o aplichin al valôr de component di albedo a regjim i fatôrs di corezion di superficie o cjatin un valôr dongje di chel calcolât cu la formule (16).

¹⁴ Il tet dal capanon Hessiana al è inclinât di cirche 5° cuntune ale a soreli pognet e une a soreli jevât (Figure 17). Parsore de solete di ciment e je stade poiade une lamiere grecade a profil trapezoidâl e chest al prodûs une riflission che e dipint une vore de posizion dal soreli, di mût che al deventarès une vore complicât considerâ il percors dai rais riflès; inte definizion de component di albedo otimâl par une buine produzion il costrutôr nol fâs distinzions tra diversis cuiverturis; si poïn su chest fat pensant che no son stadis verificadis diferencis significativis tra diversis tipologjîs di cuiverturis e duncje la nestre ipotesî di traspuartâ lis considerazions fatis pensant al tet plan ideâl su la superficie ondulade trapezoidâl e je justificade de esperience.

¹⁵ Il soreli bas sul orizzont al slungje lis ombrenis, e invezeit dongje dal solstizi di Istât a misdi la ombrene e cole sot dai pîts.

¹⁶ Il fatôr $\rho = 0,6$ al è dât des tabelis corrispondentis aes parêts claris di modon.

¹⁷ Il solarimetri circolâr al utilize tant che sensôr di intensitât di radiazion une celute FV policristaline taiade a pueste e montade su la part mobil di une vuide buine di movîsi dilunc de circonferenze dal cilindri. Doi fîi ros e neris a coleghin la celute a un multimetri. La part fisse e je stade marcade cun segns di pas di angul e dividude in 24 parts (un pas di angul al misure 15°). La costant dal solarimetri circolâr e je stade calcolade confrontant la misure di corint cul valôr di densitât di radiazion dal solarimetri a cele monocristaline (inte Foto si viôt l'asset dal argagn colegât cun doi fîi a un multimetri par tirâ sù lis misuris sul tet dal capanon de Hessiana). Il principi fondant la misure dal solarimetri circolâr e je la proporzionalitât tra la corint (mA) di celute FV misurate di un strument digjital basât su la leç di Ohm (multimetri MD320) e la intensitât de radiazion solâr (Wm^{-2}). Cheste costant e je stade calcolade daspò une vore di misuris e je stade metode a confront cu la misure di radiazion misurate dai doi solarimetris: il parsore nomenât Mac Solar SLM018c-3 a celu-

te monocristaline e il piranometri a termocubie HT303. Il Mac Solar basât sul efiet FV al è une vore plui pront dal HT 303 che invezeit al è basât sul efiet termoeletric e par chest mutf o vin introdusût intal valôr sielt de costant $k = 2,75$ une inciercece di $\pm 10\%$ (Wm^{-2} / mA). Il solarimetri circolâr al è stât costruît dentri dal repart di lavorazions mecanichis dal ITI "A. Malignani" (cumò ISIS "A. Malignani") di Udin di bande dal tecnic p.i. Salvatore Ravo su semplics sugjeriments dal autôr di cheste ricerceje.



Solarimetri circolâr.

¹⁸ La altece dal soreli ae nestre latitudin dal emisferi boreâl e je dade de formule: $\alpha =$ latitudin + declinazion; la altece ae latitudin di Talmassons, dade dal calcul cun interpolation lineâr e declinazion 13,83 ae direzion: <http://www.ilpaesedellemeridiane.com/simulatori/04noz/08altezzasole.htm> e ven di $\alpha = 45,9^\circ + 13,5^\circ = 59^\circ$ cirche.

¹⁹ Il solarimetri Mac Solar SLM018c-3 al da diretementri suntun visualizadôr il valôr in Wm^{-2} e si base su la proporzionalitât fra la corint fotoindusude dade de celute monocristaline e la intensitât di lûs. Il piranometri HT303 al è un solarimetri che al da une tension dal ordin dai mV par efiet termoeletric (dit ançe efiet Seebeck); chest efiet si verifiches a cause de diference di temperadure cuant che la piastrine cuintri soreli si scjalde (inte Foto si viodin i doi solarimetris intune operazion di comparazion des misuris parsore de cuiverture dal capanon Hessiana). Il valôr di intensitât di radiazion solâr si rigjave moltiplicant i mV pe costant $k = 7 \text{ mV} / kWm^{-2}$, valôr consegnât al co-

strutôr di bande di un laboratori di certificazion ricognossût pes misuris in cjamp professionâl. Inizialmenti e je stade individuade, su la base de analisi di une vore di misuris a cîl viert, la fasse orarie cui dâts dai doi solarimetrîs plui prossims, stant il fat che il Mac Solar a celute FV al à une sensibilitât dipendente de lungjece di onde de lûs r e invezit il piranometri le manten costant. I doi solarimetrîs a dan sù par jù la instesse misure tor misdi, ven a stâi par valôrs di angul azimutâl tor dal zero. La procedure di taradure tal aiar viert e compuarte dificoltâts di leture stant il fat che i doi solarimetrîs a àn diviers tîmps di reazion aes variazions di intensitât di lûs.



A man çampe solarimetrîs a cele FV, a man drete a termocubie.

²⁰ In dutis lis operazions prime e in cors di colaut o soi stât assistût dal tecnic Aldo Moratti de Hessia-

na srl che mi à dât une man pardabon decisive par davuelzi lis verifichis sul puest.

²¹ Si sin limitâts a fâ lis provis suntun dai doi inverters considerât che i doi sotcjamps FV a àn l'instès numar di modui e che tor misdi solâr i doi inverters a davin in pratiche la instesse indicazion di potence eletriche.

²² Furnin une altre prove tendenziâl che l'implant FV sul capanon Hessiana al prodûs energie eletriche cun rindiment confrontabil cun altris implants a modui plans utilizant mieze superficie dai cilindris. O rivarìn al nestri obietif se o verifichin che l'implant FV al da almancul la potence certificade dal produtôr seont la norme CEI/EN 61646. Al 07/09/2012 ator lis 12:20 i doi inverters a davin sul lât continue lis misuris di $P_{dc,est} = 34,6 \text{ kW}$ e $P_{dc, =over} = 32,4 \text{ kW}$, par un totâl di $P = 67 \text{ kW}$; il solarimetrî a cele FV al visualizave sul plan tangjent perpendicolâr ai rais solâr, puartant fûr il 30%, il valôr di $I_{MacSolar} = 673 \text{ Wm}^{-2}$ e chel a termocubie $I_{HT303} = 695 \text{ Wm}^{-2}$ cun inciertece di $\pm 5\%$ il prin e $\pm 3\%$ il secont; il calcul di eficiencie calculât cu la (7) al da il risultât di $\epsilon\% \cong 8\%$, un valôr di pôc superiôr a chel teorîc in condizions STC otgnût su mieze superficie svilupade sul plan [viôt il calcul ae altece de formule (5)]. Anzit cul valôr di rindiment sielt, di pôc inferiôr a chel de Tabele 3, l'implant al produsarès un pocje di plui energie di chê certificade, che al è justificât pensâ che e vegni de component di albedo che e investis chê altre mieze superficie dal cilindri.