Photovoltaic Creativity

Duccio Marco Gasparri, Matteo Pirazzini, Andrea Tallaros, Alessandro Freda

# Introduzione

# Posizione del sole

Per ogni giorno *N* dell’anno viene calcolata la declinazione rispetto al sole dell’asse di rotazione terrestre [Eq 1, gradi]:

L’angolo tra il sole e l’osservatore al minuto *min* della giornata è calcolato rispetto *mezzogiorno solare* (che si fissa alle 12:00 ora locale dell’osservatore) [Eq 2, gradi; i valori negativi rappresentano gli antimeridiani]:

Vengono definiti gli angoli limiti corrispondenti all’alba e al tramonto, i quali dipendono dal giorno *N* e dalla latitudine *L* dell’installazione (positiva per i valori a nord dell’equatore e negativa per i valori a sud dell’equatore). Per al di fuori dell’intervallo (-,) l’insolazione è zero per costruzione.

Si ricavano gli angoli di Zenith solare e il complementare angolo di altitudine solare [Eq 3, gradi]:

L’angolo di Azimut dipendente dall’altitudine solare [Eq 4, gradi]:

Viene definita *massa d’aria* con indice *m* la lunghezza percorsa dalla radiazione solare attraverso l’atmosfera. Tale indice è normalizzato rispetto alla perpendicolare sul piano orizzontale dell’installazione (che si considera il percorso più breve, con *m* uguale a 1) [Eq 6]:

Data la costante solare (pari a 1366.1 ) si calcola la radiazione che raggiunge una superficie orizzontale extra-atmosfera (da specificare, top-of-atmosphere insolation?) [Eq. , ]:

Si ricava poi la radiazione incidente su una superficie orizzontale extraterrestre ad un certo tempo dell’anno (dipendente dall’angolo di Zenith ) [Eq. , ]:

La radiazione totale giornaliera incidente su una superficie orizzontale extraterrestre si ricava integrando lungo il corso della rotazione terrestre di 360° tramite l’angolo , che è funzione dei minuti della giornata e rappresenta la variabile temporale. Si ricorda però che l’alba e il tramonto sono stati posti come limiti dell’intervallo oltre al quale non vi è più irraggiamento. Pertanto, l’integrazione si limita all’intervallo [] essendo, fuori da tale intervallo, zero per costruzione [Eq. , , si tiene conto della simmetria rispetto all’asse]:

La costante temporale è espressa in radianti. Convertendola in secondi si ottiene la radiazione totale incidente su una superficie orizzontale extraterrestre lungo un giornata [Eq. , ][[1]](#footnote-1):

La percentuale media di radiazione assorbita dall’atmosfera è stata approssimata confrontando i dati di insolazione rilevati al suolo rispetto ai dati extra-atmosfera. In particolare, sono stati estratti dalla collezione NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER)[[2]](#footnote-2), database *Climatology Resource for Agroclimatology*, le serie *Top-of-atmosphere insolation* (codice ALLSKY\_TOA\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2, MJ/m^2/day) e la *All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface* (codice ALLSKY\_SFC\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2, MJ/m^2/day) su un periodo che va dal giorno 1 al giorno 365 dell’anno 2015, per un totale di 365 record.

Operando in ipotesi di clear sky, sono stati selezionati i massimi relativi per eliminare abbassamenti dovuti alla presenza di nuvole o foschia, e di questi è stata fatta una media mensile. Essendo dati giornalieri, tale ipotesi presuppone che, in ciascun mese, vi sia stato almeno un giorno di pieno sole. Tale fattore viene espresso in percentuale di e indicato con il termine .

|  |  |
| --- | --- |
| Mese |  |
| Gennaio | 61% |
| Febbraio | 64% |
| Marzo | 67% |
| Aprile | 67% |
| Maggio | 67% |
| Giugno | 67% |
| Luglio | 67% |
| Agosto | 67% |
| Settembre | 64% |
| Ottobre | 61% |
| Novembre | 55% |
| Dicembre | 55% |

Il complementare di tale percentuale include sia la radiazione assorbita dall’atmosfera e trasformata in calore, sia la radiazione riflessa non in direzione della superficie. Ne consegue che la radiazione totale giornaliera su un piano parallelo al terreno è [Eq. , ]:

Si approssima la quota di radiazione totale oraria rispetto alla radiazione totale giornaliera secondo la seguente formula [Eq. , , pg. 98]:

Con e [Eqq. ]:

Si definisce la quota di radiazione totale G su una superficie orizzontale [Eq.

]:

Si calcola ora la quota di radiazione diretta che raggiunge la superficie, e la quota di radiazione diffusa/diffratta che raggiunge la superficie. Si approssima l’effetto della diffrazione atmosferica attraverso una relazione lineare tra i due estremi, ossia tra il minimo di massa d’aria, ove la diretta rappresenta l’85% del totale, e il massimo di massa d’aria all’approssimarsi dell’alba e del tramonto, in cui la diretta rappresenta il 60% [Eqq. , , e in radianti]

Per construzione, quindi, la radiazione totale su una superficie orizzontale è la somma della radiazione diretta e della radiazione assorbita dalla massa d’aria e diffusa [Eq. , W/m^2 rad, pg. 101]

## Raffronto tra dati calcolati e dati rilevati

Si procede ora ad un primo confronto tra la radiazione totale incidente su una superficie orizzontale extraterrestre lungo un giornata calcolata secondo il modello suesposto, e i valori rilevati empiricamente. Si definisce l’Università di Bologna come luogo di installazione (Latitudine 44.5075, Longitudine 11.3514).

I dati empirici sono estratti dalla collezione NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER)[[3]](#footnote-4), database *Climatology Resource for Agroclimatology*, serie *Top-of-atmosphere insolation* (codice ALLSKY\_TOA\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Top-of-atmosphere Insolation, MJ/m^2/day). Il campione estratto va dal giorno 1 al giorno 365 dell’anno 2015, per un totale di 365 record.

Figura 1 – Raffronto tra la radiazione totale incidente su una superficie orizzontale extraterrestre lungo un giornata calcolata secondo il modello qui presentato, e la stessa quantità rilevata nel corso dell’anno. I dati empirici sono estratti dalla collezione NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) , database Climatology Resource for Agroclimatology, serie Top-of-atmosphere insolation (codice ALLSKY\_TOA\_SW\_DWN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 Top-of-atmosphere). Tutti i valori sono espresso in MJ/m^2/giorno. Il campione estratto va dal giorno 1 al giorno 365 dell’anno 2015, per un totale di 365 record.

Si evince chiaramente come il modello qui presentato sottostimi fortemente l’irraggiamento durante i mesi invernali, fino ad un picco del 100%, pur fornendo un’eccellente corrispondenza durante i mesi estivi.

# Implementazione software

Il software sull’irraggiamento del pannello è suddiviso in 7 file di libreria.

File **geometry\_fp.h** contentente i metodi:

* struct vertex {}
* struct plane {}
* struct triangle {}
* typedef double Z\_S\_rad;
* typedef plane plane\_xparallel;
* typedef vertex plane\_normal\_vector;
* typedef double m\_squared;
* typedef double beta\_rad;
* pure plane fplane(const vertex a, const vertex b, const vertex d);
* pure plane\_normal\_vector fnormal(const plane pl);
* pure Z\_S\_rad fZ\_S\_rad(const plane pl);
* pure beta\_rad fbeta\_rad(const vertex a, const vertex b, const vertex d, const Z\_S\_rad Z\_S);
* pure m\_squared farea(const vertex a, const vertex b, const vertex d);
* pure vertex rotate\_vertex\_zaxis(const vertex v, const double angle\_rad);
* pure plane rotate\_plane\_zaxis(const vertex a, const vertex b, const vertex d, const double angle\_rad);
* pure plane\_xparallel rotate\_plane\_to\_xparallel(const vertex a, const vertex b, const vertex d, const Z\_S\_rad mZ\_S\_rad);
* pure double fnorm(const vertex pl);

File **panel\_io.h** contentente i metodi:

* const std::vector<geometry::vertex \*> load\_vertices(std::string filename);
* const std::vector<geometry::vertex \*> test\_vertices();
* const std::vector<geometry::vertex \*> test\_vertices\_2();

File **panel\_pv\_fp.h** contenente I metodi:

* pure double compute\_I(double I\_ph, double I\_0, double q, double V\_d, double a, double k, double T);
* pure double compute\_I2(double I, double R\_s, double V ,double I\_ph, double I\_0, double R\_p, double V\_T, double a);
* pure double compute\_V\_T(double N\_S, double K, double T, double q);
* pure double compute\_I\_ph(double I\_phSTC, double K\_j, double delta\_T, double G, double G\_STC);
* pure double compute\_I\_0(double V\_ocSTC, double I\_phSTC, double K\_j, double delta\_T, double K\_V, double a, double V\_T);
* pure double compute\_I3(double I\_01, double R\_s, double V, double I\_ph, double I, double I\_02, double R\_p, double V\_T1, double a\_1, double V\_T2, double a\_2);

File **sun\_fp.h** contentente i metodi:

* struct position\_in\_sky {
* const double alpha\_rad; //Solar altitude
* const double z\_rad; //Solar Azimuth
* const double h\_rad;
* const double delta\_rad;
* const double cos\_Phi;
* const double m;
* const bool valid;
* }
* pure position\_in\_sky\* sun(const int N, const int minutes, const double L\_rad);
* pure double cos\_Phi(const int N, const int minutes, const double L\_rad);
* pure double Phi\_rad(const int N, const int minutes, const double L\_rad);
* pure double sin\_alpha(const int N, const int minutes, const double L\_rad);
* pure double alpha\_rad(const int N, const int minutes, const double L\_rad);
* pure double compute\_m(const int N, const int minutes, const double L\_rad);
* pure double compute\_delta\_rad(const int N);
* pure double compute\_h\_rad(const int minutes);
* pure double compute\_cos\_Phi(const double L\_rad, const double delta\_rad, const

File **irradiance\_fp.h** contentente i metodi:

* pure double compute\_cos\_theta(double L\_rad, double beta\_rad, double Z\_S\_rad, double delta\_rad, double h\_rad);
* pure double compute\_R\_B(double cos\_theta, double cos\_Phi);
* pure double compute\_M(double m, double a0, double a1, double a2, double a3, double a4);
* pure double compute\_theta\_r(double theta\_rad, double n\_refraction\_index);
* pure double compute\_taualpha\_B(double K, double thickness, double theta\_r, double theta);
* pure double compute\_taualpha\_n(double K, double thickness, double n\_refraction\_index);
* pure double compute\_K\_theta\_B(double taualpha\_B, double taualpha\_N);
* pure double compute\_G\_on(const int N, const double G\_SC=G\_SC\_CONSTANT);
* pure double compute\_G\_oH(const double G\_on, const double cos\_Phi);
* pure double compute\_H\_o\_rad(const double L\_rad, const double delta\_rad, const double h\_ss\_rad, const double G\_on);
* pure double compute\_H\_o(const double H\_o\_rad);
* pure double compute\_r\_ground(const int N);
* pure double compute\_H(const double H\_o, const double r\_ground);
* pure double compute\_r(const double h\_rad, const double h\_ss\_rad);
* pure double compute\_G\_o(const double G\_oH, const double r);
* pure double compute\_G\_B(const double G\_o, const double h\_rad, const double h\_ss\_rad);
* pure double compute\_G\_D(const double G\_o, const double h\_rad, const double h\_ss\_rad);

File **panel\_irradiance.h** contenente i metodi:

* const double compute\_S(
* const pv\_sun::position\_in\_sky\* pos,
* double L\_rad,
* double beta\_rad,
* double Z\_S\_rad,
* double n\_refraction\_index,
* double thickness,
* double K,
* double a0,
* double a1,
* double a2,
* double a3,
* double a4
* );

# Irraggiamento del pannello

Per ogni micro-pannello che compone il pannello, viene calcolato l’anglo di inclinazione del pannello in gradi rispetto al terreno, e l’angolo di inclinazione del pannello fra il sud e la perpendicolare del pannello (zero se simmetrico rispetto all’asse Y, positivo verso ovest).

L’inclinazione del micro-pannello nello spazio 3D forma un angolo proprio con la specifica posizione del sole al tempo t, chiamato angolo di incidenza , che si ottiene attraverso la seguente formula [Eq 4, gradi]:

L’attraversamento dell’atmosfera dai raggi solari produce non solo un effetto di assorbimento e rifrazione, ma anche uno shift dello spettro dei raggi solari. L’impatto finale di questo shift dipende dalle caratteristiche costruttive del pannello (principalmente della giunzione?). Tale effetto è stato ottenuto sperimentalmente e descritto tramite una regressione a coefficienti dati dalle prove di laboratorio e dalla massa d’aria m in precedenza calcolata [Eq 7, gli alpha sono a pag514] :

[TABELLA DEGLI ALFA]

La rifrazione della superficie del pannello crea un angolo di rifrazione dato dal coefficiente di rifrazione n del materiale che compone la superficie, che si suppone essere vetro con relativo indice pari a [Eq 8]:

Il modificatore correttivo per l’indice di rifrazione che include la trasmittanza [84] e dipende dallo spessore del pannello e dal coefficiente di estinzione del sistema fotovoltaico K secondo la seguente formula [Eq 10 (pag516)]:

Il modificatore di incidenza angolare [Eq 9 (pag 516)]:

Le componenti rifratte (D) e riflesse (G) della luce che raggiunge il pannello, sono state empiricamente ricavate per i collettori solari tramite un angolo di incidenza virtuale per ciascuna delle due componenti, secondo le seguenti relazioni:

Ancorché empirico, sostituire tali angoli modificati all’interno delle relative equazioni permette di ottenere una buona approssimazione della quota di radiazione incidente. Per tale motivo, d’ora in avanti verrà rinominato .

Da cui si ricava [Eq 11 (pag516)]:

La stessa sequenza di equazioni 5, 16 si può applicare ai e :

Con i relativi

E

La radiazione solare diretta sul pannello ci permette di calcolare la radazione solare su una superficie orizzonale [W/m^2], dipendente dall’angolo di Zenith, e la radiazione solare su una superficie inclinata [W/m^2], dipendente dall’angolo di incidenza [vedi pg. 100]:

Il rapporto tra I coseni di tali radiazioni degli angoli di incidenza e di Zenith permette di calcolare il *fattore correttivo di inclinazione della radiazione del fascio* [Eq 5]:

La composizione dei fattori correttivi sopra calcolati permette di comporre la radiazione assorbita dal pannello ad una determinata ora del giorno h, in un determinato giorno dell’anno N luce S [Eq 12 (pag514)]:

# Rilevazioni empiriche di irraggiamento

Al fine di verificare il modello, si è proceduto a rilevazioni di resa con un pannello fotovoltaico policristallino. Lo scopo dell’esperimento è di rilevare in che misura il cambio di inclinazione (parametro β) e di orientamento est-ovest (parametro ) influisce sulla resa del pannello, e di verificare se il modello teorico proposto è in grado di prevedere adeguatamente la variazione percentuale di resa al variare dei parametri β e .

Le specifiche tecniche del pannello apposte sul retro dello stesso riportano in condizioni standard di test 1000W/m2 AM1.5 25° una resa nominale di 10W, con parametri di *power maximization* di 17.9V e 0.56A. Il pannello è senza marca.

E’ stato collegato al pannello un carico resistivo misurato di (32.8±0.3) Ω, sufficiente vicino all’ottimo dichiarato in etichetta di 31.9 Ω. Il resistore di potenza, di complessivi (30±1.5) Ω nominali, è stato montato su un dissipatore di alluminio recuperato da un amplificatore in disuso. Non è stato possibile reperire le specifiche tecniche del dissipatore, tuttavia le misure 120 x 70 x 40 mm, il peso di 320 g e il fatto che fosse montato in un amplificatore lineare di potenza da 40 W non dotato di ventilazione forzata, lo rendono compatibile con modelli nel range di 1.0 – 2.0 K/W, ampiamente sufficiente per le necessità dell’esperimento. Il dato è confermato dal fatto che dopo un’ora di uso a circa 6 W, il dissipatore risultava leggermente più caldo al tatto rispetto a quanto percepibile all’inizio delle rilevazioni. Si rileva comunque che essendo gennaio la temperatura ambiente era di 6°, massimizzando la dissipazione.

Il pannello è stato integrato in una struttura in legno mobile che ne permette di regolare manualmente l’inclinazione rispetto alla superficie (parametro β) in un range da 0 a 90°, e – ruotando la struttura – la declinazione della normale rispetto al sud geografico (parametro ). Il β è stato misurato con un Bosch Professional GLM 50 C (incertezza dichiarata dal produttore ±0.2°). La declinazione rispetto al sud geografico è stata misurata con la bussola del cellulare, tenendo il cellulare appoggiato sulla base piana della struttura in legno. Non è nota l’incertezza della bussola interna al cellulare, e la lettura riporta la prima cifra decimale.

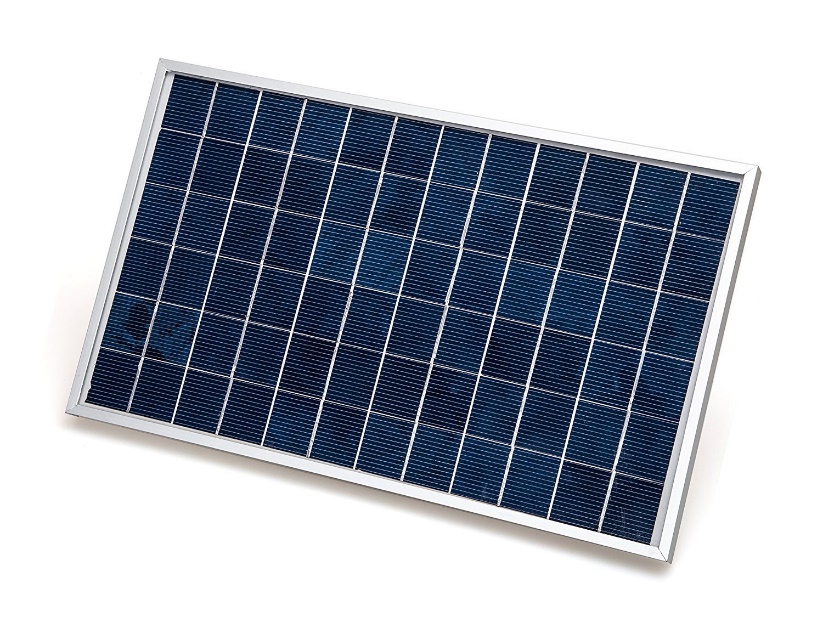


Figura Vista frontale del pannello

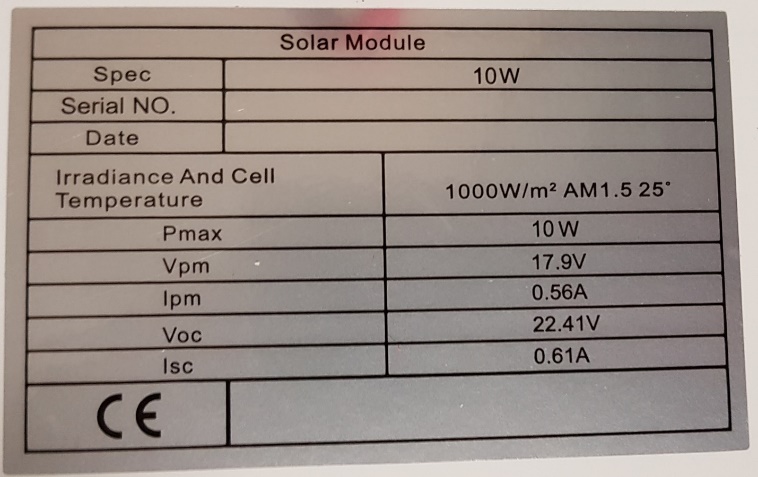
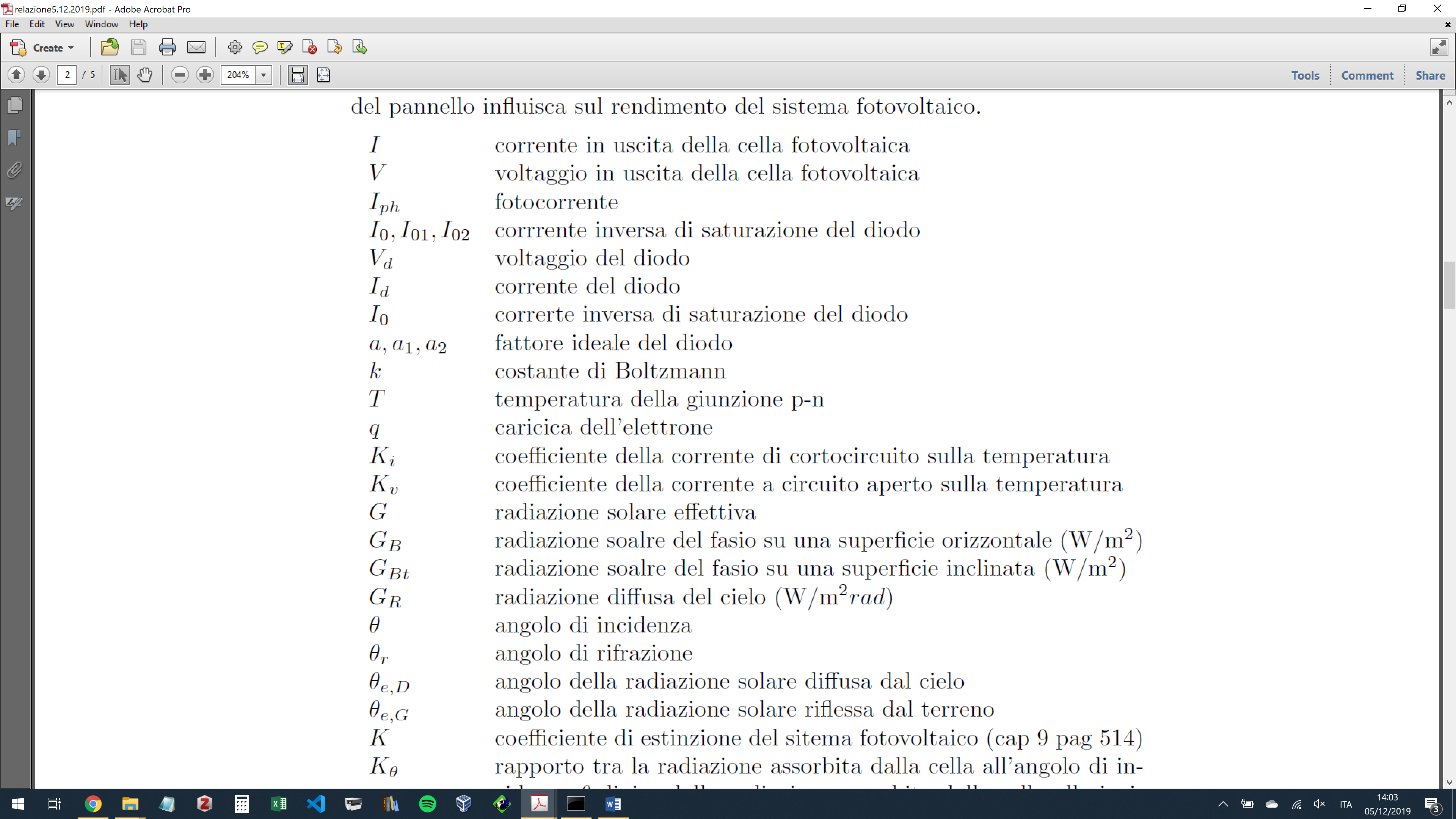
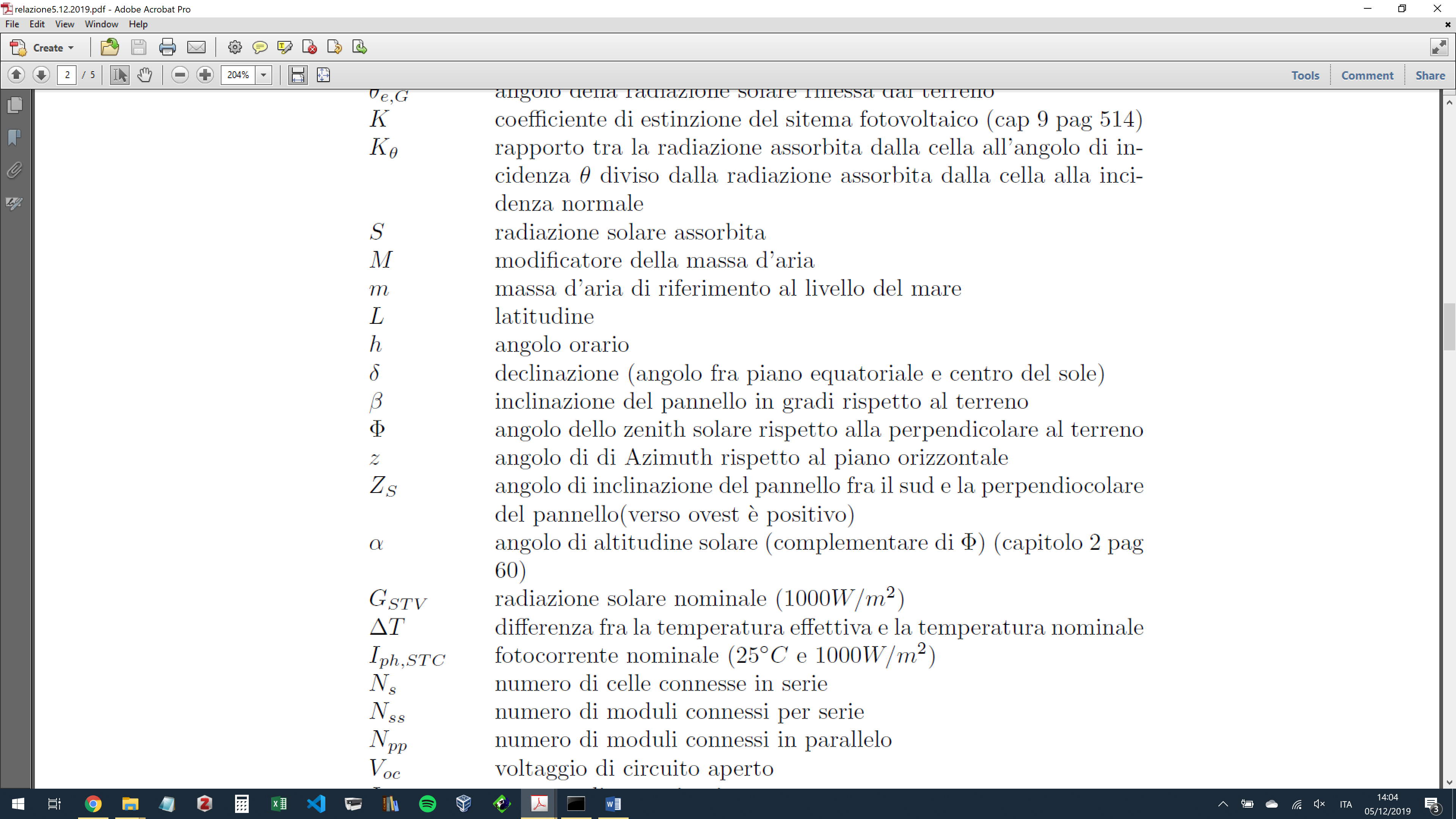


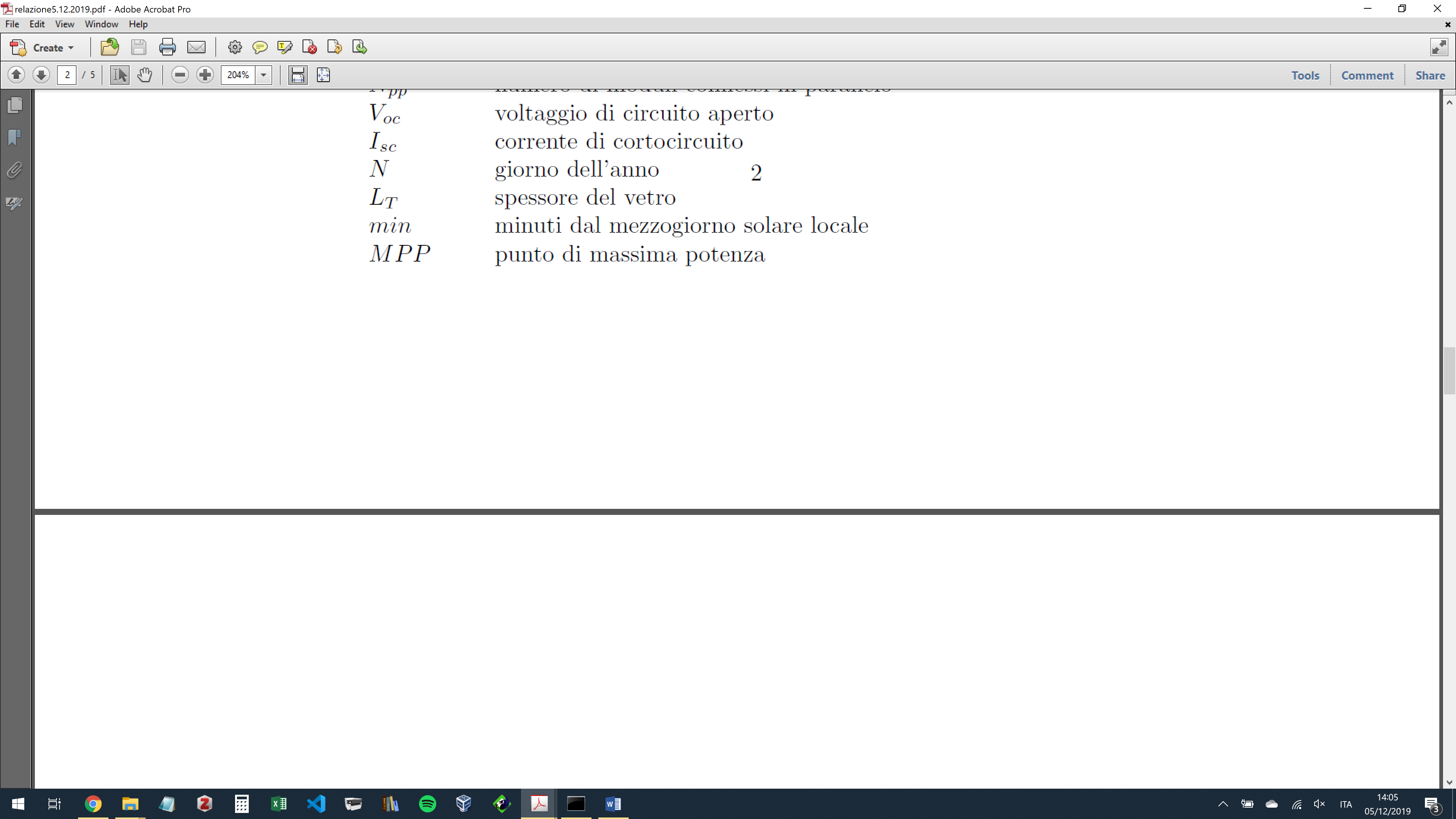
Figura 3 Etichetta con specifiche tecniche riportate sul retro del pannello

In una giornata di cielo sereno si è proceduto a variare il β e del pannello in posizioni prestabilite, rilevando la resa effettiva in W.

Legenda







1. Per la conversion in radianti bisogna tenerne conto in hss Pigreco /180 , e non riconvertirlo se si hanno già i radianti

   =24 \* 3600 \*B6/PI.GRECO()\*(COS(B4)\*COS(B12)\*SEN(B10)+(B10)\*SEN(B4)\*SEN(B12))

   dove è l’angolo orario corrispondente al tramonto. [↑](#footnote-ref-1)
2. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> [↑](#footnote-ref-2)
3. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> [↑](#footnote-ref-4)