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.

# 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

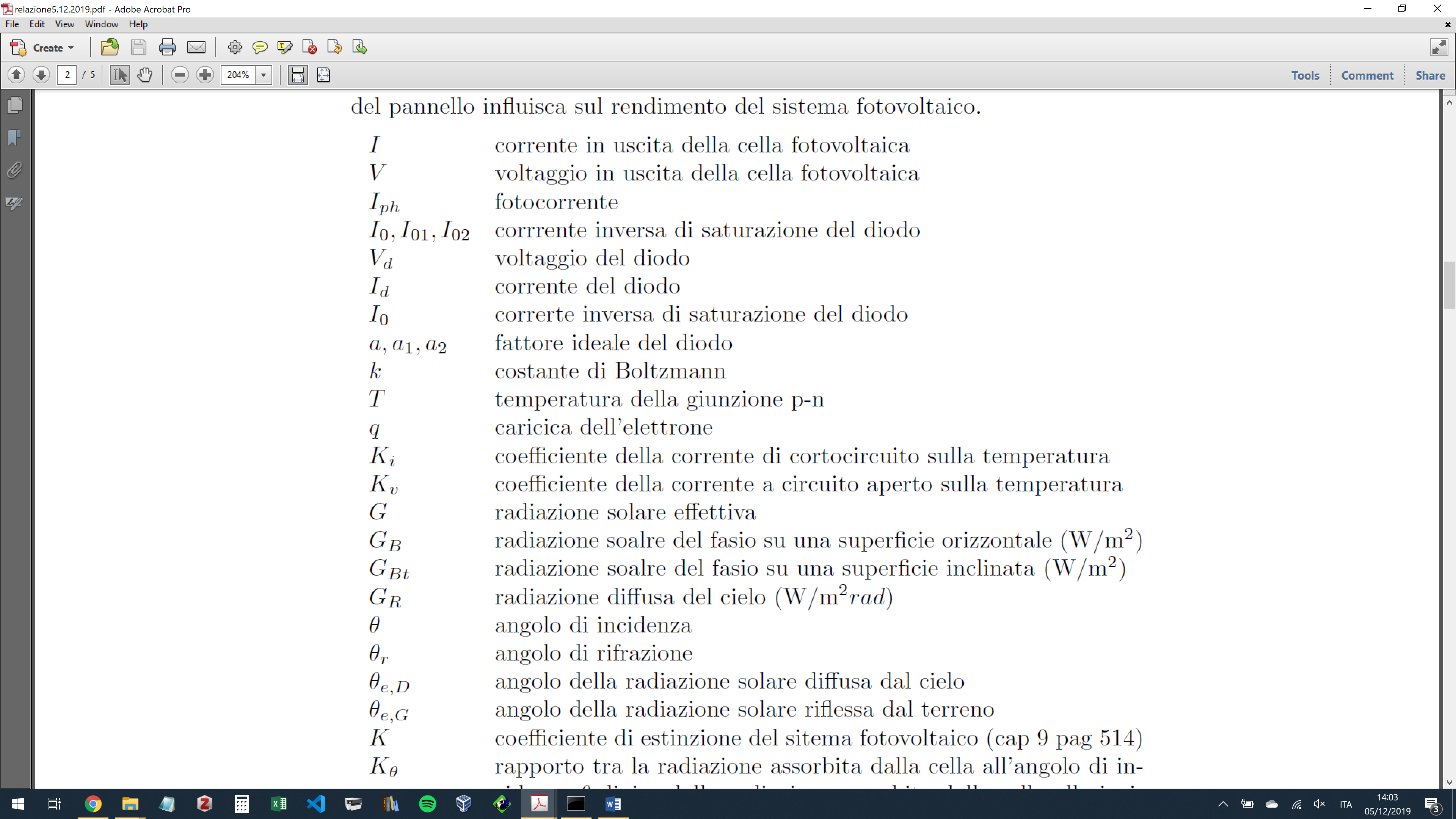
E

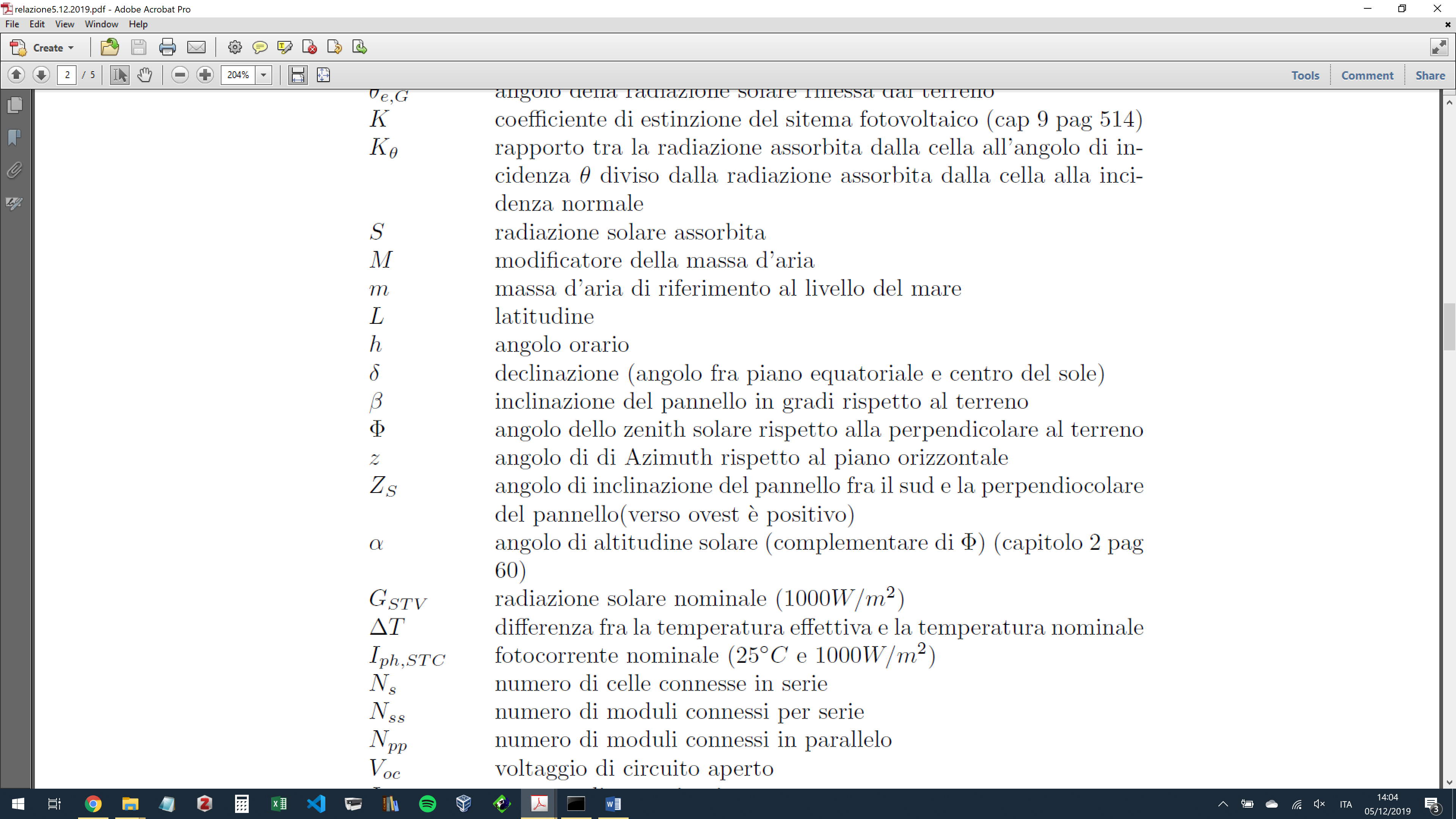
La radiazione solare diretta sul pannello ci permette di calcolare la radazione solare su una superficie orizzonale [W/m^2], dipendente dall’angolo di Zenith, e la radiazione solare su una superficie inclinata [W/m^2], dipendente dall’angolo di incidenza [vedi pg. 100]:

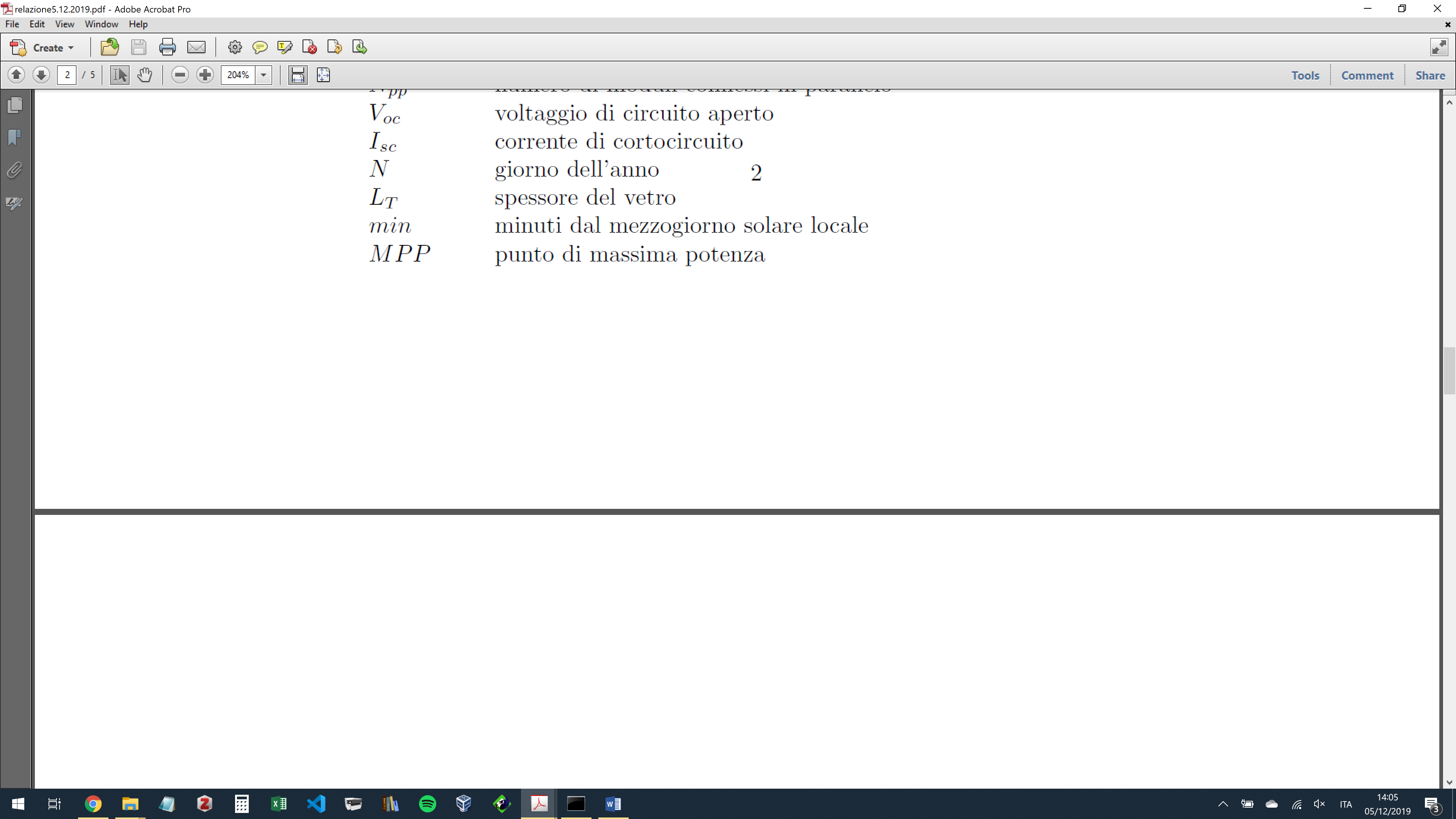
Il rapporto tra I coseni di tali radiaizoni degli angoli di incidenza e di Zenith permette di calcolare il *fattore correttivo di inclinazione della radiazione del fascio* [Eq 5]:

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)]:

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)