



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

**DESENVOLUPAMENT D'UNA APLICACIÓ EN LABVIEW PER A
L'AVALUACIÓ D'ALGORITMES MPPT I GMPPT**



Memòria i Annexos

Autor: Marçal Ferran Aymamí
Director: Guillermo Velasco Quesada
Convocatòria: Setembre 2018

Resum

El present treball de fi d'estudis està enfocat a l'anàlisi, avaluació experimental i comparació d'algoritmes de seguiment del punt de màxima potència (MPPT). Concretament es sotmetran a test els 2 algoritmes més presents en equips fotovoltaics destinats al consumidor particular basats en el principi *Hill Climbing*: Perturb & Observe (P&O) i Incremental Conductance (CondInc). Els experiments s'han realitzat per avaluar els algoritmes de base, sense les modificacions que sovint afegeixen alguns fabricants per millorar-ne el rendiment.

S'utilitza el software *Labview* tant per a la programació i comunicació amb els instruments com per a la posterior adquisició de dades durant els experiments. Aquestes proves test es basen en dos escenaris que es diferencien pels perfils de potència a que es sotmeten els algoritmes i per l'*step* de tensió amb que se'ls configura.

L'objectiu dels experiments és l'obtenció de les corbes de potència d'on poder calcular-ne l'energia i així poder comparar l'eficàcia d'ambdós algoritmes en els diferents escenaris. D'aquesta manera es podrà determinar si existeix una diferència notable entre els seus rendiments. Es veurà que, amb els mitjans utilitzats (equiparables a un entorn real), no existeixen diferències suficients que clarament permetin afavorir o descartar un algoritme sobre l'altre. L'abast del projecte és determinar per la via empírica si existeix diferència notable entre els dos algoritmes en qüestió, més enllà de la informació que ja està publicada.

La tria dels algoritmes s'ha realitzat en funció a dos criteris: freqüència d'ús dels algoritmes en els sistemes PV actuals (destinats a particulars) i ajust de la complexitat de programació al temps de realització del projecte. En referència al primer criteri, s'ha descartat la branca dels algoritmes de seguiment del punt de màxima potència global (GMPPT), ja que per les instal·lacions destinades a particulars abans esmentades no acostumen a ser necessaris i no s'implementen. Pel segon criteri també es descarta la branca dels GMPPT ja que requereix de mitjans (mesures de paràmetres independents per cada panell entre d'altres) i temps més enllà de l'abast del projecte.

Resumen

El presente proyecto final de carrera está enfocado al análisis, evaluación experimental y comparación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Concretamente se testearán los 2 algoritmos más presentes en el mercado del consumidor particular basados en el principio Hill Climbing: Perturb & Observ (P&O) e Incremental Conductance (CondInc). Los experimentos se han realizado para evaluar los algoritmos de base, sin las modificaciones que a menudo añaden algunos fabricantes para mejorar el rendimiento.

Se utiliza el software Labview tanto para la programación, comunicación con los instrumentos como por la posterior adquisición de datos durante los experimentos. Estas pruebas test se basan en dos escenarios que se diferencian por los perfiles de potencia a que se someten los algoritmos y por el step de tensión con que se los configura.

El objetivo de los experimentos es la obtención de las curvas de potencia de donde poder calcular la energía y así poder comparar la eficacia de ambos algoritmos en los diferentes escenarios. De este modo se podrá determinar si existe una diferencia notable entre sus rendimientos. Se verá que, con los medios utilizados (equiparables a un entorno real), no existen diferencias suficientes que claramente permitan favorecer o descartar un algoritmo sobre el otro. El alcance del proyecto es determinar por la vía empírica si existe diferencia notable entre los dos algoritmos en cuestión, más allá de la información que ya está publicada.

La elección de los algoritmos se ha realizado en función de dos criterios: frecuencia de uso de los algoritmos en los sistemas PV actuales (destinados a particulares) y ajuste de la complejidad de programación al tiempo de realización del proyecto. En referencia al primer criterio, se ha descartado la rama de los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia global (GMPPT), ya que por las instalaciones destinadas a particulares antes mencionadas no suelen ser necesarios y no se implementan. Para el segundo criterio también se descarta la rama de los GMPPT ya que requiere de medios (medidas de parámetros independientes para cada panel entre otros) y tiempo más allá del alcance del proyecto.

Abstract

This thesis is focused to the analysis, experimental evaluation and comparison of Maximum Power Point Tracking algorithms (MPPT). Specifically there will be tested the 2 more present algorithms in the market of the particular consumer based in the Hill Climbing principle: Perturb & Observe (P&O) and Incremental Conductance (CondInc). The experiments are aimed to evaluate the basis' algorithms, without the modifications that are usually added by some manufacturers to improve their performance.

The programming, communication with the instruments and acquisition of data during the experiments will be carried on through the Labview's software. These tests are based on two different stages of configuration: the power profiles applied to the algorithms and the step of voltage internally selected.

The aim of the experiments is to obtain the power slopes from the different algorithms to calculate the energy that has been gathered by the algorithms. With the energy results we will be able to compare the efficiency of both algorithms in the different stages. With this data it will be possible to determine if there's a remarkable difference between their performances. As it's depicted in this thesis, with the means used (close to reality), does not exist sufficient evidence that clearly allow to favour or discard an algorithm above or below the other. The scope of the project is to determine by empirical means if it exists this remarkable difference between the two algorithms mentioned, despite the information that has already been published.

The choice of the algorithms has been done based on two criteria: frequency of use of algorithms in current PV systems (intended for individuals) and adjustment of programming complexity to the timeline of the project. With reference to the first criterion, the branch of the algorithms for the tracking of the maximum global power point (GMPPT) has been ruled out, since facilities destined for the individuals mentioned above are not usually necessary and are not implemented. The second criterion also eliminates the GMPPT branch because it requires means (measures of independent parameters for each panel among others) and time beyond the scope of the project.



Agraïments

Voldria agrair la disponibilitat i guiatge del meu tutor, Guillermo Velasco, en les dificultats que han sorgit al llarg d'aquest camí de 6 mesos. L'ajut i suport moral de la família i companys més pròxims, especialment en Jordi i l'Adrià.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
1. INTRODUCCIÓ	9
2. ALGORITMES DE SEGUIMENT DEL PUNT DE MÀXIMA POTÈNCIA (MPPT)	10
3. MODELITZACIONS	13
3.1. Panell fotovoltaic	13
3.2. Algoritme Perturb and Observe (P&O)	15
3.3. Algoritme Conductància Incremental (CondInc)	16
4. IMPLEMENTACIÓ AMB LABVIEW	18
4.1. Panell fotovoltaic (simulador solar <i>AGILENT E4350B</i>)	18
4.2. Algoritme P&O i CondInc (simulador de càrrega <i>AGILENT 6060A</i>)	20
4.3. Comunicació amb els instruments	23
5. OBTENCIÓ I ANÀLISI DELS RESULTATS	25
5.1. P&O Step 0,1	26
5.1.1. Estacionari	26
5.1.2. Càlculs d'energia i rendiment	26
5.2. Conductància Incremental Step 0,1	32
5.2.1. Estacionari	32
5.2.2. Comparació d'algoritmes en l'escenari 1	35
5.3. P&O step 0,5	39
5.3.1. Rampa	39
5.3.2. Càlcul d'energia i rendiment	40
5.4. Conductància Incremental step 0,5	41
5.4.1. Rampa	41
5.4.2. Càlcul d'energia i rendiment	42
5.4.3. Comparació dels algoritmes en l'escenari 2	43
6. ANÀLISI DE L'IMPACTE	45

CONCLUSIONS	47
PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	49
BIBLIOGRAFIA	45

1. Introducció

Els algoritmes MPPT són un element indispensable en la majoria de sistemes fotovoltaics. El projecte se centrarà en avaluar-ne el comportament davant diversos escenaris i poder-los comparar. Per tant, el treball girarà entorn la figura dels algoritmes més enllà d'elements com el convertidor DC/DC, que es tractaran com 'caixes negres'.

El programari utilitzat serà el Labview per a la implementació dels algoritmes i la modelització del panell fotovoltaic i el Matlab per al posterior anàlisi matemàtic dels resultats. El Labview posseeix eines d'adquisició de dades molt interessants per l'objecte del treball i també certa capacitat gràfica per representar els resultats tot i que es treballarà amb *excel* posteriorment.

L'objectiu no només és programar els algoritmes i sotmetre'ls a test sinó que l'estructura resultant generada amb Labview permeti en moments posteriors servir per simular qualsevol condició (irradiància, temperatura) per ser simulada enfront altres algoritmes. També serà aprofitable el model de panell solar per altres usos i aplicacions.

En el sector dels algoritmes de seguiment en general hi existeixen dues tipologies esmentades anteriorment: els de seguiment del punt de màxima potència (MPPT) i els de seguiment del punt de màxima potència global (GMPPT). Es diferencien en que en el primer cas, no es discerneix si el màxim trobat és local o global, amb les pèrdues d'eficiència que això comporta. En canvi els GMPPT permeten de localitzar el màxim global. Les condicions amb que es poden donar múltiples màxims són les d'ombra parcial, *Partial Shading* (PS), que succeeixen en instal·lacions PV grans on hi ha zones diferenciades amb una irradiància diferent degut a ombres.

Per trobar el MPP en aquests casos es recorre a mètodes o algoritmes com el de Chen, que precisa de mesures pròpies de tensió per cada panell i de fer una ordenació dels diferents voltatges, dels grups i del nombre de mòduls amb cada voltatge. A continuació, a través d'una formulació dels paràmetres anteriors, se situa el punt de treball al 'peu' de cada una de les corbes dels possibles màxims. En aquest moment, una subrutina 'cria' un algoritme MPPT convencional com el P&O per tal que trobi tots els màxims i així fer una comparació final per detectar el GMPPT. Com es pot intuir, aquest mètode requereix de múltiples panells i múltiples mesures per cada panell.

2. Algoritmes de seguiment del punt de màxima potència (MPPT)

Un sistema fotovoltaic autònom està format per diversos components, entre ells els inversors, els propis panells, el convertidor DC/DC i les bateries. D'aquests elements, el que més pèrdues de rendiment presenta actualment és el panell fotovoltaic, amb eficiències comercials màximes entorn el 20-23% en el cas dels monocristalins.

Per aquest motiu és important la figura de l'algoritme MPPT, una eina de seguiment del punt de màxima potència incorporada al regulador o al convertidor (a vegades fins i tot a l'inversor) que en modifica el cicle de treball (Duty Cycle) per aprofitar la màxima energia del panell en cada moment.

Actualment existeixen nombrosos algoritmes per fer aquesta tasca, alguns presenten una eficiència molt alta en qualsevol condició climatològica però són exigents energètica i tècnicament, altres són més robusts però amb *handicaps* en entorns determinats.

L'objectiu dels algoritmes és localitzar el punt de màxima potència el qual es defineix a partir de dos paràmetres: la tensió (V_{pmp}) i la intensitat (I_{pmp}).

Els algoritmes MPPT es poden classificar en directes i indirectes. Normalment, els mètodes indirectes requereixen d'un coneixement previ de la configuració dels panells, ja que se serveixen de relacions matemàtiques entre els punts coneguts i dades ambientals de la zona. Dos dels mètodes indirectes més estesos són els que aplicant un factor als valors de voltatge de circuit obert (V_{oc}) i el corrent de curtcircuit (I_{sc}) d'una determinada configuració poden aproximar-se al PMP però no proveir-lo de forma real. Un dels motius d'aquesta imprecisió és el fet que tant V_{oc} com I_{sc} varien amb la irradiància i la temperatura, fet que obliga a obtenir mesures periòdiques d'aquests valors. El fet que la freqüència de les medicions no sigui prou constant i que els propis paràmetres són valors empírics aproximats causa aquesta inexactitud de base en aquests mètodes.

Pel que fa als mètodes directes, que n'existeixen un nombre elevat, se'n destaquen quatre: els que es basen en les tècniques del *Hill Climbing* [**Perturb & Observe (P&O)** i **Incremental Conductance (CondInc)**] i els classificats com a mètodes intel·ligents que fan servir *Fuzzy Logic* (lògica difusa) i *Neural Networks* (xarxes neuronals).

Tècniques Hill Climbing

Tant el P&O com el CondInc utilitzen l'esmentada tècnica per dur a terme el seguiment del PMP. El principi consisteix en introduir una pertorbació al cicle de treball (Duty Cycle - DC) que modifica la

impedància que "percep" el panell o matriu de panells. Aquesta pertorbació implicarà un canvi en el punt de treball del sistema i, per tant, una potència diferent a l'anterior. Si la potència "nova" és major a la de l'instant passat, la direcció de les pertorbacions és la correcta i s'hauran de seguir aplicant en la mateixa direcció. En cas contrari, les pertorbacions hauran de canviar de signe fins a assolir el PMP, moment en el que el sistema hi oscil·larà al voltant. Aquest fet és una característica típica d'aquest tipus d'algoritmes.

En la següent figura es mostra la forma de la corba característica de tensió-corrent (blava) i potència-tensió (vermella) d'un panell PV amb els PMP respectius i paràmetres d'interès com l' I_{sc} i el V_{oc} .

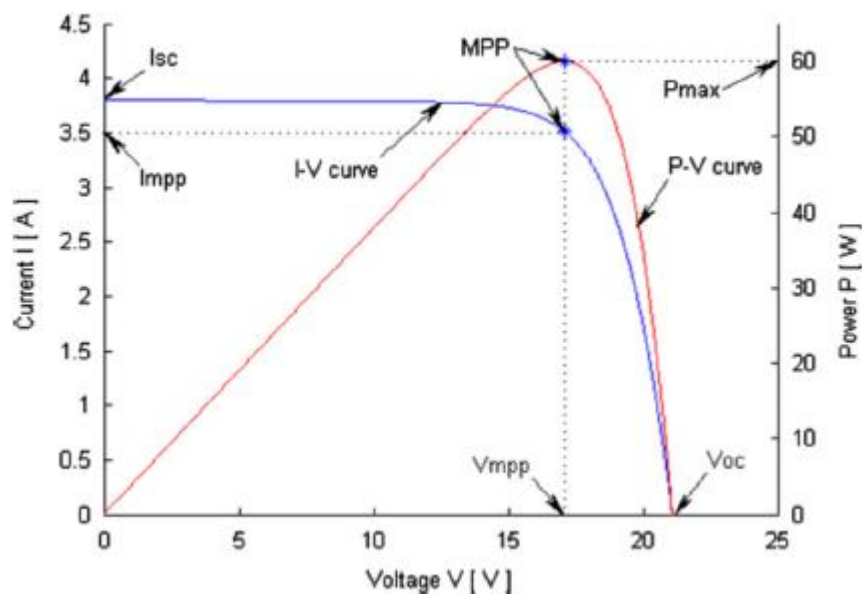


Figura 2.1. Característiques I-V i P-V d'un panell fotovoltaic. Font: A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems.

Com s'aprecia, si el punt de treball es troba en un moment determinat a l'esquerra de la corba vermella de potència, les pertorbacions (*steps*) de tensió aniran en augment (positives), si per contra la zona de treball se situa a la dreta, la direcció de les pertorbacions haurà de ser negativa per tal d'arribar al PMP.

Aquests mètodes són els més populars deguts a la seva facilitat d'implementació i bon rendiment. També presenten un baix consum d'operació i són els més usats pels fabricants enfocats a les instal·lacions d'autoconsum de nombrosos usuaris.

Els contres que presenten es basen en la dificultat de seguir de forma precisa el PMP davant canvis constants de les condicions atmosfèriques i el fet que ambdós oscil·len de forma estacionària entorn

el PMP (si bé el CondInc ho fa en menor quantitat). L'amplitud de les oscil·lacions va lligada amb la mida de l'*step* o tensió de referència, que quan més gran és també més grans seran les oscil·lacions. Ja que tant l'amplitud de les oscil·lacions com la velocitat de seguiment van relacionades amb la mesura de l'*step* de tensió, normalment es recorre a un punt intermedi (*trade off*) que satisfaci les dues necessitats.

Mètodes intel·ligents

Aquests mètodes no ocupen l'abast del treball, si bé es mencionaran no es farà una definició acurada ni s'entrarà en matèria més enllà del coneixement bàsic.

Tant l'ús de la lògica difusa com de les xarxes neuronals són part del que s'anomena *Soft Computing*. En el cas del *fuzzy logic* no es necessiten models matemàtics precisos, ofereixen una ràpida convergència vers el PMP i tenen bon rendiment sota condicions atmosfèriques variants. És una tècnica basada en 'quasiestats' o 'funcions de pertinença' que són un tipus d'entrades a mig camí entre dos estats definits i que segueixen 'regles base'. Aquest fet permet adaptar-se més bé a entorns variants. Per bé que és una tècnica eficient és molt dependent en com s'implementa en cada cas i en l'elecció apropiada de la regla de base.

EmE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Figura 2.2. Regla base. Font: Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications

Pel que fa a les xarxes neuronals, es basen en un conjunt de capes i nusos relacionats entre ells que contenen paràmetres característics de la configuració del sistema PV. És necessari una preconfiguració de la xarxa aplicant patrons de dades (del lloc d'instal·lació concret) entre les entrades i les sortides durant un temps per tal d'equilibrar els pesos de les capes i els nusos i que el seguiment sigui precís. Com es pot intuir, es necessita recopilar les dades específiques de cada instal·lació prèviament cosa que fa costosa la implementació d'aquest mètode. A més, la preconfiguració s'ha de dur a terme de manera periòdica degut als canvis naturals de la zona al llarg del temps.

3. Modelitzacions

Per poder dur a terme les comparacions entre els dos algoritmes seleccionats s'han escollit els models pertinents per a poder definir-los i implementar-los. Per al panell s'ha prioritzat un model que introduint dades d'irradiància, temperatura ambient i temperatura de la cel·la PV les sortides tinguin, almenys, tots els paràmetres necessaris per inicialitzar els algoritmes i proporcionar als instruments les dades que requereixen per generar els punts de treball: I_{sc} , V_{oc} , V_{mpp} , I_{mpp} , P_{mp} .

3.1. Panell fotovoltaic

L'objectiu d'aquesta modelització és generar un programa amb Labview (VI Virtual Instruments) capaç de suplir les dades necessàries al simulador *AGILENT E4350B* per tal que aquest treballi en mode *SAS (Solar Array Simulator)* en un entorn controlat per l'usuari de manera que s'hi puguin entrar els paràmetres desitjats per realitzar els experiments.

En primer lloc s'ha acotat quina informació de partida es vol subministrar com a variables d'entrada al programa: Irradiància i temperatura. Amb aquestes dues variables d'entrada, el programa ha de ser capaç de transformar-les en *outputs* llegibles pel simulador. Abans però, cal que aquestes variables en proporcionin d'altres com el corrent de curtcircuit del panell (I_{sc}), la tensió de circuit obert (V_o) i altres paràmetres d'ús del panell. Aquestes transformacions dependran directament del model escollit de panell solar, que ha estat seleccionat seguint un criteri molt clar entre precisió i versatilitat a l'hora de treballar-hi, obviant o incloent les capes pertinents a tal efecte. El model bàsic escollit es pot representar amb aquest esquema:

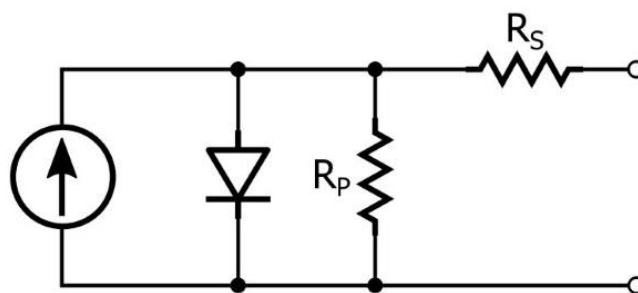


Figura 3.1. Circuit de la cel·la fotovoltaica (Font: A Simple and Efficient MPPT Method for Low-Power PV Cells)

Les equacions de treball s'han basat en la descripció clàssica del panell:

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{q(V+R_s \cdot I)}{n d \cdot K \cdot T_{cell}} \right)} - 1 \right] - \frac{V+R_s \cdot I}{R_p} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

On $I_{ph} \sim I_{sc}$, I_0 és el corrent de saturació del díode, q és la càrrega de l'electró, $n d$ és el factor d'idealitat del díode, K és la constant del Boltzmann i T_{cell} es la temperatura de la cel·la en Kelvins.

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \left(\frac{V_{oc}}{R_p} \right)}{\frac{q \cdot V_{oc}}{[e^{n d \cdot K \cdot T_{cell}} - 1]}} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

On R_p és la resistència shunt i V_{oc} és el voltatge de circuit obert.

$$I_{sc}(T_{cell}, G) = \frac{G}{1000} [I_{scr} + \alpha \cdot (T_{cell} - T_r)] \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$V_{oc}(T_{cell}, G) = [V_{ocr} + \beta(T_{cell} - T_r) \cdot [1 + \rho_{oc} \cdot \ln\left(\frac{G}{G_{oc}}\right) \cdot \ln\left(\frac{G}{G_r}\right)]] \quad (\text{Eq. 3.4})$$

On G és la irradiància incident en W/m^2 , α i β són els coeficients de temperatura de corrent i voltatge respectivament, I_{scr} i V_{ocr} són valors que depenen d'una irradiància de referència G_r i una temperatura de la cel·la (T_r) i ρ_{oc} i G_{oc} són dues constants empíriques utilitzades per modelitzar la variació de V_{oc} a baixa G : $G_r = 1000 W/m^2$ i $T_r = 25^\circ C$. ρ_{oc} i $G_{oc} = -0,04$ i $1000 W/m^2$ respectivament.

$$T_{cell} = T_a + \frac{T_{cell, NOCT} - 20}{800 W/m^2} G \quad (\text{Eq. 3.5})$$

On T_{cell} , $NOCT$ és la temperatura nominal d'operació de la cèl·lula PV (entre $42^{\circ}C$ i $48^{\circ}C$).

3.2. Algoritme Perturb and Observe (P&O)

L'objectiu en la modelització de l'algoritme s'ha basat en obtenir un diagrama de base del P&O en forma de *flowchart* de manera que sigui traduïble amb capes booleanes a Labview. S'ha optat per un model estàndard sense modificacions, per poder testejar l'algoritme de base.

Així doncs, s'ha optat pel següent diagrama de fluxos per al P&O:

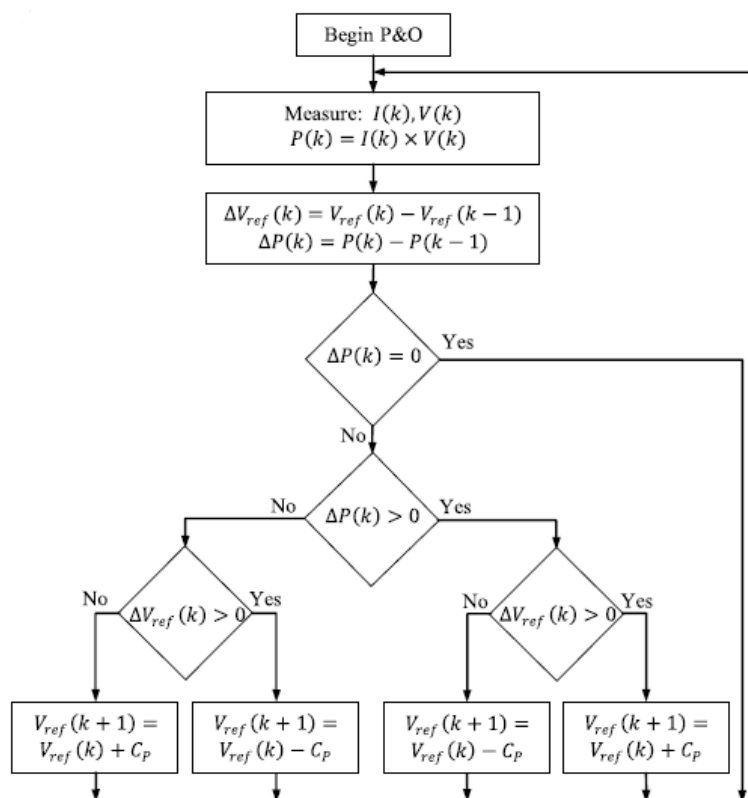


Figura 3.2. Diagrama de flux del P&O (Font: A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems)

Els paràmetres d'entrada són les lectures presents (k) de corrent i tensió de les quals s'obté la potència a l'instant k . A continuació es generen dues variables ΔV_{ref} i ΔP (Increments de voltatge de referència i de potència respectivament), que depenen de la magnitud en l'instant anterior ($k-1$). Seguidament s'estableixen 4 comparacions per dilucidar si l'step en el voltatge de referència ha de ser positiu o negatiu.

El primer grup de comparació descarta que ΔP sigui zero, ja que significaria que el sistema treballa en el Pmp exacte. En cas que sigui zero retorna la mateixa consigna de V_{ref} a l'inici, en cas que no, l'algoritme passa al següent grup de comparació. En aquest moment es compara el signe d' ΔP , si aquest és més gran que zero significa que la potència present (k) és més gran que la potència en l'instant anterior ($k-1$) i que, per tant, la direcció (signe) de les pertorbacions (*steps*) és l'adequada. En cas que sigui menor que zero indica tot el contrari i en ambdós casos es passa al següent grup de comparació. Aquest segon grup dilucida en quina 'banda' del Pmp es troba el punt de treball i s'esbrina a través del propi ΔV_{ref} . Depenent del signe de l'increment de la consigna es sabrà en quina direcció s'ha d'aplicar l'*step* en l'instant futur ($k+1$) i aquest valor esdevindrà la nova consigna a enviar al simulador de càrrega.

3.3. Algoritme Conductància Incremental (CondInc)

L'objectiu en el cas de l'algoritme CondInc és el mateix que en el P&O: és necessari trobar un diagrama de flux que sigui traduïble a Labview i que no presenti modificacions, per tal de poder analitzar l'algoritme de base juntament amb el P&O.

El *flowchart* proposat és el següent:

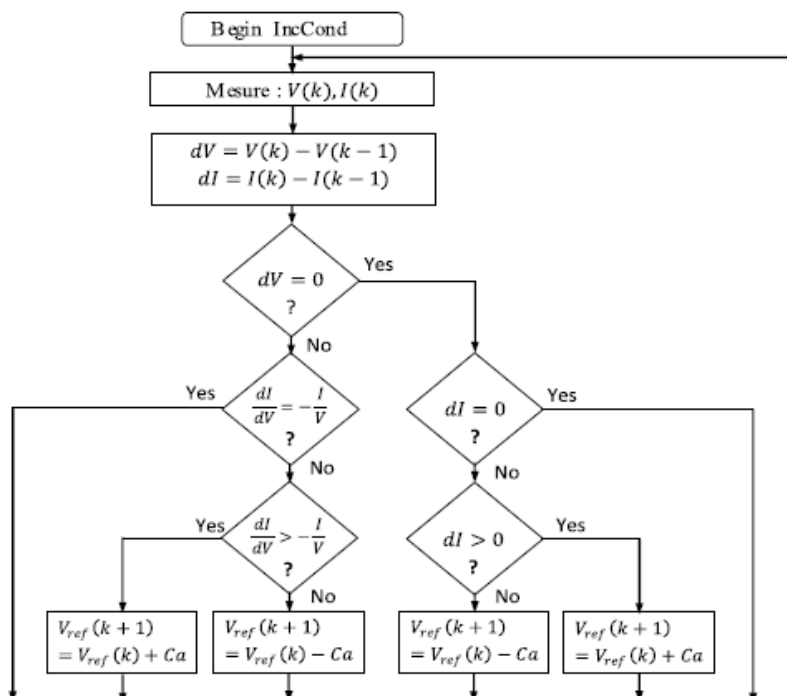


Figura 3.3. Diagrama de flux del CondInc (Font: A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithm applied for photovoltaic systems)

El CondInc treballa de manera molt similar al P&O, els canvis substancials se situen entorn a l'eina de comparació, que en aquest cas és el pendent de la corba V/P (que és zero en el Pmp). Les variables d'entrada segueixen sent la tensió i corrent actuals (k) i es transformen a diferencial (increment) per a treballar-hi ($k-(k-1)$). Les premisses per esbrinar la situació del punt de treball del sistema són:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ (al Pmp)}$$

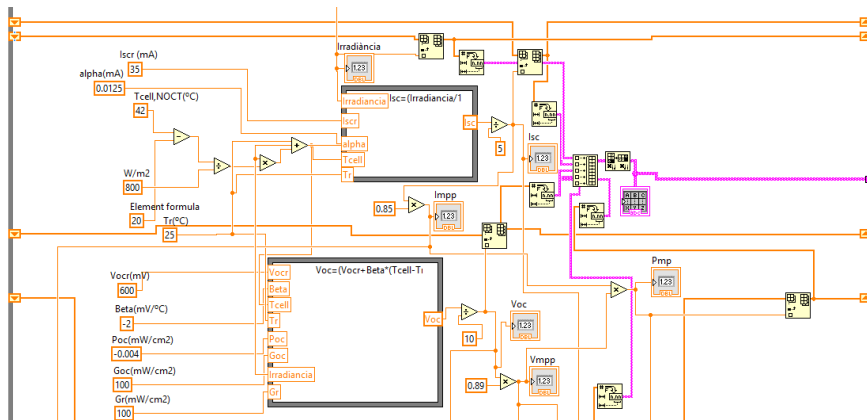
$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ (esquerra)}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ (dreta)}$$

Aquestes són les operacions que es traduiran a capes de *case event node* (Boole) al Labview i iteraran a la freqüència desitjada per trobar el Pmp.

4. Implementació amb Labview

4.1. Panell fotovoltaic (simulador solar *AGILENT E4350B*)



Seguint el model proposat a la **secció x**, s'ha implementat el programa a l'interior d'un llaç *while* on s'ha disposat un control de temps per executar-se (*Wait Untill Next ms Multiple*). Aquest control serà útil més endavant per seleccionar la freqüència de canvis en paràmetres com l'irradiància o la temperatura.

L'estructura interna del llaç s'ha implementat per tal que a partir de la irradiància, la temperatura i els altres paràmetres d'entrada constants expressats en les equacions de la **secció x** s'obtinguin les variables de sortida desitjades per al simulador solar. Aquestes variables s'obtenen a través dels nusos de formules (*formula node*) i operadors matemàtics bàsics que utilitzen les entrades proporcionades esmentades.

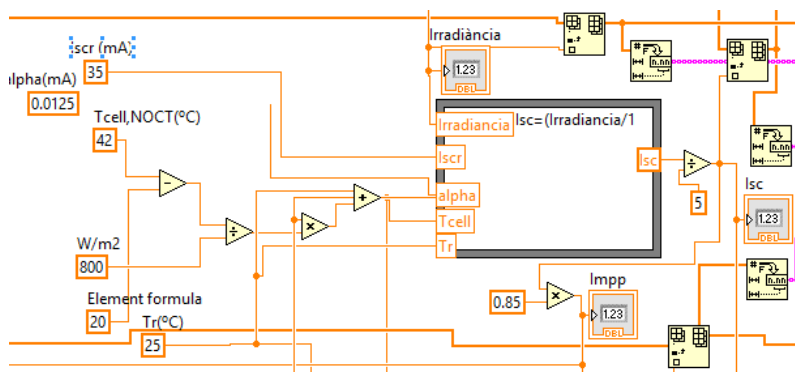


Figura 4.1. Detall d'un *formula node* amb les entrades i sortides (Font: Pròpia)

A les sortides dels blocs de fórmules s'han afegit eines per a la recopilació en temps real dels valors que va generant el programa. També s'han aplicat factors de forma a les mateixes sortides que es poden veure en la **imatge x** per tal d'ajustar proporcionalment els valors obtinguts per una cel·la d'1 cm² a un panell estàndard d'uns 260 W de potència màxima.

Com s'ha esmentat, els canvis d'irradiància venen coordinats per dues eines simples: el registre de dades (*shift register*) i el control de temps.

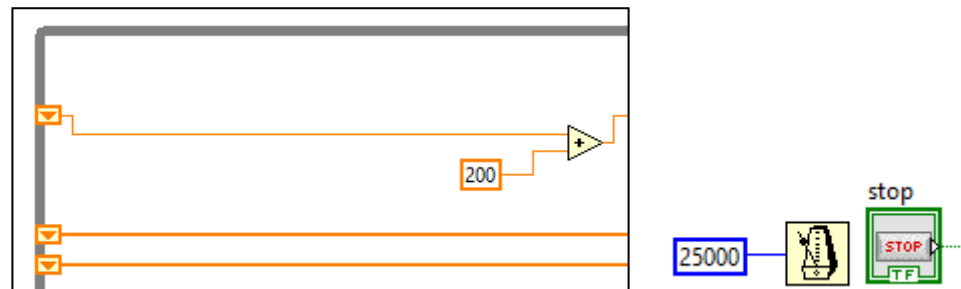


Figura 4.2. Registres de dades, vector sumador i control de temps. (Font: Pròpia)

Per a la comunicació de dades d'entrada i sortida amb l'instrumentació s'han utilitzat les paletes per protocols VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) de Labview. Aquestes funcions permeten entrar comandes SCPI concatenades (*Standard Commands for Programmable Instruments*) mitjançant *string constants* i programar els modes de treball desitjats per cada instrument, que per l'*AGILENT E4350B* s'ha tractat del mode SAS (Solar Array Simulator). A la següent imatge es pot apreciar la selecció del port GPIB, la preconfiguració del simulador en mode SAS i l'introducció de comandes i valors mitjançant *strings* concatenades.

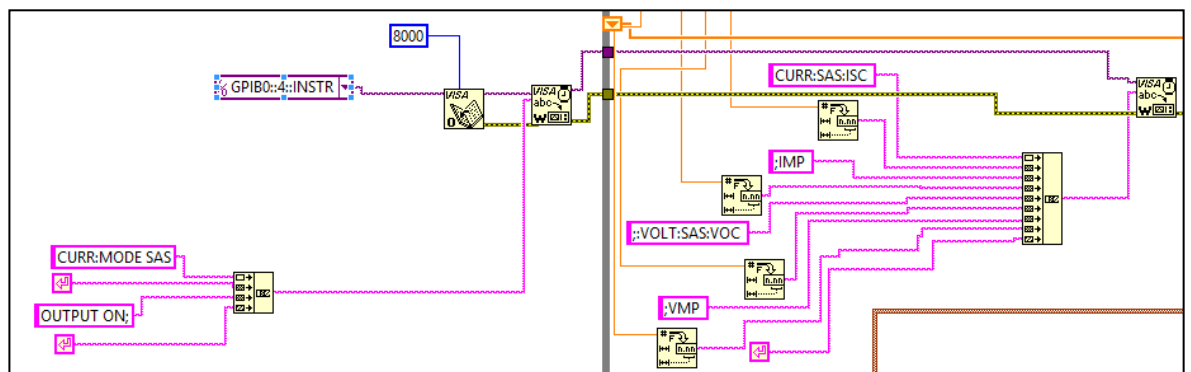


Figura 4.3. Etapa de comunicació amb VISA i SCIP. (Font: Pròpia)

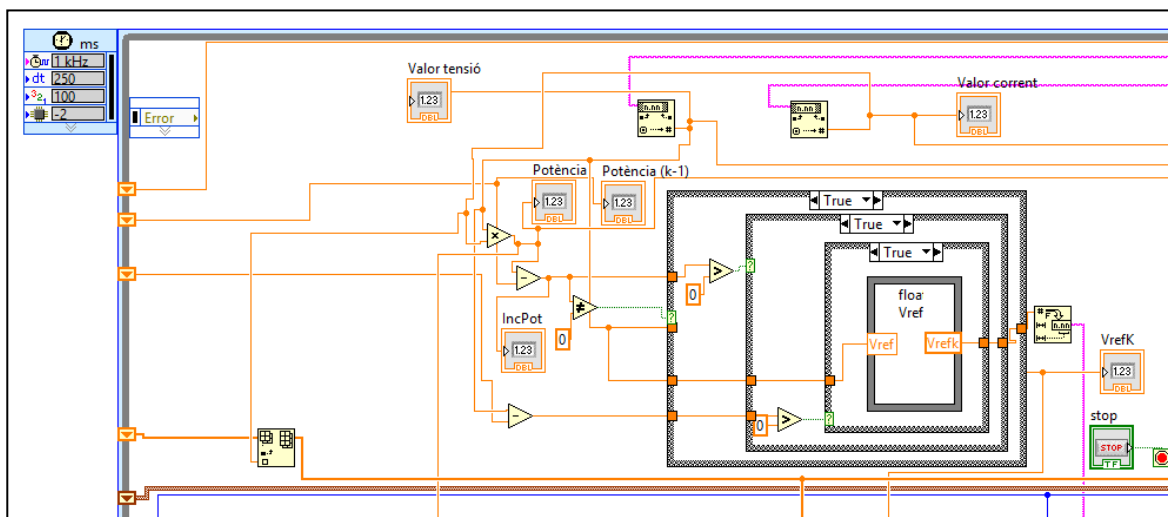
Les variables necessàries per al mode SAS són el corrent de curtcircuit, la corrent en el punt de màxima potència, el voltatge de circuit obert i el voltatge en el punt de màxima potència. Amb aquestes dades el simulador traça de forma interna una dispersió de punts equivalents a la corba

característica V-I del panell PV.

4.2. Algoritme P&O i CondInc (simulador de càrrega AGILENT 6060A)

L'implementació de l'algoritme P&O amb Labview ha requerit de la traducció i posterior adaptació del model escollit en la **secció x** per a poder interactuar de forma correcta amb els instruments.

En primer lloc s'ha escollit un tipus d'estructura diferent que en el cas del simulador solar, aquest cop s'ha optat per un *Timed Loop*. Aquesta tria ve justificada per la necessitat de controlar de forma molt precisa la freqüència d'iteració i de transmissió de dades contínuament així com la sincronització amb els instruments. El *Timed Loop* brinda aquesta possibilitat i no necessita de controls addicionals com en el cas del llaç *while*.



Per tal d'establir el criteri de temps per les dades d'entrada en els algoritmes s'ha optat per les consideracions següents:

- Les lectures directes del GPIB en temps real es consideren instant (k).
- Les lectures directes del GPIB que passen pel registre de dades es consideren instant (k-1).
- Les sortides de voltatge de referència de l'últim *case event* es consideren instant (k+1).

A partir d'aquestes 3 consideracions es poden començar a transformar les variables d'entrada mostrades en el diagrama de flux de la **secció x** en els paràmetres de comparació del primer *case event*, que compararà si $\Delta P > 0$ (ja que el $\Delta P = 0$ s'ha comprovat fora per practicitat).

En la següent imatge **fig. x** s'aprecien les 3 estructures *case event* corresponents a les 3 etapes del diagrama de flux. L'entrada *Vref* fa referència a la consigna de tensió a l'instant (*k*), i la sortida *Vrefk* fa referència a la consigna de sortida en l'instant (*k+1*). La darrera i més interna estructura és una *formula node* que s'encarrega d'aplicar l'*step* corresponent depenent si l'anterior decisió del *case event* estima que el punt de treball es troba a la dreta o a l'esquerra del *Pmp*.

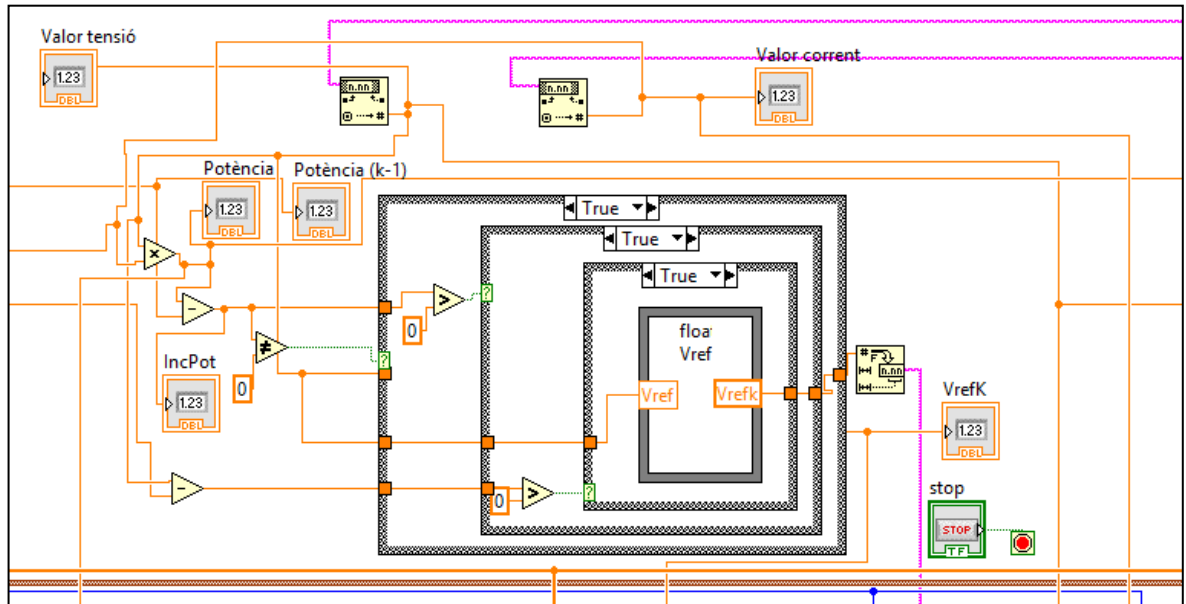


Figura 4.4. Vista de l'algoritme implementat i les diferents variables. (Font: Pròpia)

Per a la selecció de l'*step* i la freqüència d'iteració s'ha recorregut a la pràctica empírica del *trade-off*, d'ús comú per trobar quina és la relació adient entre una bona velocitat de seguiment i una oscil·lació mínima entorn el *Pmp*. El valor que millors resultats ha aportat ha estat el 0,1V de tensió, és a dir, a cada iteració la tensió de referència variarà entre 0, 0,1 i 0,2 V i el de 4 Hz de freqüència d'iteració en el *timed loop*. El següent valor més propici a estat el de 0,5V i la mateixa freqüència de 4Hz.

Altres valors més grans d'*step* proporcionaven una major velocitat de seguiment en l'etapa lineal però unes oscil·lacions insostenibles a nivell de rendiment energètic a l'etapa estacionària, si bé aquests paràmetres podrien funcionar en un entorn de canvis meteorològics molt freqüents, en la major part del temps d'oscil·lació es perdria una energia considerable, cosa que ha fet que siguin descartats. També s'ha intentat, en el sentit contrari, millorar-ne l'eficiència reduint l'*step* per tal que les pèrdues per oscil·lació siguin menors i compensar-ho amb una major freqüència d'iteració amb l'objectiu que en l'etapa lineal de seguiment la disminució de l'*step* passi desapercebuda. Aquesta variant però ha causat nombrosos problemes de lectura del GPIB, possiblement per solapament de dades en els llaços (shift registers i/o operacions) del programa degut a la velocitat.

Pel que fa a la implementació del CondInc, s'ha utilitzat el mateix criteri de temps que en el P&O: les variables en temps real són instant (k), les dades que passen pel *shift register* esdevenen ($k-1$) i les sortides del darrer *case event* són ($k+1$).

L'estructura de comunicació amb els instruments és l'única part que es manté respecte el P&O.

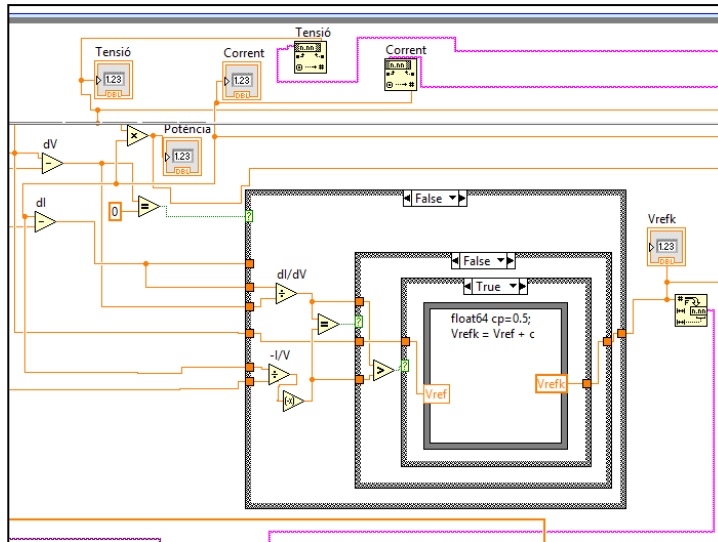


Figura 4.5. Vista de l'algoritme CondInc. (Font: Pròpia)

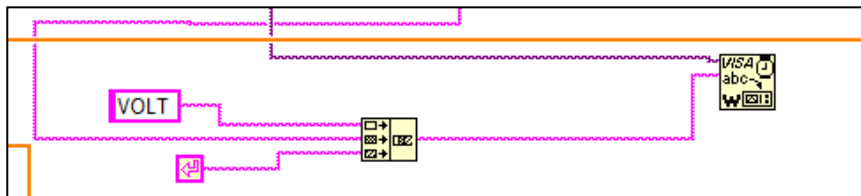


Figura 4.6. Detall del punt on es transmet la consigna Vrefk a l'instrument. (Font: Pròpia)

4.3. Comunicació amb els instruments

L'ús d'instruments ha propiciat la necessitat de poder-los configurar remotament per tal que treballin tant en el mode que es desitja com que rebin i transmetin les dades corresponents quan es requereixi.

S'ha utilitzat el llenguatge SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments), adient pel hardware GPIB que s'ha utilitzat i seguint les indicacions de l'Operating Guide per ambdós instruments.

Solar Array Simulator Agilent E4350B

Per la comunicació amb el simulador solar en primer lloc s'han utilitzat les comandes per configurar el mode de treball (SAS) i per habilitar la sortida:

- CURR:MODE SAS

- OUTPUT ON;

A continuació s'han concatenat les comandes per tal que la part string sigui fixa i els valors provinents del panell simulat (Isc, Imp, Voc, Vmp) puguin variar segons les configuracions d'irradiància i temperatura disposades pels dos escenaris:

- CURR:SAS:ISC

- Entrada de la variable Isc

- ;IMP

- Entrada de la variable Imp

- ;:VOLT:SAS:VOC

- Entrada de la variable Voc

- ;VMP

-Entrada de la variable VMP

Agilent Electronic Load 6060B

Aquest instrument s'utilitza per simular, dissenyar i avaluar bateries, fonts, i components de potència. Les principals opcions d'operació de l'instrument són: Constant Current (CC), Constant Voltage (CV) o Constant Resistance (CR).

Pels 2 escenaris en qüestió s'ha configurat l'instrument amb el mode Constant Voltage (CV), de manera que constantment podrem enviar-li consignes de tensió perquè les apliqui als borns de sortida. Així doncs:

- MODE: VOLT

- INPUT ON

Preconfigurat el mode i habilitada l'entrada.

- VOLT

- Entrada de la variable V_{refk} (consigna provinent de l'algoritme)

Aquesta part llegirà les consignes de l'algoritme i les aplicarà als borns.

- MEAS:VOLT?

- MEAS:CURR?

Aquesta part llegirà els valors actuals de tensió i corrent que seran les variables d'entrada de l'algoritme a partir de la qual iterarà. Amb aquest bucle d'entrades i sortides és on s'assignen els temps $(k-1)$, (k) i $(k+1)$ a través dels registres de desplaçament (*shift registers*).

5. Obtenció i anàlisi dels resultats

La connexió dels simuladors i l'ordinador s'ha dut a terme mitjançant un bus GPIB. Tant les variables d'entrada com de sortida dels algoritmes provenen de les sondes del simulador de càrrega DC tot i que és indiferent si provenen del SAS o de la càrrega ja que el punt és el mateix, s'ha fet així per agrupar les dades de l'algoritme a una sola adreça GPIB. Les dades d'Isc, Voc, Vmpp i Impp van destinades a generar la corba característica i, per tant, van adreçades al SAS. L'esquema de la connexió ha estat el següent:

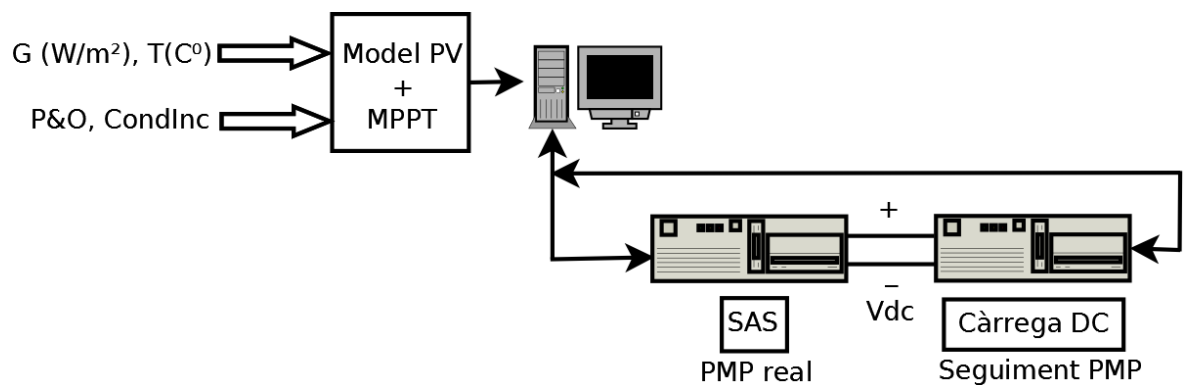


Figura 5.0. Visualització esquemàtica de la connexió PC-Instruments (Font: Pròpia)

Els escenaris seleccionats per a l'experimentació en són 2. En el primer es sotmetran els algoritmes a un step de 0,1V de tensió i a un patró constant de potència (P_{mp}) que hauran d'assolir. En el segon es varia l'step a 0,5V i el patró de potència passa a ser una rampa, que partirà de valors baixos de potència i anirà creixent al llarg del temps.

El motiu de la selecció d'aquests dos escenaris és, pel primer cas, estudiar el comportament dels algoritmes quan han d'assolir un punt llunyà de potència. Aquest fet permetrà disposar d'un temps prolongat en que es veurà clarament com 'escalen' la zona lineal i després oscil·len de forma estacionaria. Pel segon cas, es veurà com responen davant d'irradiàncies/potències baixes (sortida/posta de sol, núvols, etc) i si presenten problemes de seguiment davant una irradiància que creix paulatinament al llarg del temps.

5.1. P&O Step 0,1

5.1.1. Estacionari

Les condicions d'aquest assaig consisteixen en executar l'algoritme P&O amb un *step* de 0,1V i dotar-lo d'un *input* de potència (valor a assolir) constant i prolongat provinent del simulador solar. S'utilitzarà aquest assaig per analitzar com de veloç és l'algoritme a l'hora d'atènyer un punt concret i fix de potència bastant allunyat del punt de partida de l'algoritme. Els valors exactes dels paràmetres d'assaig són els següents:

- Step: 0,1 V
- Freq. d'iteració: 4 Hz
- Tcell: 49,75 C°
- Irradiància: 900 W/m²
- Potència real: 259,573 W
- Duració de l'assaig: 217,25 s

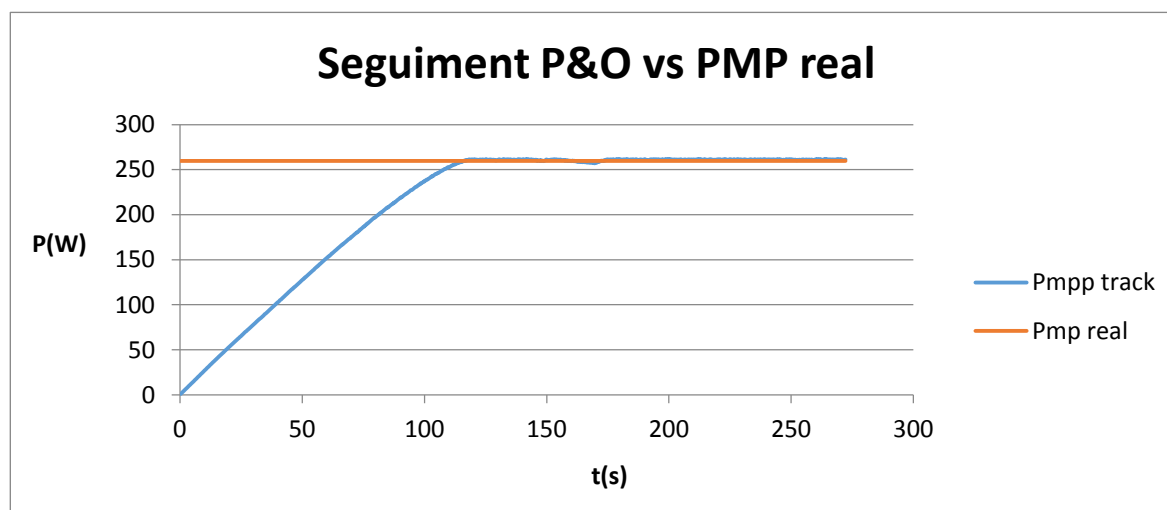


Figura 5.1. Assaig P&O Estacionari 0,1V 4Hz (Font: Pròpia)

5.1.2. Càlculs d'energia i rendiment

Per al càlcul de l'energia aprofitada en aquest interval que dura l'assaig es farà una regressió amb els valors de potència en funció del temps obtinguts al laboratori i, a partir de la funció de la corba, es

calcularà l'àrea mitjançant el mètode de Simpson que ha estat prèviament implementat amb *matlab*. L'àrea sota la corba equival a l'energia, i serà el paràmetre que s'utilitzarà per establir-ne el rendiment i comparar un algoritme amb l'altre.

La regressió es durà a terme trossejant la funció entre 4 i 7 parts: una part pel tram de seguiment lineal i la resta per l'oscil·latori entorn al Pmp. De forma experimental s'ha determinat que l'exactitud que brinda dividir la corba en aquestes parts i estudiar cada part a partir de la regressió amb una funció polinòmica de graus entre 3 i 6 és més que suficient per al propòsit que es pretén assolir. Si bé les R^2 de les regressions en la part oscil·latòria no son pròximes a 1, serà del tot suficient per calcular l'àrea de forma acurada, ja que cada pic que queda fora de la funció (dèficit de superfície) es en gran mesura contrarestat per una vall que en queda dins (excés de superfície). A més, el valor absolut de l'àrea guanyada o perduda en cada pic i vall es extremadament petit, estaria al entorn els $1,38 \cdot 10^{-4}$ wh per pic/vall.

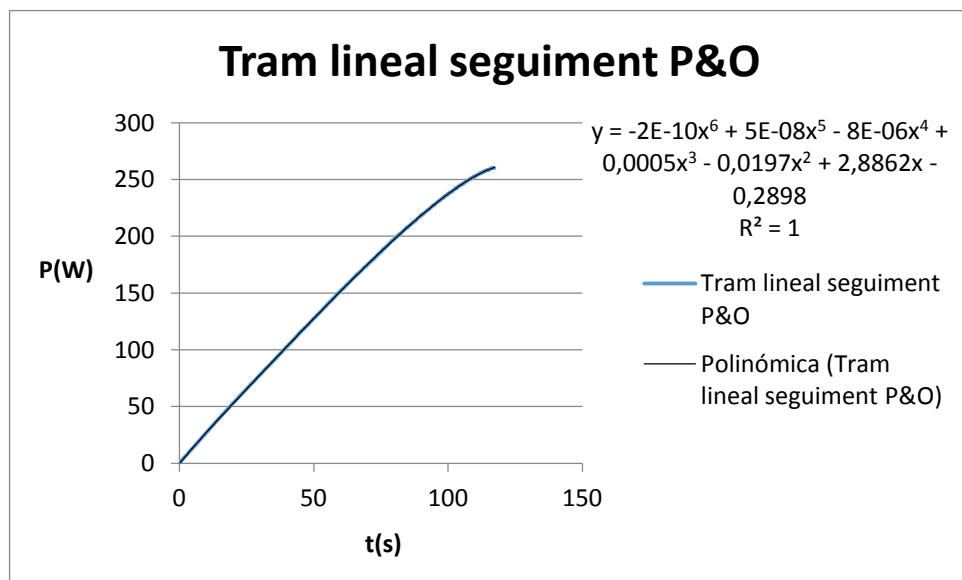


Figura 5.2. Part lineal del seguiment P&O amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

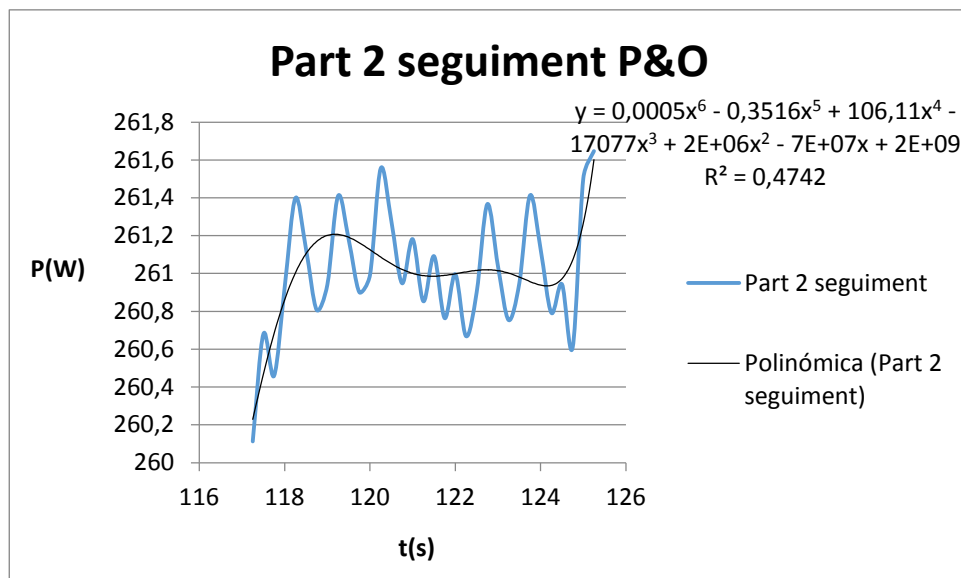


Figura 5.3. Part 2 del seguiment P&O amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

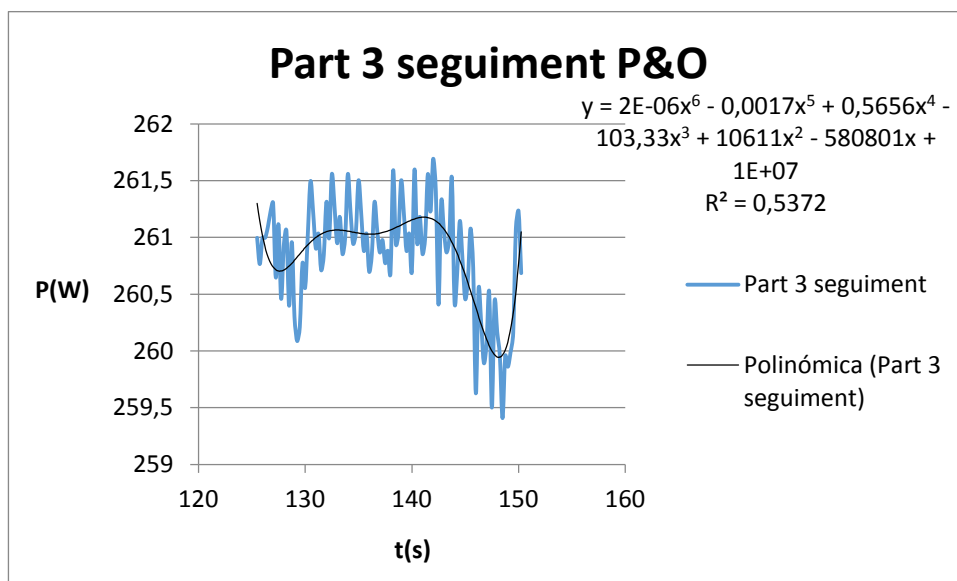


Figura 5.4. Part 3 del seguiment P&O amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

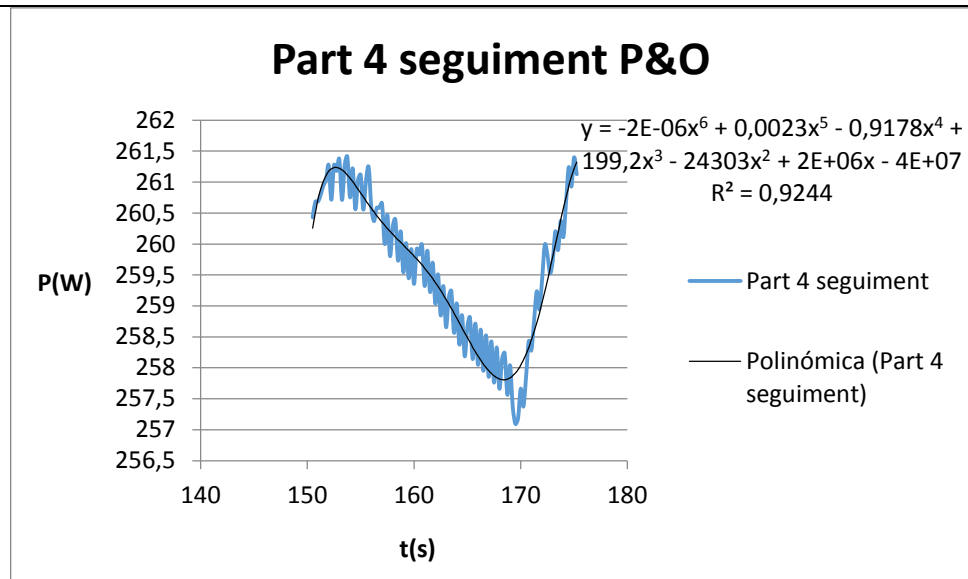


Figura 5.5. Part 4 del seguiment P&O amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

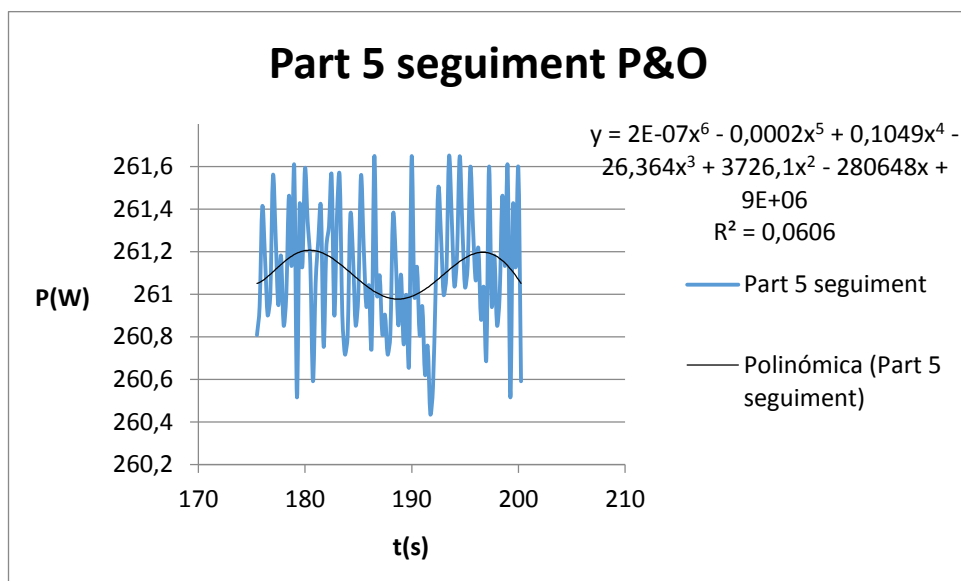


Figura 5.6. Part 5 del seguiment P&O amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

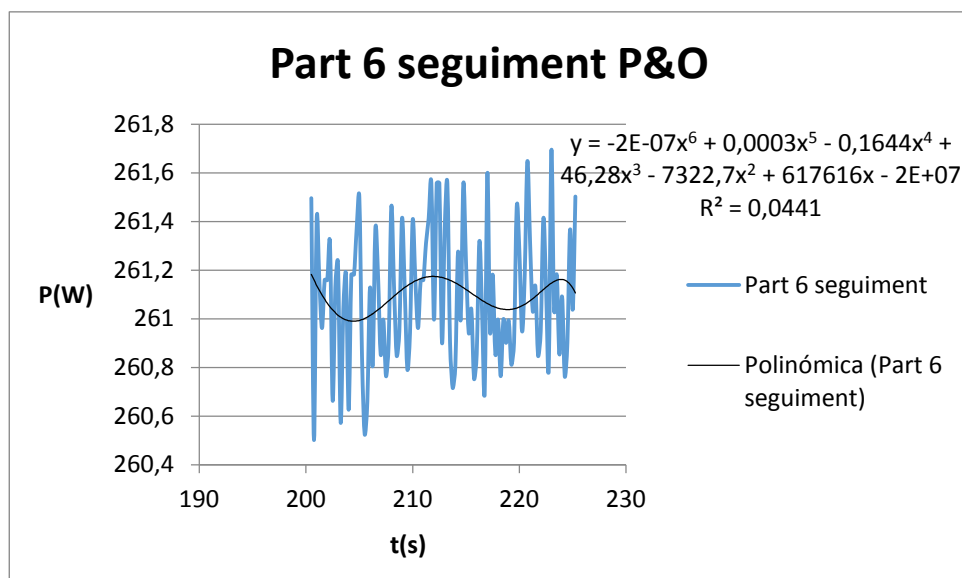


Figura 5.7. Part 6 del seguiment P&O amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

5.1.2.1. Estimació de l'àrea pel mètode de Simpson

El mètode de Simpson es un mecanisme de càlcul numèric que permet obtenir l'aproximació d'una integral. Mitjançant polinomis de segon grau (enlloc de trapezis) permetrà calcular l'àrea de forma suficientment exacte per poder predir quina és la quantitat d'energia que ha aprofitat l'algoritme i així poder-los comparar.

S'ha utilitzat Matlab per implementar el mètode i les variables a introduir el programa són les següents:

- Extrems de l'interval: [a,b].
- La funció.
- Terme n, equivalent al nombre de particions de l'interval. Proporcionalitat inversa entre l'error comès i el nombre de particions.

Funcions a integrar de l'assaig P&O (lectura directa Matlab)

- 1) $-2E-10x^6 + 5E-08x^5 - 8E-06x^4 + 0,0005x^3 - 0,0197x^2 + 2,8862x - 0,2898$
- 2) $0,0005x^6 - 0,3516x^5 + 106,11x^4 - 17077x^3 + 2E+06x^2 - 7E+07x + 2E+09$
- 3) $2E-06x^6 - 0,0017x^5 + 0,5656x^4 - 103,33x^3 + 10611x^2 - 580801x + 1E+07$

4) $-2E-06x^6 + 0,0023x^5 - 0,9178x^4 + 199,2x^3 - 24303x^2 + 2E+06x - 4E+07$

5) $2E-07x^6 - 0,0002x^5 + 0,1049x^4 - 26,364x^3 + 3726,1x^2 - 280648x + 9E+06$

6) $-2E-07x^6 + 0,0003x^5 - 0,1644x^4 + 46,28x^3 - 7322,7x^2 + 617616x - 2E+07$

1) Per la funció 1 (part lineal), les variables a,b i n respectivament són: 0, 117.25 i 300.

Resultat: 16787,0779210449220000 ~ **16787,07792104 J = 4,6631 Wh**

2) Per la funció 2, les variables a,b i n respectivament són: 117.25, 125,25 i 300.

Resultat: 2086,57916666666780000 ~ **2086,57916666 J = 0,5796 Wh**

3) Per la funció 3, les variables a,b i n respectivament són: 125.5, 150,25 i 300.

Resultat: 8882,02145833332360000 ~ **8882,02145833 J = 2,4672 Wh**

4) Per la funció 4, les variables a,b i n respectivament són: 151, 175 i 300.

Resultat: 7325,8685999999160000 ~ **7325,86859999 J = 2,0350 Wh**

5) Per la funció 5, les variables a,b i n respectivament són: 175.5, 200 i 300.

Resultat: 6275,70576000000350000 ~ **6275,70576000 J = 1,7383 Wh**

6) Per la funció 6, les variables a,b i n respectivament són: 200.5, 217.25 i 300.

Resultat: 3924,71142771809720000 ~ **3924,71142772 J = 1,0902 Wh**

Energia total = 4,6631 + 0,5796 + 2,4672 + 2,0350 + 1,7383 + 1,0902 = 12,5734 Wh

5.2. Conductància Incremental Step 0,1

5.2.1. Estacionari

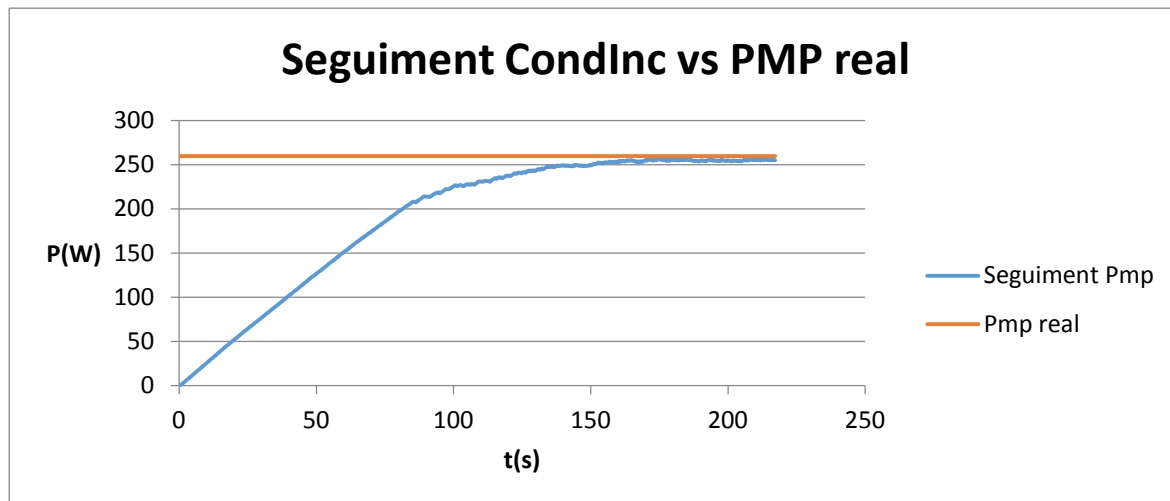


Figura 5.8. Assaig CondInc Estacionari 0,1V 4Hz (Font: Pròpia)

5.2.1.1. Càlculs d'energia i rendiment

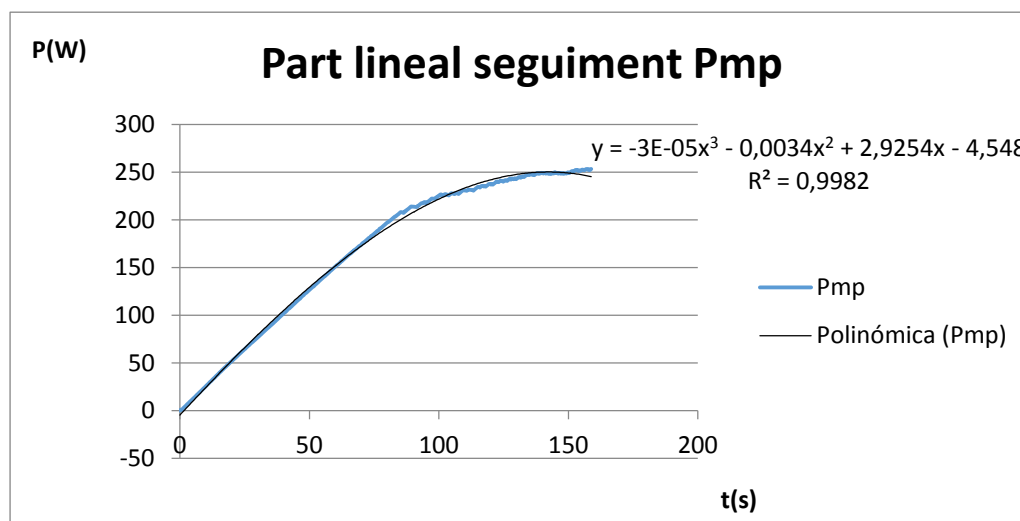


Figura 5.9. Part lineal del seguiment CondInc amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

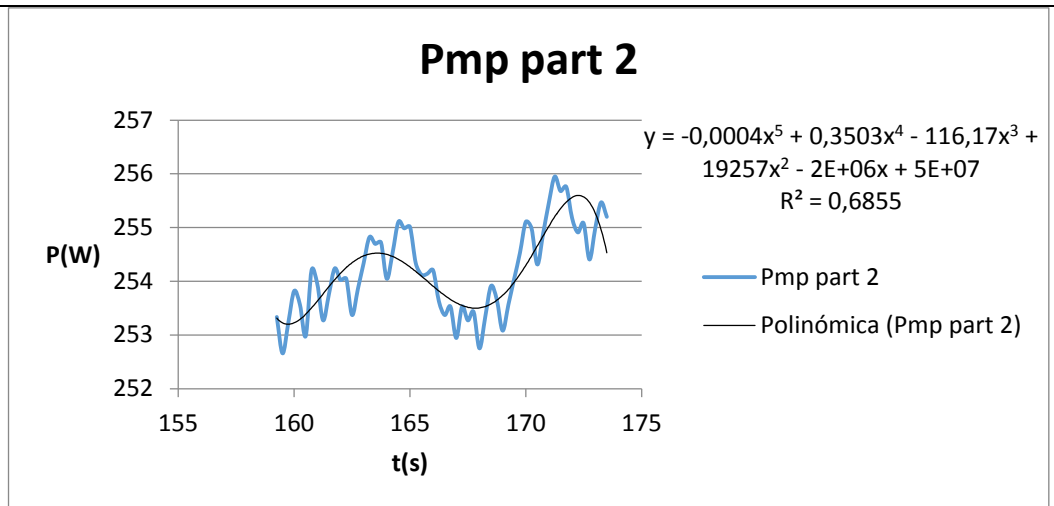


Figura 5.10. Part 2 del seguiment CondInc amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

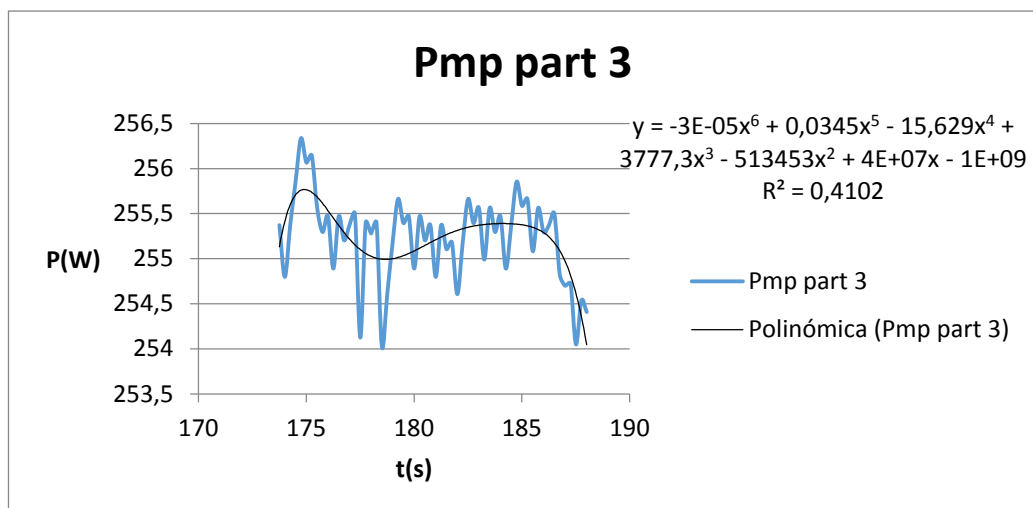


Figura 5.11. Part 3 del seguiment CondInc amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

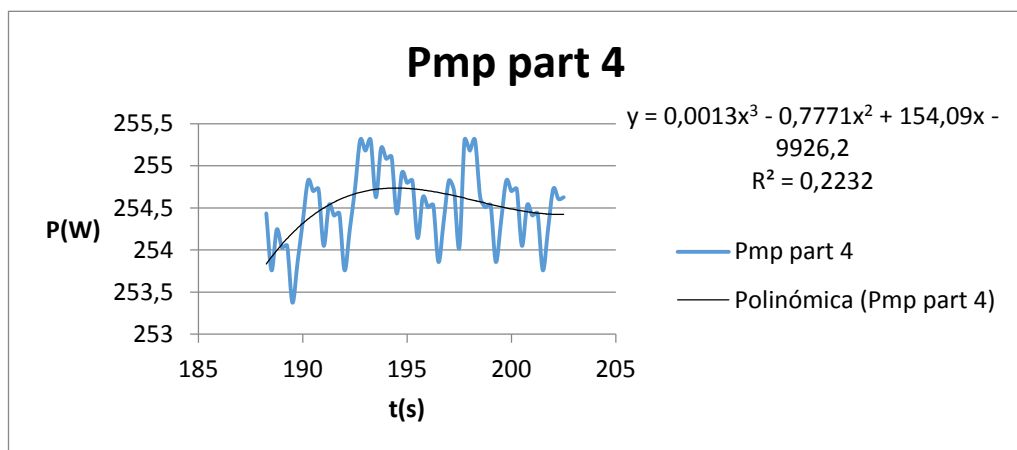


Figura 5.12. Part 4 del seguiment CondInc amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

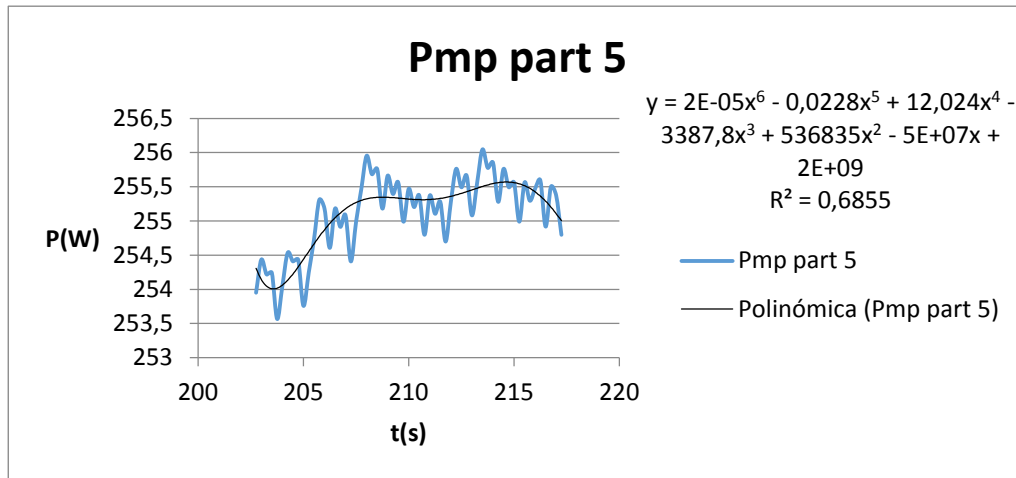


Figura 5.13. Part 5 del seguiment CondInc amb la pertinent regressió (Font: Pròpia)

Funcions a integrar de l'assaig CondInc

- 1) $-3E-05x^3 - 0,0034x^2 + 2,9254x - 4,548$
- 2) $-0,0004x^5 + 0,3503x^4 - 116,17x^3 + 19257x^2 - 2E+06x + 5E+07$
- 3) $-3E-05x^6 + 0,0345x^5 - 15,629x^4 + 3777,3x^3 - 513453x^2 + 4E+07x - 1E+09$
- 4) $0,0013x^3 - 0,7771x^2 + 154,09x - 9926,2$
- 5) $2E-05x^6 - 0,0228x^5 + 12,024x^4 - 3387,8x^3 + 536835x^2 - 5E+07x + 2E+09$

1) Per la funció 1 (part lineal), les variables a,b i n respectivament són: 0, 158.75 i 300.

Resultat: 26842,7587056477820000 ~ **26842,75870565 J = 7,4563 Wh**

2) Per la funció 2, les variables a,b i n respectivament són: 159, 173.5 i 300.

Resultat: 4398,15409218749760000 ~ **4398,15409219 J = 1,2217 Wh**

3) Per la funció 3, les variables a,b i n respectivament són: 173.75, 188 i 300.

Resultat: 3677,37424166666690000 ~ **3677,3742467 J = 1,0215 Wh**

4) Per la funció 4, les variables a,b i n respectivament són: 188.25, 202.5 i 300.

Resultat: 3005,98073935545650000 ~ **3005,98073936 J = 0,8350 Wh**

5) Per la funció 5, les variables a,b i n respectivament són: 202.75, 217.25 i 300.

Resultat: 3696,00526145833240000 ~ **3696,00526146 J = 1,0267 Wh**

Energia total = 7,4563 + 1,2217 + 1,0215 + 0,8350 + 1,0267 = 12,3106 Wh

5.2.2. Comparació d'algoritmes en l'escenari 1

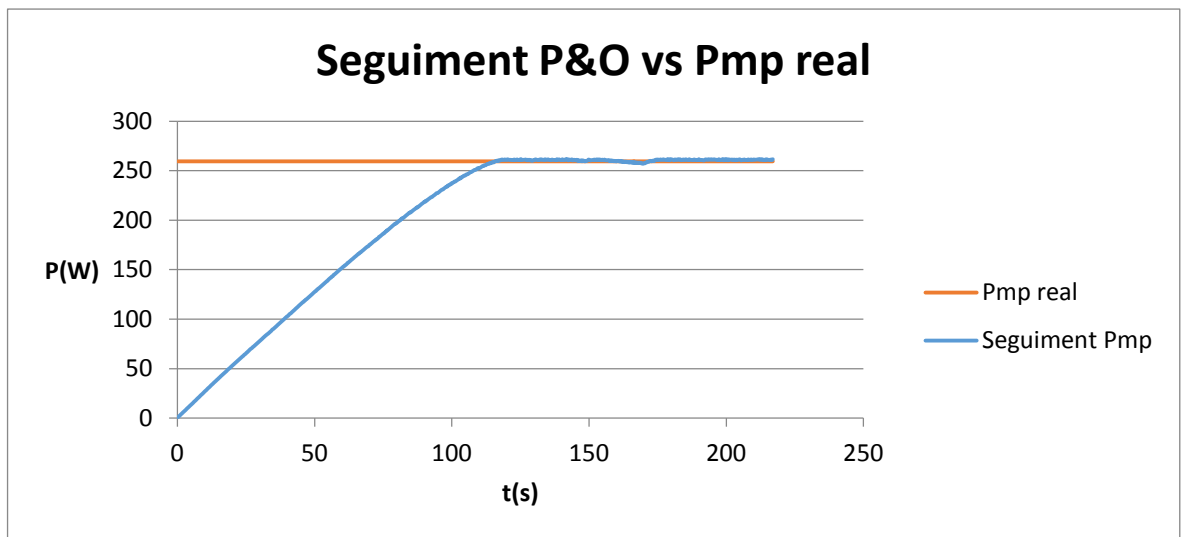


Figura 5.14. Contraposició de la potència màxima real i la potència de seguiment del P&O (Font: Pròpia)

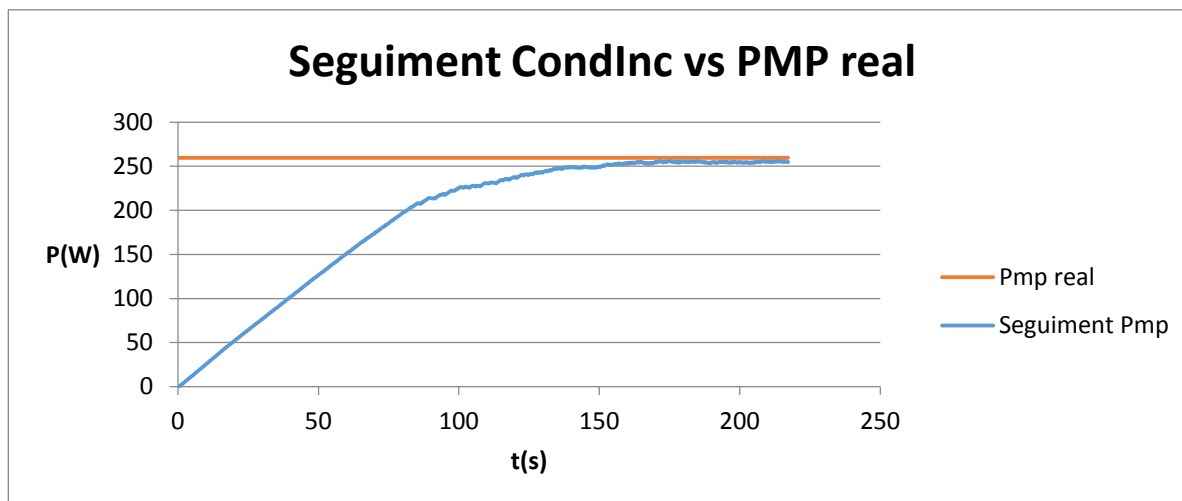


Figura 5.15. Contraposició de la potència màxima real i la potència de seguiment del CondInc (Font: Pròpia)

P&O = 43249,9669740622270000 ~ 43249,96697406 J = 12,0139 Wh

CondInc = 42573,8785548969240000 ~ 42573,87855490 J = 11,8261 Wh +

Com es pot apreciar, ambdós algoritmes presenten una part lineal de creixement més pronunciat i, a continuació, una zona d'oscil·lació estacionària al voltant del Pmp. En el cas del P&O la zona lineal es manté constant fins als 117 segons d'assaig on assolix el Pmp; en canvi, el CondInc a partir dels 90" disminueix notablement la seva velocitat de seguiment degut a que la diferència de pendent entre iteracions és mínima. La funció s'apropa al pendent zero i en aproximadament una de cada quatre iteracions fa oscil·lar la tensió en direcció oposada al seguiment. Aquest fet ocasiona el que es veu representat al gràfic 5.15 com un "aplanament" en la part oscil·lant de la corba.

En el mateix gràfic s'aprecia com el CondInc no oscil·la exactament al voltant del Pmp sinó que ho fa lleugerament per sota. Aquest fet també es deu a que el pendent esdevé aproximadament zero en aquesta zona i tant la sensibilitat de l'step (0,1V) com dels decimals de lectura no són de l'ordre necessari per assolir el Pmp de forma exacte. Aquesta és una característica típica dels algoritmes que usen el mètode CondInc. A continuació es mostra un zoom de la zona en qüestió on es pot observar una diferència d'uns 4 W de mitjana respecte el Pmp real.

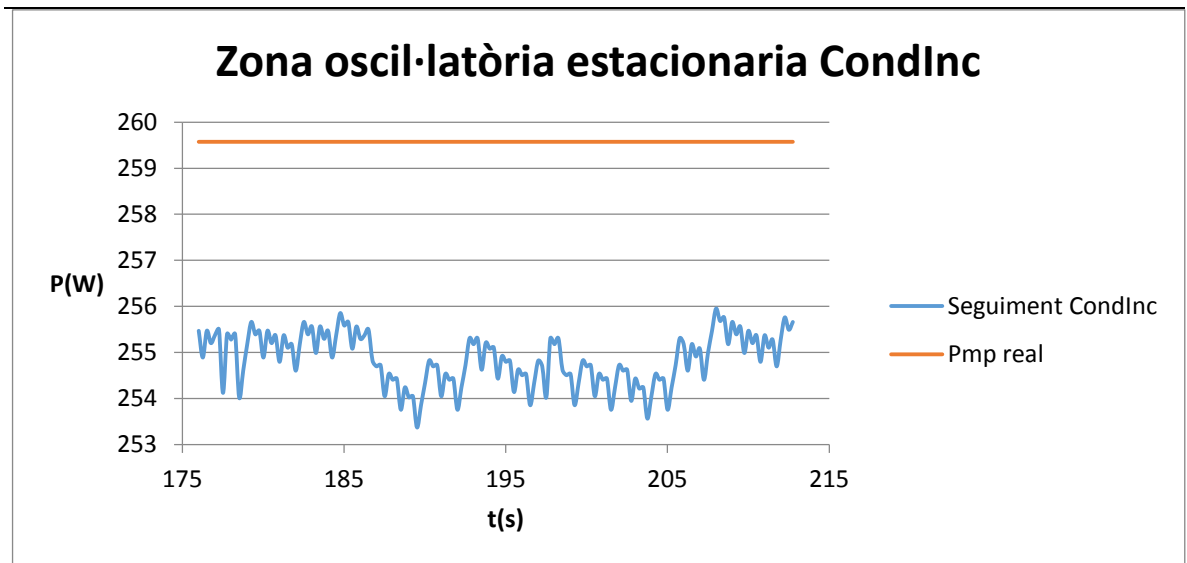


Figura 5.16. Zoom zona oscil·latòria CondInc 0,1V 4Hz (Font: Pròpia)

En aquestes condicions d'assaig (dia clar d'estiu on l'irradiància es manté a 900 W/m² bona part del dia), al cap d'unes 5 hores es perdrien aproximadament 20 Wh d'energia (72 kJ) respecte l'algoritme P&O, sense comptar la zona de lineal.

Tot i així, en l'assaig en qüestió, la major part del guany del P&O sobre el CondInc prové de zona lineal, on el P&O segueix creixent fins a assolir el Pmp i oscil·la de forma clara al seu voltant a diferència del CondInc. El següent gràfic mostra aquesta diferència de comportament a l'acostar-se al Pmp, on clarament el P&O supera el CondInc durant més d'un minut. Amb una regressió polinòmica de 3er grau i utilitzant el mateix mètode de Simpson s'obté una diferència energètica de:

$$\text{Rèdit P\&O vs CondInc} = 12,0139 - 11,8261 = 0,1878 \text{ Wh} = 676,08 \text{ J}$$

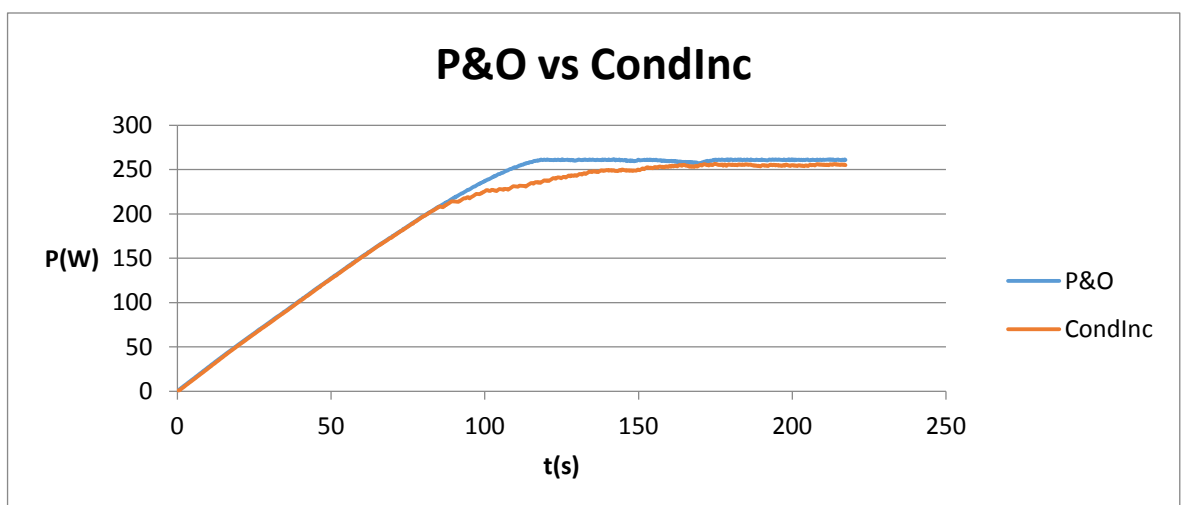


Figura 5.17. Superposició del seguiment d'ambdós algoritmes (Font: Pròpia)

El rendiment dels algoritmes serà el quocient entre l'energia 'processada' i l'energia real provinent del simulador solar, així doncs:

$$\eta_e = \frac{E_p}{E_r}$$

$$\eta_{eP\&O} = \frac{12,0139 \text{ Wh}}{(217,25 \text{ s} \cdot 259,5733 \text{ W})/3600} = \frac{12,0139 \text{ Wh}}{15,6645 \text{ Wh}} = 0,7670 = \mathbf{76,7\%}$$

$$\eta_{eCondInc} = \frac{11,8261 \text{ Wh}}{(217,25 \text{ s} \cdot 259,5733 \text{ W})/3600} = \frac{11,8261 \text{ Wh}}{15,6645 \text{ Wh}} = 0,7550 = \mathbf{75,5\%}$$

En assajos d'una duració més extensa els rendiments pugen de forma dràstica fins més enllà del 95%. En aquest assaig es pretén que es faci evident el pes de la zona lineal respecte l'estacionari, d'aquesta manera es pot analitzar el comportament dels algoritmes tant des de la visió d'un step de potència, com de la d'un període estacionari llarg de potència constant: extrapolant les dades de la part oscil·latòria com s'ha fet anteriorment.

5.3. P&O step 0,5

5.3.1. Rampa

En el present escenari es posarà a prova l'algoritme variant-ne dos paràmetres: l'step i el perfil de potència provinent del simulador solar. Pel que fa a l'step, s'ha incrementat a 0,5V i pel perfil de potència, es testearà l'algoritme sota unes condicions d'irradiància variant de forma continuada al llarg del temps. Concretament, es sotmetrà l'algoritme a un canvi de $+5\text{W}/\text{m}^2$ cada 0,5s; de manera que es pugui analitzar el seu comportament davant una rampa de valors. Cal afegir que tant en l'actual test tipus rampa del P&O com el CondInc, la corba de seguiment MPPT supera en valor a la corba real, fet que és impossible i que es deu als errors propagats entre tres etapes: la potència que l'usuari programa des del simulador, la que aplica el simulador al *link* DC i la que llegeix la carrega DC, que és la font última d'on provenen les dades dels gràfics aquí representades. Ja que el valor d'aquest assaig és comparatiu i no en termes absoluts l'experiment segueix sent útil a tal efecte (ambdós algoritmes estan sotmesos a les mateixes condicions).

- Step: 0,5 V
- Freq. d'iteració: 4 Hz
- Tcell: 25 C° - T final.
- Irradiància: 0 W/m² - Irr final.
- Potència real: Rampa de 10 W/m²·s (5W cada 0,5s)
- Duració de l'assaig: 109 s

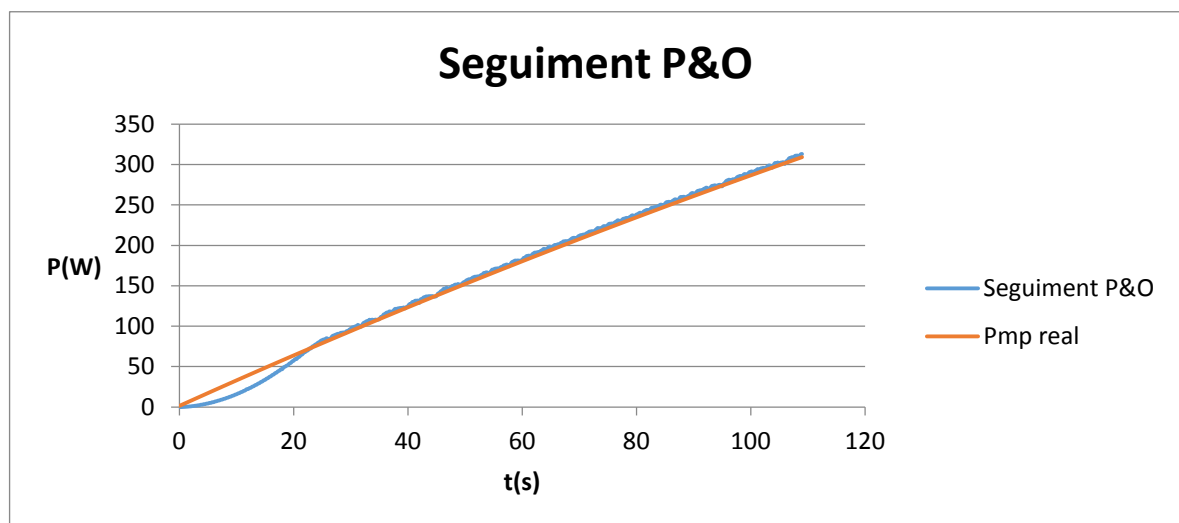


Figura 5.18. Assaig P&O Rampa 0,5V 4Hz (Font: Pròpia)

5.3.2. Càlcul d'energia i rendiment

S'utilitzarà el mateix mètode de Simpson per al càlcul de la integral de la corba de potència. En aquest cas, però, les regressions polinòmiques seran d'ordre entre 2 i 6 i no es trossejaran degut a l'absència de zona estacionària oscil·lant.

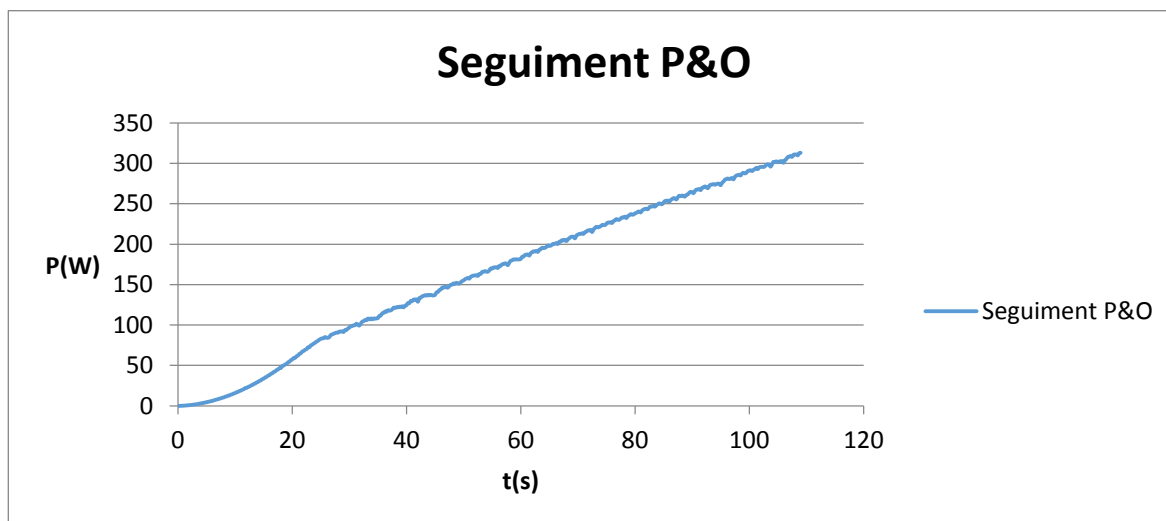


Figura 5.19. Assaig P&O Rampa 0,5V 4Hz (Font: Pròpia)

Funció a integrar de l'assaig P&O

$$1) 4E-09x^6 - 1E-06x^5 + 0,0002x^4 - 0,0119x^3 + 0,3628x^2 - 0,9392x + 0,6966$$

Per la funció 1, les variables a, b i n són respectivament 0, 109 i 300.

Resultat: 17703,75463 J

Energia total = 4,9177 Wh

5.4. Conductància Incremental step 0,5

5.4.1. Rampa

Les condicions de l'experiment són equivalents a les de l'anterior (P&O rampa). Es sotmetrà l'algoritme a una rampa creixent de $+5\text{W}/\text{m}^2$ cada $0,5\text{s}$ per poder comparar-los més endavant.

- Step: $0,5\text{ V}$
- Freq. d'iteració: 4 Hz
- Tcell: 25 C° - T final.
- Irradiància: $0\text{ W}/\text{m}^2$ - Irr final.
- Potència real: Rampa de $10\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ (5W cada $0,5\text{s}$)
- Duració de l'assaig: 109 s

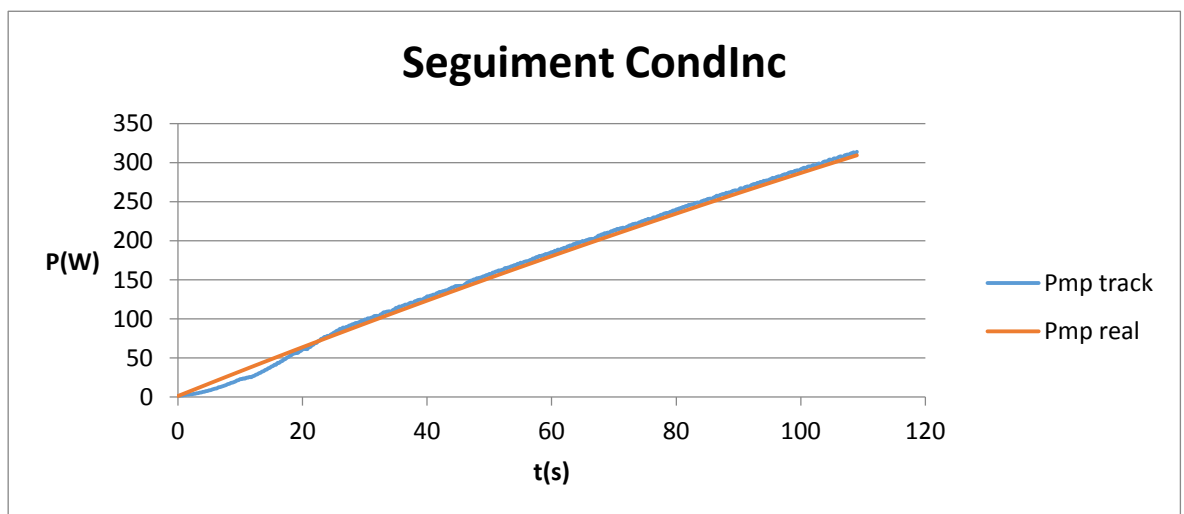


Figura 5.20. Assaig CondInc Rampa $0,5\text{V}$ 4Hz (Font: Pròpia)

5.4.2. Càlcul d'energia i rendiment

S'utilitzarà el mateix mètode de Simpson per al càlcul de la integral de la corba de potència. En aquest cas, també, les regressions polinòmiques seran d'ordre entre 2 i 6 i no es trossejaran degut a l'absència de zona estacionària oscil·lant.

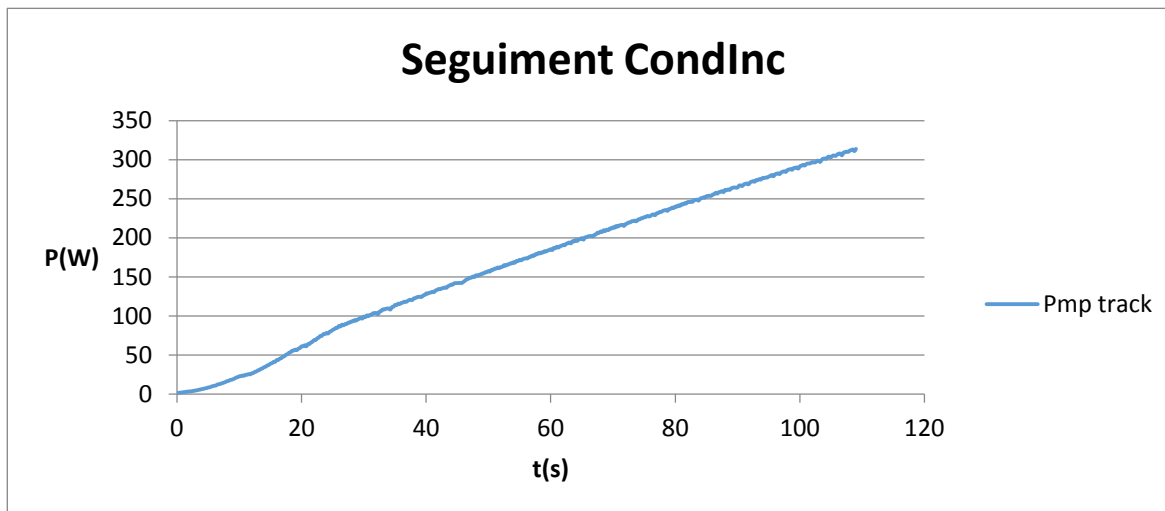


Figura 5.21. Assaig CondInc Rampa 0,5V 4Hz (Font: Pròpia)

Funció a integrar de l'assaig CondInc

$$1) 3E-09x^6 - 1E-06x^5 + 0,0001x^4 - 0,0089x^3 + 0,2736x^2 + 0,0642x + 1,7648$$

Per la funció 1, les variables a,b i n són respectivament 0, 109 i 300.

Resultat: 17834,03761 J

Energia total = 4,9539 Wh

5.4.3. Comparació dels algoritmes en l'escenari 2

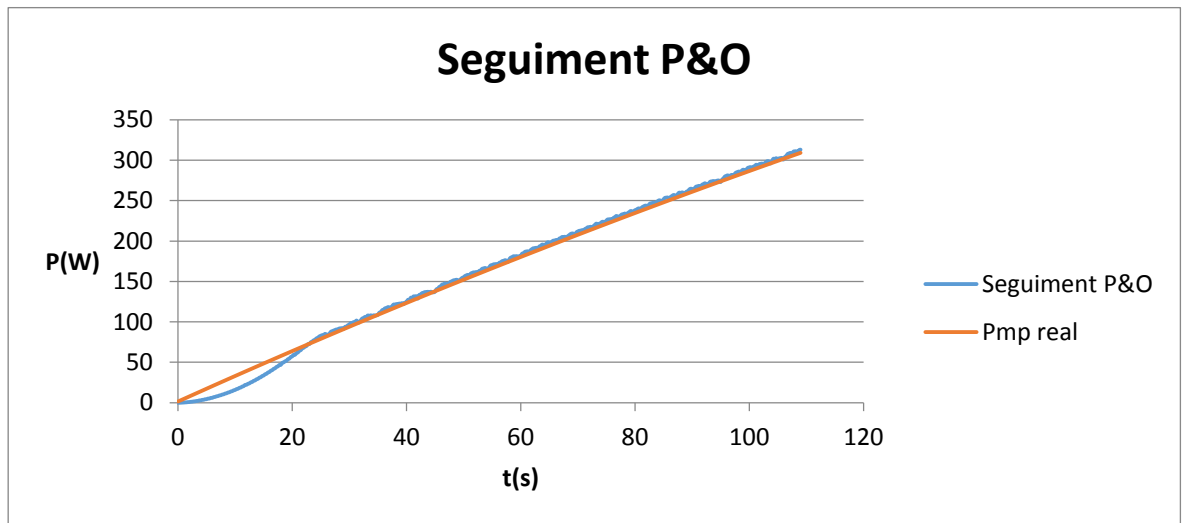


Figura 5.22. Assaig P&O Rampa 0,5V 4Hz (Font: Pròpia)

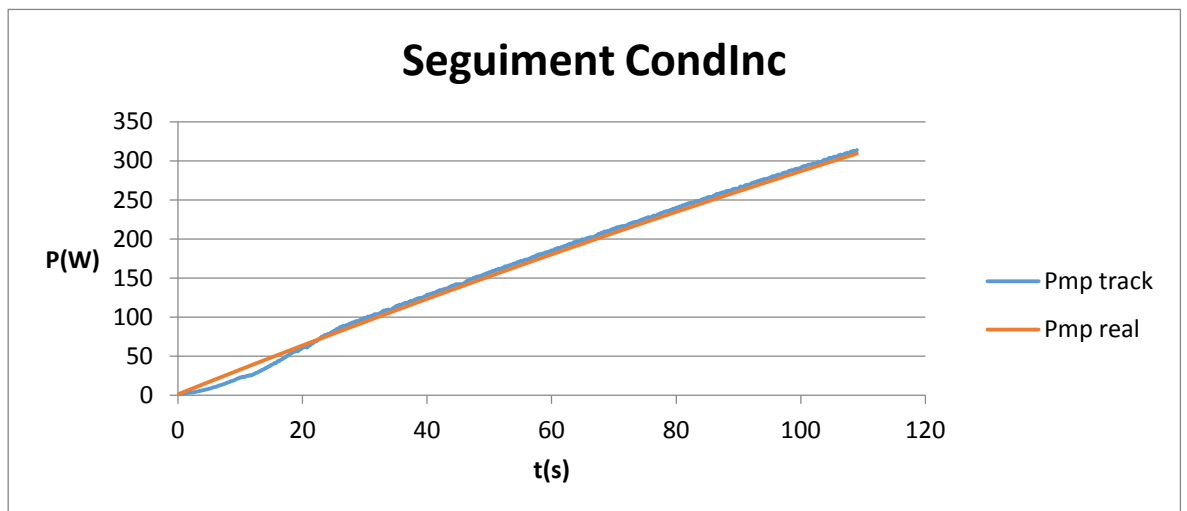


Figura 5.23. Assaig CondInc Rampa 0,5V 4Hz (Font: Pròpia)

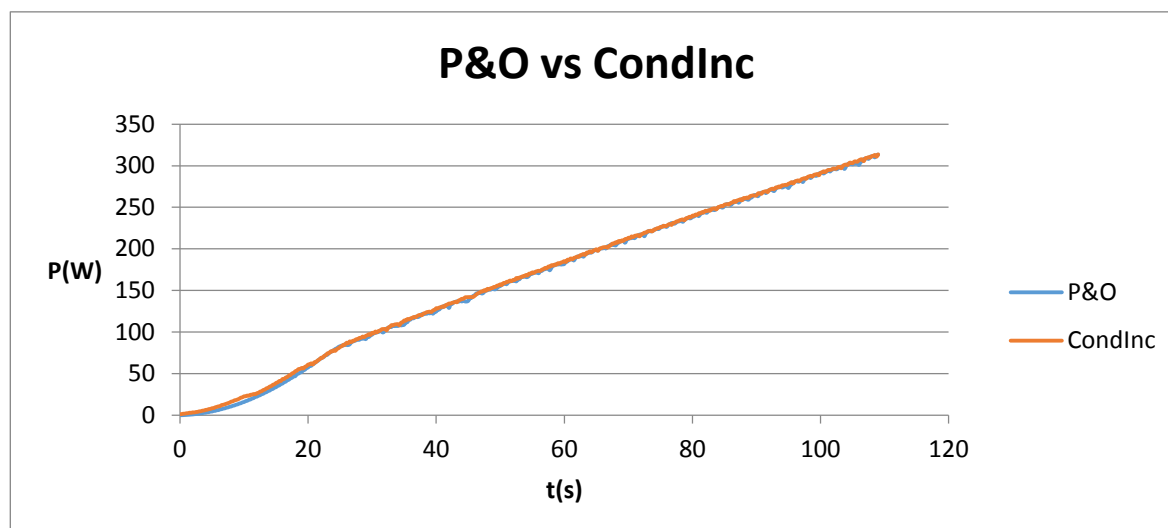


Figura 5.24. Comparació P&O vs CondInc Rampa 0,5V 4Hz (Font: Pròpia)

A diferència de l'anterior assaig, es pot veure a simple vista que la diferència és molt més ajustada. Concretament, l'assaig amb el P&O ha aprofitat **4,9177 Wh** mentre que el CondInc, amb les mateixes condicions, n'ha aprofitat **4,9539 Wh**, uns valors realment pròxims.

Rèdit P&O vs CondInc = 0,0362 Wh = 130,32 J

6. Anàlisi de l'impacte

L'anàlisi ambiental en aquest projecte és improcedent, ja que tota l'activitat que se'n deriva és fruit de l'anàlisi dels algoritmes, de l'experimentació i, per tant, no es possible cap afectació al medi ni pel funcionament, avaria o accident.

Conclusions

Els escenaris en que s'han sotmès els algoritmes (programats amb els mitjans aquí descrits) han permès determinar empíricament que no hi ha una diferència notable entre el rendiment del *Perturb & Observe* i l'*Incremental Conductance* que permeti situar-ne un com a favorit.

Amb totes les dades exposades, es pot concloure que els algoritmes de base no presenten diferències suficients que puguin afectar de manera decisiva el consumidor. A més, els fabricants acostumen a modificar els algoritmes de base afegint llaços extra per corregir-ne els inconvenients habituals. Tot i que ja s'ha citat que els algoritmes en qüestió van sobretot destinats a instal·lacions propietat de consumidors particulars, s'ha de fer esment també que per a grans instal·lacions, la probabilitat d'obtenir màxims globals i locals creix, i es desaconsella fer us dels algoritmes descrits sense, almenys, les modificacions adients que permetin distingir entre un GMPP i un LMPP.

La funció final d'aquests algoritmes és augmentar el rendiment del sistema fotovoltaic de forma econòmica, compacte i de manteniment pràcticament nul amb la intenció de fer encara més rendible el que és una necessitat imperiosa del nostre temps: la transició energètica.

Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

ÍTEM	QUANTITAT	PREU UT. (€)	Retorn (anys)	PREU TOTAL (€)
Solar Array Simulator Agilent E4350B	1	3400	10	340
Agilent Electronic Load 6060B	1	960	10	96
Connector GPIB	1	665,5	15	44,37
Hora enginyer laboratori (inclou consums)	60	30	-	1800
Hora enginyer despatx (inclou consums)	1080	20	-	21600
Hora muntatge laboratori	3	6	-	18
Llicència Labview Professional	1	3713,24	2	1856,2
Llicència Matlab Acadèmica	1	388,68	2	194,34
Llicència ofimàtica	2	40,99	2	40,99
Llicència DIA	1	Software lliure	-	-
PC i eines de suport	1	790	5	158
Transport específic (no comptat en Hora Enginyer)	10	9	-	90
Altres (material de despatx, complements...)	23	2	3	15,34

El cost total del projecte és de **26253,24 €**.

Bibliografia

1. C.Kamalakaran. *Power Electronics and Renewable Energy Systems* [en línia]. ISBN 978-81-322-2118-0 [Consulta: 18 febrer 2018].
<<https://link-springer-com.recursos.biblioteca.upc.edu/content/pdf/10.1007%2F978-81-322-2118-0.pdf>>
2. Ferreira Carvalho, Carlos Manuel. *CMOS indoor light energy harvesting system for wireless sensing applications* [en línia]. ISBN 978-3-319-21616-4 [Consulta: 18 febrer 2018].
<<https://link-springer-com.recursos.biblioteca.upc.edu/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-21616-4.pdf>>
3. Sanz Morales, David. *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications* [En línia]. [Consulta: 7 juny 2018].
<<http://lib.tkk.fi/Dipl/2010/urn100399.pdf>>
4. Boualem Bendib. *A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems* [En línia]. [Consulta: 29 abril 2018].
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000970>>
5. Penella, Maria Teresa i Gasulla, Manel. *A Simple and Efficient MPPT Method for Low-Power PV Cells* [En línia]. [Consulta: 11 març 2018].
<<https://www.hindawi.com/journals/ijp/2014/153428/>>
6. Jayaweera, Dilan. *Smart Power Systems and Renewable Energy System Integration* [En línia]. ISBN 978-3-319-30425-0. [Consulta: 3 març 2018].
<<https://link-springer-com.recursos.biblioteca.upc.edu/book/10.1007%2F978-3-319-30427-4>>
7. Agilent Technologies. *Operating Manual Agilent Technologies Single Input Electronic Load Family* [En línia]. [Consulta: 15 juliol 2018].
<<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5951-2826.pdf>>
8. Agilent Technologies. *Operating Guide for Solar Array Simulator Agilent Models E4350B, E4351B* [En línia]. [Consulta: 15 juliol].
<<https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5962-8206.pdf?id=1000000675-1:epsg:man>>

