Scuola Universitaria Professionale
della Svizzera Italiana

SUPSI

Dipartimento
Tecnologie
Innovative

N° O3-05_06-D-08

Stazione per collaudi automatici

Studente Bühler Sara

Relatore Paolo Ceppi
Correlatore Georges Kauffmann

22.10.2006

Ringrazio tutti coloro che
negli ultimi tre anni universitari
hanno condiviso gioie e dolori.

Un caloroso abbraccio
alla mia famiglia,
che mi ha sempre
incoraggiato ed aiutato.

Indice:

RIASSUNTO / ABSTRACT 7

1. INTRODUZIONE 8

2. REQUISITI E SPECIFICHE 10

3. STUDIO DELLE SOLUZIONI 11

3.1. Analisi iniziale 11

3.2. GPIB 13

4. APPLICAZIONE SPECIFICA 19

4.1. Generatori fotovoltaici 19

5. DESIGN / CONCEZIONE 28

5.1. Riconoscimento strumentazione 28

5.2. Codici 30

5.2.1. Power Supply HP E3631A 32

5.2.2. Multimetro HP 34401A 33

5.2.3. Data Acquisition / Switch Unit Agilent 34970A 34

5.2.4. Carico elettronico HM 8143 34

5.2.5. Oscilloscopio HP 54600 35

5.2.6. Generatore d'onde HP 33120A 37

5.2.7. Cambiare la tensione 37

5.2.8. Misura col Multimetro 38

5.2.9. Misura col oscilloscopio 38

5.2.10. Arbitrary function del HM8142 39

5.2.11. Oscilloscopio Gould 39

6. REALIZZAZIONE 40

6.1. Simulazione di un generatore fotovoltaico con EXCEL 40

6.2. Sistema di controllo alimentazione 42

6.3. Pannello utente 57

6.4. Sistema di controllo alimentazione 2 58

7. TEST 60

7.1. Variazione del carico con una Culatti 60

7.2. Utilizzo del carico elettronico 61

8. CONCLUSIONI 63

BIBLIOGRAFIA 64

ALLEGATI 65

Indice delle immagini:

FIGURA 3.1 COLLEGAMENTO STRUMENTI TRAMITE GPIB 13
FIGURA 3.2 SCHEMA DEL CONNETTORE GPIB 14
FIGURA 3.3 HANDSHAKE 17
FIGURA 3.4 COMPORTAMENTO GPIB 18
FIGURA 4.1 CUBESAT 19
FIGURA 4.2 RADIAZIONE SOLARE 20
FIGURA 4.3 CIRCUITO EQUIVALENTE 21
FIGURA 4.4 CARATTERISTICA I-V 22
FIGURA 4.5 FILL FACTOR 23
FIGURA 4.6 VARIAZIONE DOVUTA ALL'IRRAGGIAMENTO 23
FIGURA 4.7 VARIAZIONE DOVUTA ALLA TEMPERATURA 24
FIGURA 4.8 COLLEGAMENTO SERIE 25
FIGURA 4.9 COLLEGAMENTO PARALLELO 25
FIGURA 4.10 POTENZA EROGATA 26
FIGURA 4.11 CARATTERISTICA V-I CON DIODO DI BYPASS 27
FIGURA 5.1 CONNESSIONE FISICA UTILIZZATA 28
FIGURA 5.2 INSTRUMENT MANAGER VEE 29
FIGURA 5.3 DIRECT I/O 30
FIGURA 5.4 REGISTRI 31
FIGURA 5.5 CAMBIARE LA TENSIONE 37
FIGURA 5.6 MISURA COL MULTIMETRO 38
FIGURA 5.7 MISURA COL OSCILLOSCOPIO 38
FIGURA 5.8 ARBITRARY FUNCTION 39
FIGURA 5.9 OSCILLOSCOPIO GOULD 39
FIGURA 6.1 SCHEMA DI SIMULAZIONE CON EXCEL 40
FIGURA 6.2 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLA SIMULAZIONE EXCEL 40
FIGURA 6.3 DIAGRAMMA DI FLUSSO 42
FIGURA 6.4 MAIN 44
FIGURA 6.5 LEGGI DATI DA FILE 45
FIGURA 6.6 INIZIALIZZAZIONE STRUMENTI 46
FIGURA 6.7 COSTANTE DI TEMPERATURA 47
FIGURA 6.8 UOC ISC 48
FIGURA 6.9 UM IM 48
FIGURA 6.10 METODO DA UTILIZZARE 49
FIGURA 6.11 MIN MAX 49

FIGURA 6.12 GRAFICO REGRESSIONE LINEARE 50
FIGURA 6.13 REGRESSIONE LINEARE 50
FIGURA 6.14 LOOP 51
FIGURA 6.15 MIN MAX UX 52
FIGURA 6.16 GRAFICO REGRESSIONE LINEARE UX 53
FIGURA 6.17 REGRESSIONE LINEARE UX 53
FIGURA 6.18 LOOP UX 54
FIGURA 6.19 VARIABILI GLOBALI EXCEL 55
FIGURA 6.20 APERTURA FILE EXCEL 55
FIGURA 6.21 TERMINA FILE EXCEL 56
FIGURA 6.22 PANNELLO UTENTE 57
FIGURA 6.23 DIAGRAMMA DI FLUSSO 2 58
FIGURA 6.24 MAIN 2 59
FIGURA 7.1 DATI DA FILE 60
FIGURA 7.2 MISURE DEL TEST CULATTI 60
FIGURA 7.3 DATI DA FILE 61
FIGURA 7.4 MISURE DEL TEST CON CARICO ELETTRONICO 61

Indice delle tabelle:

TABELLA 3.1 SWOT 11
TABELLA 3.2 LIVELLI LOGICI GPIB 15
TABELLA 3.3 INDIRIZZO COMPLETO GPIB 15
TABELLA 4.1 IRRAGGIAMENTO NELLO SPAZIO 21
TABELLA 5.1 COMANDI DELLO STANDARD IEEE488.2 31
TABELLA 5.2 SCALA DELLE TENSIONI DELL'OSCILLOSCOPIO 35
TABELLA 5.3 SCALA DEL TEMPO DELL'OSCILLOSCOPIO 36

RIASSUNTO / ABSTRACT

Durante questo lavoro di diploma è stato realizzato un sistema di misura automatico collegando vari strumenti ad un PC tramite bus GPIB. Sono stati acquisiti aspetti teorici, effettuati dei test di trasmissione dati e redatti dei programmi per comunicare con i diversi strumenti. Per quanto riguarda il software per il controllo di strumenti, è stato utilizzato il linguaggio di programmazione grafica VEE Pro 6.2. In particolare è stato implementato un codice per generare un'alimentazione simile ad un generatore fotovoltaico. Dopo aver ottenuto un modello funzionante sono state aggiunte delle opzioni specifiche. In seguito il sistema è stato testato per verificare il suo funzionamento, aggiunto un pannello utente di facile gestione e documentato i passi importanti per la comprensione di VEE.

During the course of this thesis I developed an automated measuring system connecting various instruments to a PC with the GPIB bus. Theoretical aspects were studied, tests on transmission were performed and programmes were written to communicate with different instruments. The software used to control the instruments is the graphical programming language VEE Pro 6.2. In particular, I implemented a code who controls a programmable power supply generating the typical V-I caracteristic of a photovoltaic cell. Then I added some options and performed tests to ensure a system that functioned correctly. Finally there is a user panel and documentation about VEE programming codes.

1. INTRODUZIONE

Gli strumenti di misura convenzionali sono degli oggetti dotati di pannello di controllo e sistema di visualizzazione. L'evoluzione dei dispositivi elettronici ha consentito di migliorare costantemente le caratteristiche tecniche di tali strumenti raggiungendo livelli di accuratezza, funzionalità e affidabilità elevati.

Tuttavia, la disponibilità di PC ad alte prestazioni e basso costo, lo sviluppo di software e interfaccie grafiche, hanno prodotto una sorta di rivoluzione nell'ambito delle misure elettroniche con la nascita dei cosidetti "strumenti virtuali". I software grafici ed i PC sono impiegati per la realizzazione di procedure di misure, anche molto complesse, tramite il controllo degli strumenti, l'elaborazione e la presentazione dei risultati. Negli strumenti virtuali, l'operatore interagisce con un programma anzichè con uno strumento reale.

Non esiste una definizione univoca del termine strumento virtuale, esso viene utilizzato per indicare una delle seguenti aree:

- un **sistema di strumenti**, cioè un insieme di strumenti tradizionali che consente di effettuare una particolare misura che un singolo strumento non è in grado di svolgere. Esempio di questo tipo è la compatibilità elettromagnetica. Si tratta di misure complesse che in teoria potrebbero essere svolte da un singolo strumento progettato ad hoc, ma che nella pratica vengono fatte impiegando più strumenti già disponibili sul mercato;
- un **pannello di controllo grafico**, viene utilizzato un PC per controllare lo strumento e per visualizzare il risultato della misura;
- una **tecnica di programmazione grafica**, tecniche che impiegano un linguaggio di programmazione costituito da icone e collegate tramite dei fili. Questo tipo di programmazione in genere risulta di facile apprendimento e consente di costruire un programma di elaborazione anche ad utenti non esperti in programmazione testuale (linguaggi C, Basic, …). Il programma non solo controlla uno o più strumenti, ma elabora i dati delle misure, consentendo di ottenere un vero e proprio strumento virtuale;
- un **insieme di blocchi di elaborazione riconfigurabili**, alcuni blocchi funzionali, quali convertitori A/D, memorie, DSP e display sono comuni a più strumenti e possono essere condivisi. Si può progettare uno strumento costituito da blocchi funzionali elementari che, opportunamente configurati tramite un software, consentono di emulare differenti strumenti di misura.

Qualunque sia la definizione impiegata, i componenti essenziali di uno strumento virtuale sono:

- un PC
- un software
- uno o più strumenti di misura
- un bus per la connessione degli strumenti al computer.

Per quanto riguarda il bus vi sono diverse soluzioni presenti sul mercato, fra le quali accenno solo alcune.

Vi è l'RS-232 e l'RS-485 per applicazioni a basso costo con limitate prestazioni in termini di velocità, l'IEEE 488 utilizzato in questo progetto, il VXI il quale offre le migliori prestazioni sebbene non abbia un'elavata diffusione a causa del costo eccessivo, l'USB più recente e ancora in fase di sviluppo e l'Ethernet impiegato per i controlli a distanza.

In questo progetto ho dovuto concepire un sistema per ottenere un'alimentazione simile ad un generatore fotovoltaico ed eseguire delle misure automatiche. Utilizzando il software VEE ho acquisito la capacità di gestire una stazione per collaudi tramite programmazione grafica.

I collaboratori del laboratorio Spacelab (SSL) potranno quindi usufruire dei miei codici per eseguire dei test di lunga durata.

Nei primi capitoli riporto i requisiti e le specifiche di questo progetto, per poi analizzare possibili problemi o opportunità che si potrebbero riscontrare durante l'esecuzione del progetto. Segue la spiegazione di alcuni concetti fondamentali come la connessione del bus IEEE 488 e il generatore fotovoltaico. Nel quinto capitolo vengono spiegati i vari passi per il riconoscimento automatico di strumenti e le varie codifiche utilizzate. Nel sesto capitolo sono descritti i codici che generano un'alimentazione simile ad un generatore fotovoltaico. Poi vengono effettuati dei test, per poi concludere il documento.

2. REQUISITI E SPECIFICHE

Descrizione

Il collaudo di apparecchiature o componenti (elettronici) può richiedere esperimenti di lunga durata, giorni o più. In alcuni casi è necessario eseguire il test senza interruzioni e con la possibilità di valutare i risultati man mano che questi vengono raccolti per poter intervenire sull'esperimento stesso.

Il problema è di attualità per collaudi industriali in generale. Presso il DTI abbiamo l'esigenza di disporre di un'infrastruttura automatica di questo tipo nell'ambito del progetto SpaceLab (SSL).

Obbiettivi da raggiungere

Un sistema funzionante, versatile e di facile utilizzo per test di lunga durata.

Compiti da eseguire

Progettare, realizzare e collaudare un "banco di prova" automatico per piccoli accumulatori e batterie, che possa essere usato per test di lunga durata. L'apparecchiatura dovrà essere in grado di generare stimoli (tensioni e correnti variabili, impulsi, …) e di registrare il comportamento a breve e lungo termine dei dispositivi sottoposti al test (DUT- Device under Test). Il sistema comprenderà una collezione di strumenti di laboratorio controllate da un calcolatore personale e dalla necessaria elettronica realizzata ad hoc.

Rilevamento di temperature, simulazione di curve di generatori fotovoltaici, azionamenti e misure diverse sono solo alcune delle applicazioni di cui si avrà bisogno.

Tecnologie da utilizzare

Agilent-VEE, Elettronica, metrologia, sensori, informatica tecnica, comunicazione.

3. STUDIO DELLE SOLUZIONI

3.1. Analisi iniziale

Per quanto riguarda gli obiettivi da raggiungere ho pensato di creare un sistema che si occupa di interagire con diversi strumenti e di impostarli secondo le necessità; iniziando a programmare un singolo strumento per poi collegarne diversi ed aumentare le capacità.

Infatti il software VEE offre un immensità di opzioni, fra cui il salvataggio di dati su file EXCEL, l'aggiunta di script MATLAB ed addirittura l'implementazione di un web server.

Dato che all'inizio di un progetto non si può prevedere i problemi che si riscontreranno, ho pensato che é utile verificare il funzionamento della stazione regolarmente.

Inoltre una cella fotovoltaica ha molte variabili che influenzano la sua caratteristica I-V, ad ogni variabile aggiunta, il modello diventa sempre più realistico.

Analizziamo quindi il progetto con la tabella SWOT.

	S Strengths	**W** Weaknesses	**O** Opportunities	**T** Threats
1°	test di sistema regolari	tempi di ritardo	software gestibile facilmente	limitazioni bus IEEE 488.2
2°	testabilità immediata	cella fotovoltaica	opzioni VEE	controllo strumenti

Tabella 3.1 SWOT

La tabella sopra mostra quali sono i problemi e le opportunità che si potranno verificare durante la realizzazione di questo progetto, in seguito voglio indicare con maggiore dettaglio quanto elencato sopra.

I punti forti riguardano i test di sistema regolari e la testabilità immediata. Ogni programma può essere testato dopo essere stato creato e quindi non si perde tempo prezioso nella programmazione di moduli errati. Per quanto riguarda i test di sistema, essi vengono effettuati regolarmente, perché il progetto è stato basato su un incremento graduale della complessità ed è quindi possibile verificare il suo funzionamento ad intervalli di tempo brevi.

La debolezza del progetto riguarda i tempi di ritardo e la cella fotovoltaica. Per quanto riguarda la cella fotovoltaica, personalmente non conosco bene le sue caratteristiche e il suo comportamento. In fase d'inizio del progetto mi sembra che questo sia un punto debole.

Per quanto riguarda i tempi di ritardo, ho consultato il manuale di un'alimentatore e ho potuto notare le caratteristiche che riguardano il tempo di reazione dell'apparecchio. Questo potrebbe essere un problema in quanto il segnale in uscita sarà ritardato ed il modello della cella fotovoltaica non corrisponderà più esattamente alla realtà. Infatti un generatore fotovoltaico reagisce velocemente e trasforma la luce solare in energia elettrica in tempi brevi, mentre il nostro simulatore arriverà ad un tempo di ritardo di qualche centinaia di millisecondi.

Inoltre se un circuito di carico provoca un'ondulazione della corrente con una frequenza di vari kHz, la simulazione attraverso un bus GPIB non rispecchierà il comportamento della fotocella.

Le opportunità da elencare sarebbero molte, ma vorrei concentrarmi su due in particolare che riguardano la gestibilità del software e le opzioni di VEE.

Il software ha una parte grafica molto elaborata ma è pur sempre di facile gestione, inoltre vi sono incluse varie opzioni, come salvare i dati in un foglio EXCEL, che permettono di aumentare le potenzialità di un sistema automatico di misura.

I rischi sono rappresentati dalle limitazioni del bus IEEE 488.2 e il controllo degli strumenti. Il bus 488.2 permette di collegare al massimo 15 strumenti, compreso il PC, e di avere dei collegamenti lunghi complessivamente non oltre i 20 metri. Benchè ora queste caratteristiche sembrano esagerate, esse sono pur sempre dei limiti posti al sistema qualsiasi esso sia. Inoltre gli strumenti vengono programmati individualmente ed essi hanno dei codici diversi; è quindi essenziale avere il manuale d'uso con le specifiche di programmazione (Remote Interface Programming), senza di essi non si potrà predisporre della massima funzionalità.

A questo punto posso affermare che il progetto sembra realizzabile in sei settimane; dato che i pericoli ed i punti deboli sono conosciuti, è possibile reagire di conseguenza e di tenerli sotto controllo.

3.2. GPIB

Per questo progetto è stato utilizzato il bus GPIB, perché gli strumenti di laboratorio sono dotati di questa interfaccia. Ho quindi potuto cominciare subito ad implementare dei codici per verificare la comunicazione.

Il bus IEEE 488 fu sviluppato nel 1965 dalla Hewlett–Packard come "HP Interface Bus", HP-IB, per fornire un'interfaccia standard per la comunicazione tra gli strumenti. L'interfaccia ebbe un notevole successo tale da indurre la IEEE a pubblicare nel 1975 uno standard, noto come IEEE 488, per questo tipo di comunicazione rinominando il bus GPIB (General Purpose Interface Bus). Successivamente, furono pubblicate altre versioni dello standard fino ad arrivare al 1987 con la definizione delle IEEE 488.1 e IEEE 488.2. La prima fissa le specifiche meccaniche ed elettriche del collegamento mentre la seconda definisce le modalità di inter-comunicazione tra gli strumenti, il formato dei dati e i comandi per la programmazione.

Nel 1990 i maggiori costruttori di strumenti di misura introdussero un ulteriore standard, noto come SCPI (Standard Command Programmable Instrument), che definisce i comandi ad alto livello per la gestione dello strumento e dei messaggi di errore.

Il bus IEEE 488 è costituito da 24 linee che consentono di trasmettere in modo parallelo un byte alla volta ad una velocità massima di 1 Mbyte/s. Lo standard prevede una lunghezza totale del bus non superiore a 20 metri e una distanza massima tra un dispositivo ed un altro di 4 metri anche se è preferibile che il collegamento in media non superi i 2 metri. Possono essere collegati tra loro un massimo di 15 strumenti, sebbene sul mercato esistono opportuni dispositivi, denominati repeater, che consentono di superare il limite sia del numero di strumenti sia della lunghezza massima del collegamento.

Il collegamento tra gli strumenti può assumere, come mostrato in figura 3.9, tre diverse tipologie:

- a **stella**, in cui gli strumenti sono tutti connessi direttamente al controller;
- a **catena**, in cui solo il primo strumento è collegato al controller;
- **mista**, in cui si hanno sia collegamenti a stella che a catena.

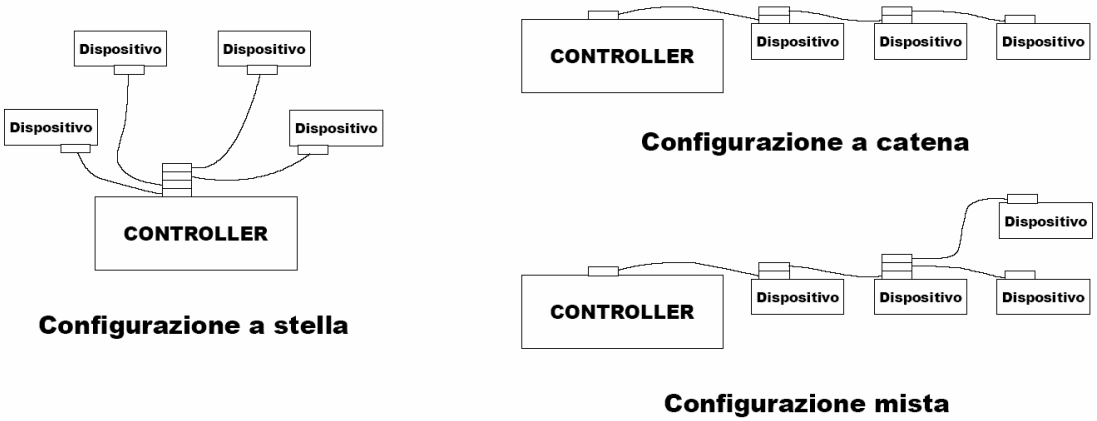

Figura 3.1 Collegamento strumenti tramite GPIB

In tutte le tipologie, i cavi risultano essere collegati in parallelo al controller in quanto i connettori sono realizzati in modo tale da consentire il collegamento in parallelo di un numero arbitrario degli stessi. La stabilità meccanica delle connessioni è assicurata da opportune viti di fissaggio.

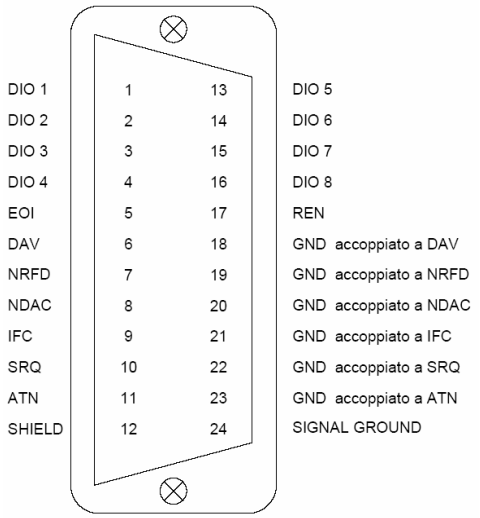

Figura 3.2 Schema del connettore GPIB

Lo schema del connettore è quello riportato in figura 3.10. Sono presenti 24 linee di cui:

- 8 sono utilizzate come linee di dati (DIO 1-8);
- 3 (DAV, NRFD e NDAC) sono impiegate per l'handshake;
- 5 (EOI, IFC, SRQ, ATN, REN) sono impiegate per il controllo diretto dell'interfaccia;
- 1 (SIGNAL GROUND) serve come riferimento dei potenziali per i segnali;
- 1 (SHIELD) è impiegata come linea di sicurezza per il collegamento a terra degli involucri degli strumenti;
- 6 linee (GND) sono collegate a massa e svolgono una parziale funzione di schermo per attenuare gli effetti del rumore di varia origine sulle linee che necessitano di una maggiore affidabilità di trasmissione: la protezione è ottenuta avvolgendo ciascuna linea con una corrispondente tra quelle che svolgono la funzione di controllo e l'handshake.

La posizione delle linee nel connettore non è casuale; le linee di controllo sono poste in prossimità della linea che può essere usata come schermo mentre quelle di riferimento e di sicurezza sono poste ad una estremità in modo da attenuare l'effetto che le eventuali correnti in esse circolanti possono avere sulle altre linee del bus. Infine, le linee non schermate dei dati sono poste alla massima distanza dalla linea di massa che può diventare una fonte di disturbi.

Per quanto riguarda le caratteristiche elettriche, il bus IEEE 488 impiega una logica TTL inversa, ossia rappresenta il livello logico basso con una tensione di circa 3 V e il livello logico alto con una tensione di 0 V.

Lo standard prevede le seguenti specifiche:

Livello Logico	Livello di Tensione
0	≥ 2 V
1	≤ 0.8 V

Tabella 3.2 Livelli logici GPIB

Sul bus possono essere inviate due tipologie di messaggi:

- **dati**, sono messaggi che contengono informazioni specifiche di uno strumento quali le istruzioni di comando, i risultati delle misure, lo stato dello strumento e i file di dati;
- **comandi**, sono messaggi che riguardano le interfacce e servono per inizializzare il bus, indirizzare gli strumenti, impostare gli strumenti in modalità remota o locale.

I dispositivi connessi sul bus possono essere di tre tipi:

- **talker**, è un dispositivo in grado di trasmettere dati attraverso il bus e, in un certo istante, solo un talker può essere attivo sul bus;
- **listener**, è un dispositivo in grado di ricevere dati e comandi; su uno stesso bus ci possono essere presenti al massimo 14 listener;
- **controller**, si occupa di gestire il flusso delle informazioni inviando i comandi opportuni e stabilisce, ad esempio, chi è talker e quali sono i listener.

In ogni istante, solo un dispositivo può essere controller, assumendo la denominazione di "controller in charge", e può decidere di passare il controllo ad un altro dispositivo ma non potrà più riaverlo senza il consenso di quest'ultimo. Solo un dispositivo, denominato "system controller", può divenire autonomamente "controller in charge": esso generalmente è costituito dalla scheda di interfaccia IEEE 488 inserita all'interno del computer.

I vari strumenti possono essere sia listener sia talker a seconda di come vengono indirizzati. L'interfaccia IEEE488 del computer può essere talker, listener e controller.

Ad ogni dispositivo collegato al bus, compresa la scheda di interfaccia del computer, è assegnato un indirizzo univoco da 0 a 31. Solitamente l'indirizzo 0 è quello assegnato al controller mentre l'indirizzo 31 è riservato ai costruttori per eseguire le procedure di autodiagnosi sugli strumenti. Per quanto concerne gli strumenti, in quelli più vecchi, l'indirizzo viene impostato in formato binario mediante dei dip switch, mentre su quelli più recenti è impostato dal pannello frontale.

Come mostrato nella tabella 3.3, l'indirizzo completo è composto da 8 bit

7	6	5	4	3	2	1	0
0	TA	LA	ADDRESS 0-31				

Tabella 3.3 Indirizzo completo GPIB

Il bit più significativo è sempre posto uguale a zero. Il controller imposta il bit Listener Active, LA = 1 per indirizzare un dispositivo come listener e il bit Talker Active, TA = 1 per indirizzare un dispositivo come talker.

Quello descritto è l'indirizzo primario; esiste anche la possibilità di attribuire un indirizzo secondario, numero compreso tra 96 e 126, per la gestione di strumenti organizzati in sotto-unità individualmente indirizzabili. In questo caso, l'indirizzo primario indica lo strumento nel suo complesso e l'indirizzo secondario la singola sotto-unità.

Esaminiamo ora in dettaglio la procedura di handshake che consente di trasferire i dati lungo il bus in modo corretto. Lo standard non impone ai dispositivi specifiche temporali stringenti circa la lettura e la scrittura dei dati e dei segnali di controllo. Pertanto, è possibile che siano collegati sullo stesso bus dispositivi con velocità di trasferimento dei dati alquanto differenti una dall'altra. L'handshake garantisce che anche lo strumento più lento riceva correttamente tutti i dati.

Le linee per il protocollo dell'handshake sono tre:

- **DAV** (Data Valid), è utilizzata per segnalare la presenza di informazione sulle linee dati (DIO 1-8); il talker pone DAV=1 quando il dato è pronto e NRFD=0;
- **NRFD** (Not Ready For Data), è utilizzata per segnalare l'incapacità di un listener di acquisire dati; il listener pone NRFD=1 quando non può accettare nuovi dati. Poiché i circuiti di uscita dei dispositivi connessi al bus sono del tipo "open collector", con una resistenza di pull up e una resistenza di terminazione, essi realizzano un circuito combinatorio "OR cablato", pertanto NRFD=0 solo quando tutti i dispositivi sono pronti a ricevere i dati.
- **NDAC** (Not Data Accepted), è utilizzata per segnalare l'accettazione dei dati; il listener imposta NDAC=1 per indicare che non ha acquisito i dati. Anche in questo caso NDAC=0 solo quando tutti i listener hanno accettato i dati.

La procedura di handshake si svolge come riportato in figura 3.11, importante ricordare che sul bus sono tutti dati invertiti, perchè si tratta di logica negativa.

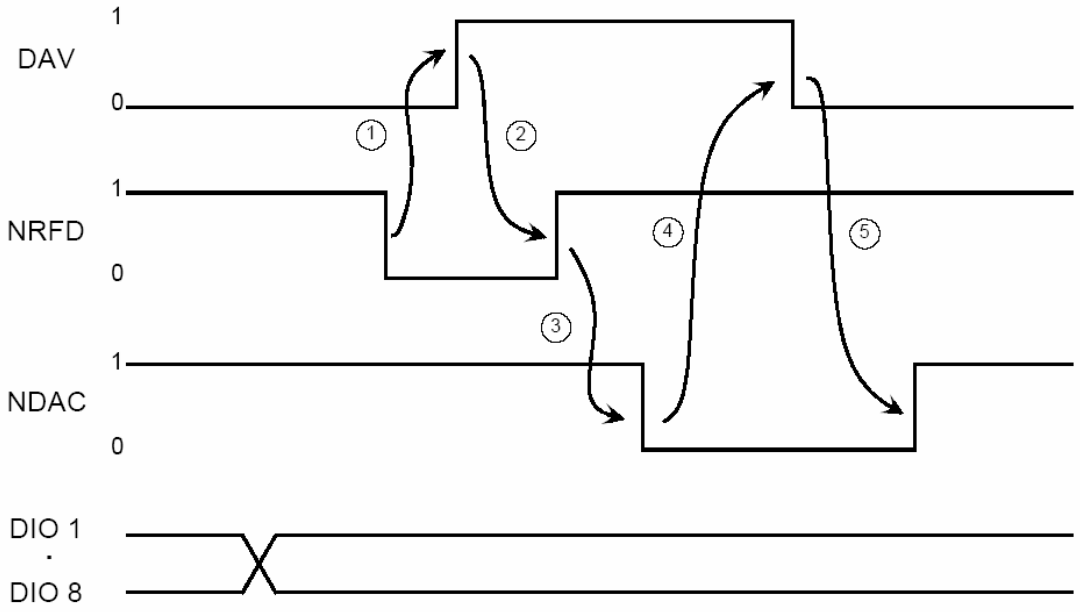

Figura 3.3 Handshake

Quando un controller o un talker vuole inviare un dato, pone il byte sul bus dati e verifica che NDAC=1 e NRFD=1. Quando NRFD=0, ovvero tutti i dispositivi sono pronti, segnala la presenza del dato ponendo DAV=1. A questo punto i listener ricevono questa informazione e pongono NRFD=1, quello più veloce provoca la commutazione, per segnalare che non sono disponibili a ricevere altri dati. Quando tutti hanno letto, NDAC=0, quello più lento provoca la commutazione, e il controller pone DAV=0 per segnalare che i dati non sono più validi. A questo punto i listener pongono NDAC=1 e si ripetono i passi dall'inizio.

Vediamo, infine, alcuni dettagli sulle restanti 5 linee di controllo:

- **ATN** (Attention), il controller pone ATN=1 quando usa il bus per inviare i comandi mentre pone ATN = 0 per segnalare ad un talker che può inviare i dati sul bus;
- **IFC** (Interface Clear), è utilizzata dal system controller per inizializzare tutte le linee del bus e diventare controller in charge;
- **REN** (Remote Enable), viene usata dal controller per porre gli strumenti in modalità di funzionamento remoto o locale;
- **SRQ** (Service Request), agisce come un interrupt e può essere posta uguale a 1 da un qualunque dispositivo per richiedere un servizio; quando il controller riceve SRQ=1 inizia a interrogare i vari dispositivi uno alla volta finché non trova quello che ha inviato la richiesta il quale, una volta indirizzato, riporta SRQ a 0;
- **EOI** (End Or Identify), ha due funzioni: i) il talker mette EOI=1 per indicare la fine della stringa trasmessa; ii) il controller mette EOI=1 per chiedere agli strumenti sul bus di identificarsi.

Per comprendere meglio il funzionamento del bus GPIB ho mandato dei dati ad un'alimentatore e con un logic analyzer ho potuto osservare il comportamento delle diverse linee.

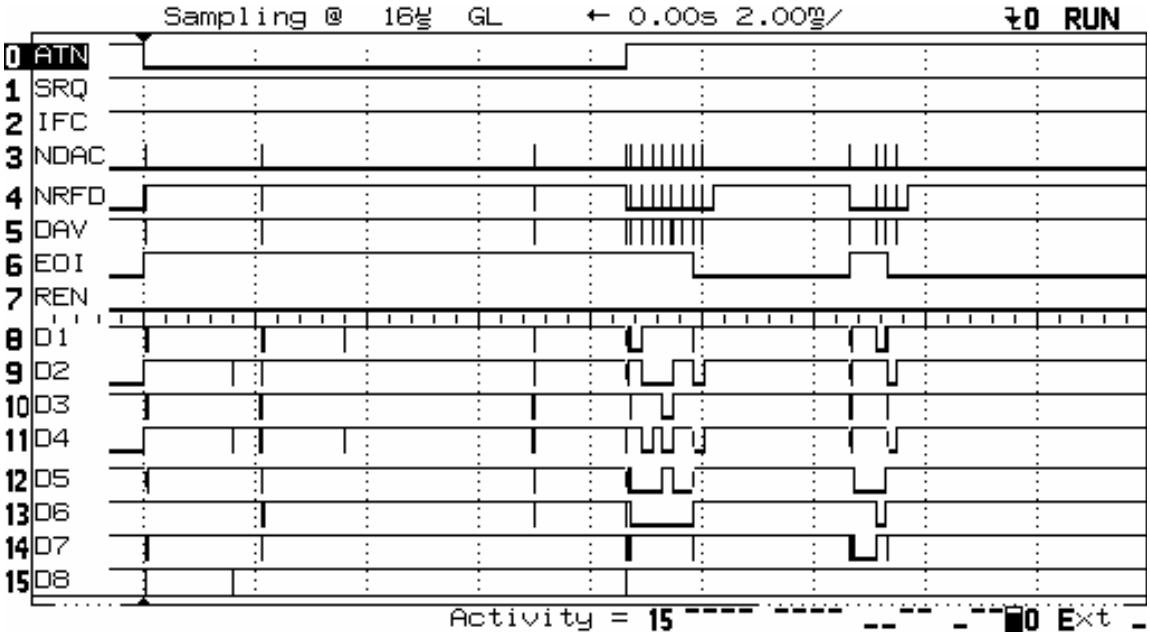

Figura 3.4 Comportamento GPIB

Dalla figura 3.4 si può notare che la linea ATN va a 1, perchè il controller pone ATN=1 quando usa il bus per inviare i comandi. Vengono quindi inviati due comandi all'alimentatore, uno per impostare la tensione e uno per attivare le uscite.

Inoltre possiamo notare che quando DAV vale 0, NRFD vale 1, nel periodo in cui vengono inviati i due comandi. La linea di NDAC viene messa a 1 dal listener per indicare che non ha ancora accettato il dato.

Le linee dati sono rappresentate da D1 a D8.

4. Applicazione specifica

Per questo progetto ho sviluppato un metodo per fornire un'alimentazione simile ad una cella fotovoltaica. Il laboratorio SSL vorrà utilizzare questo sistema per effettuare dei test dei circuiti elettronici, di accumulatori e batterie che verranno implementati in un CubeSat. Nella figura 4.1 si mostra la struttura del nanosatellite con delle dimensioni di 10x10x10 cm e un peso massimo di 1 kg.

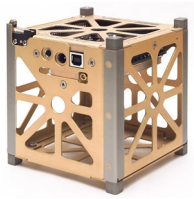

Figura 4.1 CubeSat

In seguito descriverò alcuni aspetti teorici delle celle fotovoltaiche per spiegare alcune scelte effettuate.

4.1. Generatori fotovoltaici

Tra le fonti di energia alternative vi é la conversione fotovoltaica dell'energia solare in energia elettrica, la quale utilizza direttamente quella che é poi la fonte di tutte le altre energie rinnovabili, il sole.

Il sole è una sfera incandescente di gas con un diametro di 1.39 milioni di km; a confronto la Terra ha un diametro di 12'760 km. Si può quindi affermare che il sole ha un diametro pari a 109 volte quello della Terra. La distanza tra il sole e la Terra vale 150 milioni di km, la luce impiega quindi 8 minuti per percorrere la distanza. Il sole è composto da 75% di idrogeno, 23% di elio e per i restanti 2% da altri elementi; sulla sua superficie la temperatura varia attorno ai 5'700° C. Durante la continua fusione del nucleo gli atomi di idrogeno vengono trasformati in elio, l'energia sprigionata durante questo procedimento viene emanata nell'universo come radiazione di luce e calore. Ogni secondo 4 milioni di tonnellate di materiale vengono trasformati in energia.

La luce solare percorre l'atmosfera prima di raggiungere la superficie terrestre. Quando la luce colpisce la Terra perpendicolarmente, essa percorre l'atmosfera lungo il tragitto più corto. Negli altri casi il tragitto è maggiore.

L'atmosfera altera lo spettro solare assorbendo più o meno serte lunghezze d'onda e, a seconda del tragitto che la luce deve fare, lo spettro che raggiunge la superficie terrestre risulta modificato.

Per dare un'indicazione sulla composizione dello spettro della luce solare in diverse situazioni è stato introdotto il concetto AM.

In generale per trovare il valore della massa d'aria unitaria AM x, vale la formula seguente:

$$x = \frac{1}{\cos \gamma}$$

dove AM1 indica che il sole si trova allo zenit e AM0 indica le condizioni spaziali (fuori dall'atmosfera).

La radiazione solare è composta da radiazioni di diverse lunghezze d'onda. Queste sono visibili solo in parte dall'occhio umano. Lo spettro varia a seconda della massa d'aria, al di fuori dell'atmosfera terrestre lo spettro ha la maggiore intensità. Nella figura seguente vediamo quindi la radiazione solare in funzione delle diverse lunghezze d'onda.

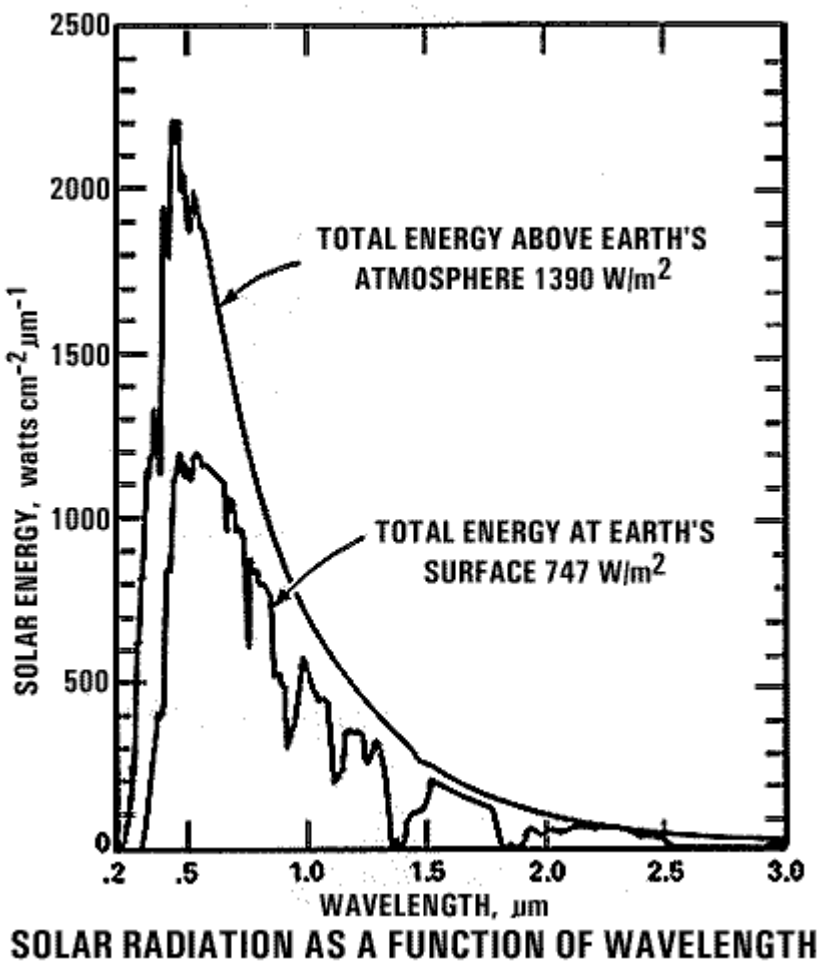

Figura 4.2 Radiazione solare

Dall'immagine 4.2 possiamo notare che dallo spettro della radiazione solare sulla superficie della Terra vengono filtrate alcune lunghezze d'onda; questo è dovuto dagli elementi di cui è composta l'atmosfera e l'inquinamento atmosferico.

Nella tabella 4.1 si può vedere l'irraggiamento nello spazio.

	Ultravioletto	Visibile	Infrarosso
Lunghezze d'onda [µm]	0-0.38	0.38-0.78	0.78-∞
Irraggiamento [W/m²]	95	640	618
Percentuale Irraggiamento [%]	7	47.3	45.7

Tabella 4.1 Irraggiamento nello spazio

Se si sommano questi valori si ottiene la costante solare, che vale 1353 W/m².

Caratteristiche elettriche

La caratteristica I-V di una cella può essere ottenuta disegnando un circuito equivalente del dispositivo.

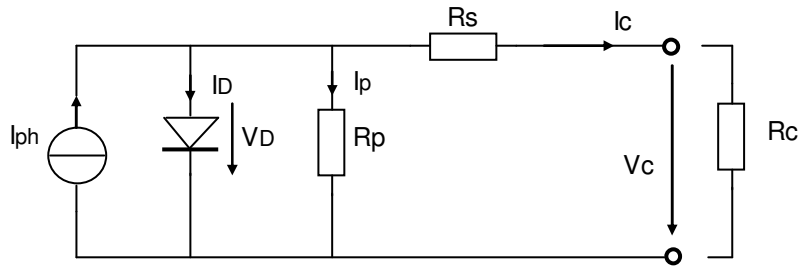

Figura 4.3 Circuito equivalente

La generazione di corrente I_{ph} per effetto della radiazione luminosa é rappresentato da un generatore di corrente in parallelo con un diodo che rappresenta la giunzione p-n.

La corrente nel diodo vale:

$$I_D = I_o\left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1\right)$$

dove: la corrente I_0 è la corrente di saturazione del diodo, la costante di Boltzmann vale $k = 1.38 \cdot 10^{-23}\,\frac{Ws}{K}$; la temperatura T viene espressa in Kelvin (0 K equivalgono a -273.15 °C), la carica elementare vale $q = 1.602 \cdot 10^{-19}\ As$ e V_D è la tensione ai capi della giunzione.

La resistenza serie R_s tiene conto della resistenza ohmica nei contatti di metallo, nel materiale semiconduttore e delle perdite elettriche nel collegamento metallo-semiconduttore.

La resistenza parallela R_p rappresenta la resistenza parallela proveniente dalle correnti parassite tra la parte superiore e quella inferiore della cella ed all'interno del materiale dalle inomogeneità o impurità.

La corrente totale I_c, corrisponde alla corrente generata dalla luce meno la corrente nel diodo meno la corrente nella resistenza parallela e vale:

$$I_c = I_{ph} - I_D - I_p = I_{ph} - I_o\left(e^{\frac{q(V_c+I_cR_s)}{kT}} - 1\right) - \left(\frac{V_c + I_cR_S}{R_p}\right)$$

Nella figura 4.4 viene rappresentata la caratteristica I-V di una cella al silicio.

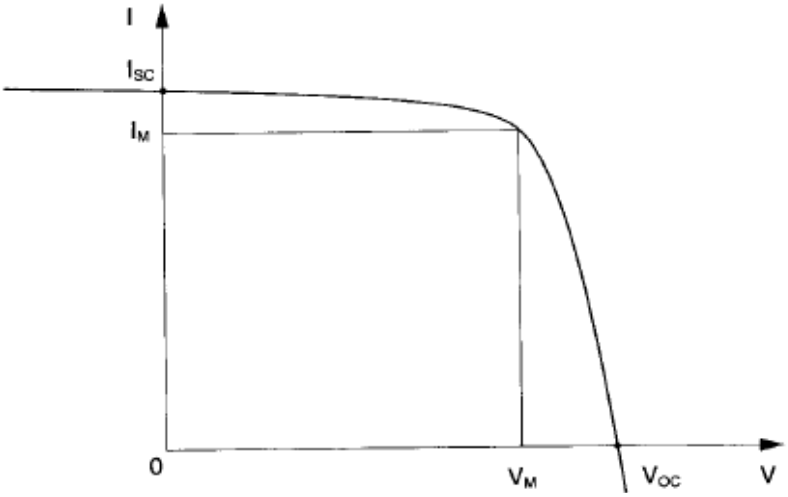

Figura 4.4 Caratteristica I-V

La corrente di corto circuito I_{sc} é la massima corrente generata dalla luce, infatti in condizioni di corto circuito il diodo non assorbe corrente quindi $I_{sc}=I_{ph}$.

A vuoto, invece, si ha la massima tensione V_{oc} ai capi della cella, corrispondente a quella tensione per cui la corrente risultante in uscita é nulla.

La condizione di lavoro ottimale della cella é rappresentata dal punto (V_M, I_M), che rappresenta la potenza massima ottenibile ($P_M = V_M \cdot I_M$).

Questo punto di massima potenza é un parametro importante per individuare il livello di prestazione della singola cella.

Anche il rapporto tra P_M e $I_{sc} \cdot V_{oc}$, detto Fill-Factor (FF) o fattore di riempimento, é un ulteriore termine di giudizio per la qualità della cella. Questo mette in relazione la massima potenza effettivamente estraibile con la potenza massima ideale, visibile nella figura 4.5.

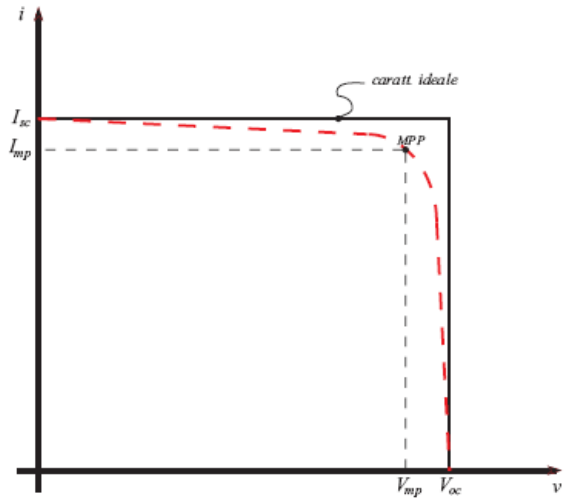

Figura 4.5 Fill Factor

La curva caratteristica I-V di una specifica cella fotovoltaica posta in un particolare contesto dipende, sostanzialmente, da tre variabili fondamentali:

- intensità della radiazione incidente;
- temperatura della giunzione;
- area della cella.

Variando l'intensità di irraggiamento solare e mantenendo costanti le altre condizioni, la curva caratteristica di una cella fotovoltaica si modifica come nella figura 4.6.

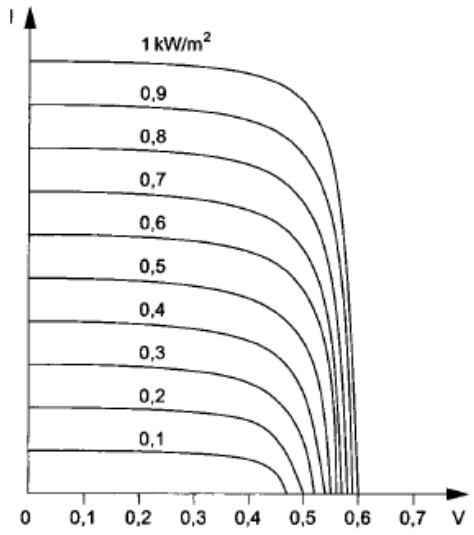

Figura 4.6 Variazione dovuta all'irraggiamento

Si può notare che la corrente I_{sc} (e quindi anche I_M) é molto sensibile alla radiazione solare, perchè essa é proporzionale al numero di fotoni al secondo che incidono sulla superficie della cella. Le tensioni V_{oc} e V_m subiscono una piccola riduzione con la dimuzione dell'irraggiamento. Una spiegazione di questo fenomeno può essere ricavato risolvendo la formula seguente rispetto ad V_{oc}.

$$I_c = I_{ph} - I_D - I_p = I_{ph} - I_o\left(e^{\frac{q(V_c+I_cR_s)}{kT}} - 1\right) - \left(\frac{V_c + I_cR_S}{R_p}\right)$$

Se pongo V_C=V_{oc}, allora la corrente I_c=0A. Poi risolvo rispetto a V_{oc} e ottengo:

$$0 = I_{ph} - I_o\left(e^{\frac{qV_{OC}}{kT}} - 1\right) - \left(\frac{V_{oc}}{R_p}\right)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right)$$

Si può quindi notare che la tensione di circuito aperto varia con il logaritmo naturale, per questo motivo la tensione si modifica di poco al variare dell'irraggiamento.

Al variare della temperatura notiamo che la tensione subisce dei cambiamenti notevoli. Se la temperatura aumenta, allora diminuisce la tensione e aumenta la corrente, e viceversa. Mentre il punto di potenza massima ottenibile rimane praticamente costante.

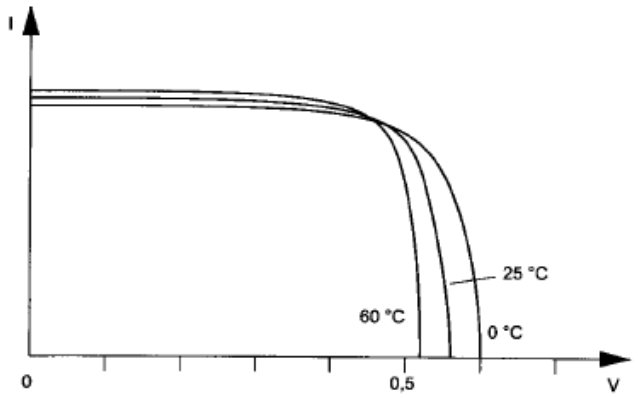

Figura 4.7 Variazione dovuta alla temperatura

La riduzione della tensione V_{oc} con un aumento di temperatura sembra contraddire la formula

$$V_{oc} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right).$$

Tuttavia, in maggior dettaglio, I_0 diminuisce quando la temperatura diminuisce.

La caratteristica I-V rappresentata precedentemente, qualora vengano collegate più celle in serie o in parallelo, non cambia nella forma, ma subisce solo un riscalamento lungo gli assi.

Nel collegamento in serie la corrente è la stessa, mentre la tensione diviene la somma delle singole tensioni.

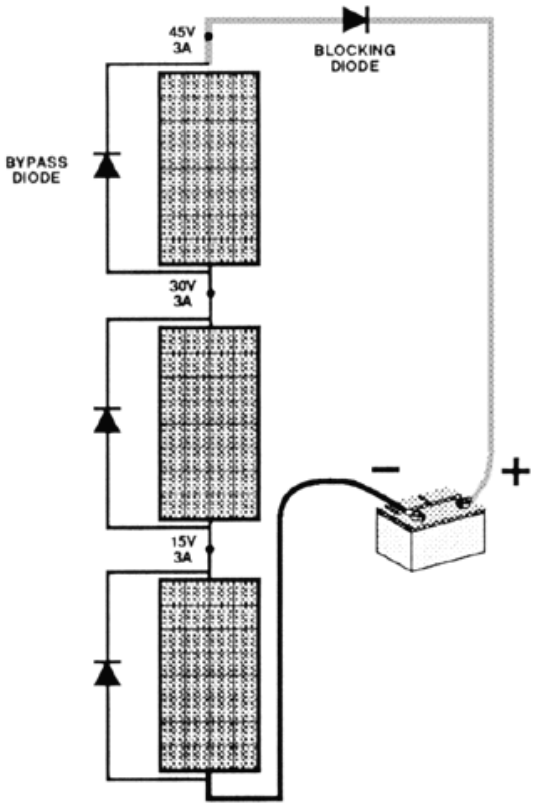

Figura 4.8 Collegamento serie

Nel collegamento in parallelo la corrente totale è data dalla somma delle correnti nelle varie celle, mentre la tensione è uguale a quella di una cella singola.

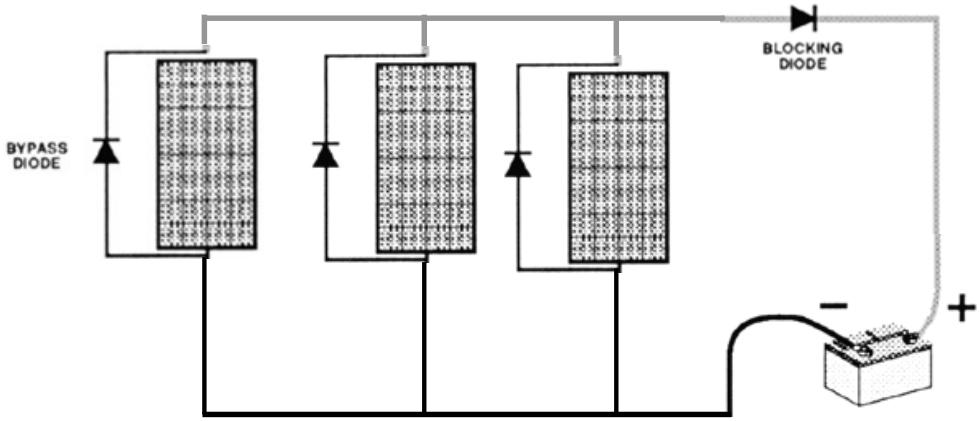

Figura 4.9 Collegamento parallelo

I normali pannelli fotovoltaici vengono realizzati sfruttando più combinazioni di collegamenti serie e parallelo di parecchie celle, al fine di generare una potenza elettrica pari ad almeno qualche Watt. Impianti solari con tanti moduli possono avere potenze dell'ordine delle centinaia di kW o più.

In condizioni di corto circuito o di circuito aperto, la potenza erogata dalla cella solare è nulla. Nella figura 4.10 vediamo il punto di massima potenza di una singola cella, che da un differente punto di vista rappresenta la condizione di adattamento d'impedenza fra cella solare e carico alimentato.

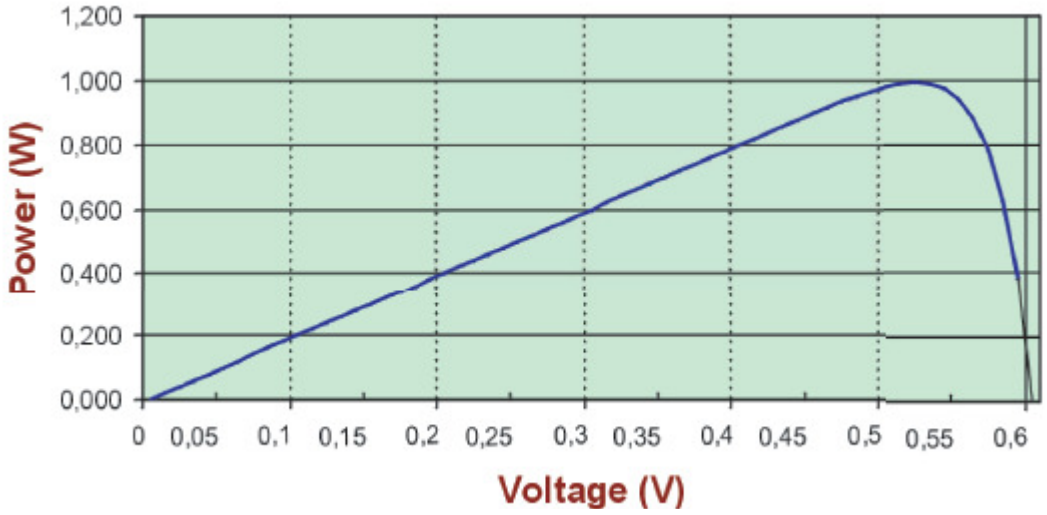

Figura 4.10 Potenza erogata

Purtroppo può capitare che la superficie dei pannelli fotovoltaici non sia uniformemente illuminata; se dei pannelli vengono polarizzati inversamente essi agiranno da carico.

Poiché quest'evento è molto dannoso per le celle, ciascuna di esse è solitamente equipaggiata con un diodo di bypass che protegge dalla polarizzazione inversa.

Il problema sopra menzionato è rappresentato nella figura 4.11, in cui due celle si trovano collegate in serie.

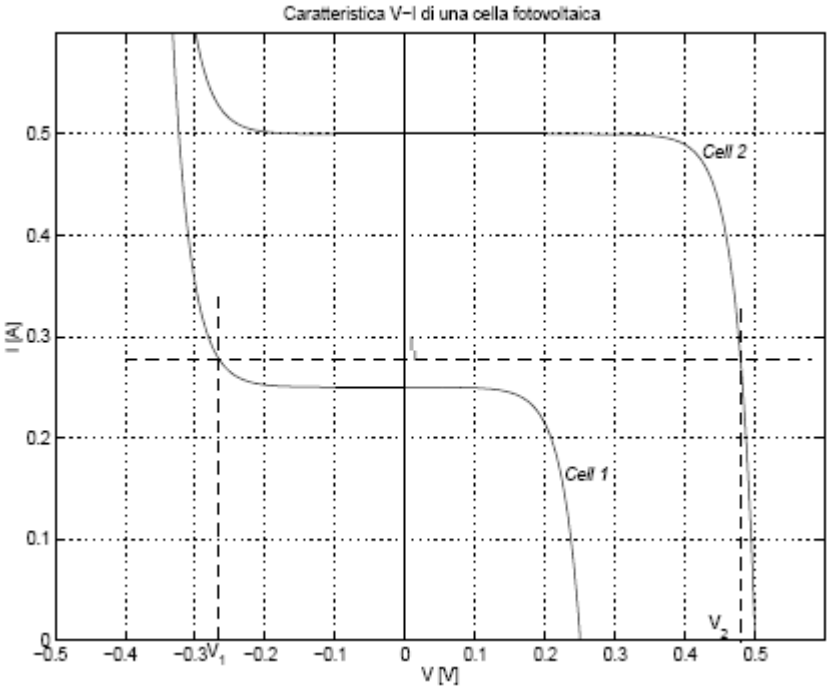

Figura 4.11 Caratteristica V-I con diodo di bypass

La prima cella è illuminata meno della seconda ($I_{SC1}<I_{SC2}$) e a seconda della corrente richiesta dal carico, può capitare, se I>0.26A, che il punto di lavoro di questa si sposti nel secondo quadrante del piano V-I, ovvero la cella agisce da carico.

Il diodo di protezione, pur senza mutare radicalmente il comportamento della cella scarsamente illuminata, permette di minimizzare la potenza dissipata.

5. DESIGN / CONCEZIONE

Inizialmente ho istallato i software necessari per l'acquisizione e l'elaborazione di strumenti collegati tramite bus GPIB. Ho utilizzato la versione 6.2 del programma VEE in quanto essa è presente in sede ed istallata nei PC di laboratorio. Per facilitare l'apprendimento del software è opportuno cominciare da piccoli codici ed in seguito aggiungere delle opzioni.

5.1. Riconoscimento strumentazione

Per poter pilotare le apparecchiature da laboratorio ho utilizzato il bus GPIB e il software VEE. La connessione fisica utilizzata durante questo progetto viene mostrata nella figura 5.1.

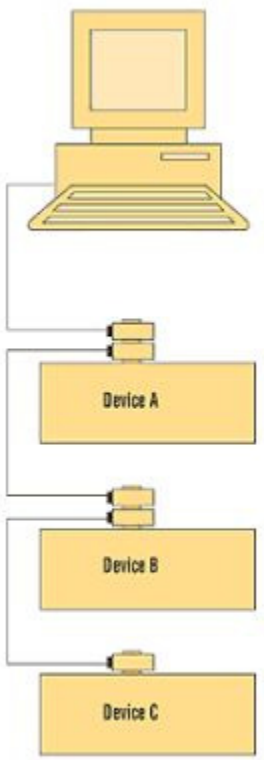

Figura 5.1 Connessione fisica utilizzata

Per effettuare un test di verifica ho collegato un generatore, un multimetro ed un oscilloscopio; in seguito ho provato il riconoscimento automatico degli strumenti tramite il software VEE.

Dato che ho utilizzato degli strumenti della HP, il programma è riuscito a riconoscere univocamente il tipo ed il suo indirizzo. Successivamente ho provato con un carico elettronico della HAMEG ed il programma è riuscito ad individuare l'indirizzo ma non il tipo. In questo caso è importante avere il massimo controllo sugli indirizzi dei vari strumenti per non confonderli tra di loro.

Nell'immagine 5.2 vediamo l'applicazione di riconoscimento automatico degli apparecchi collegati tramite GPIB (I/O → Instrument Manager).

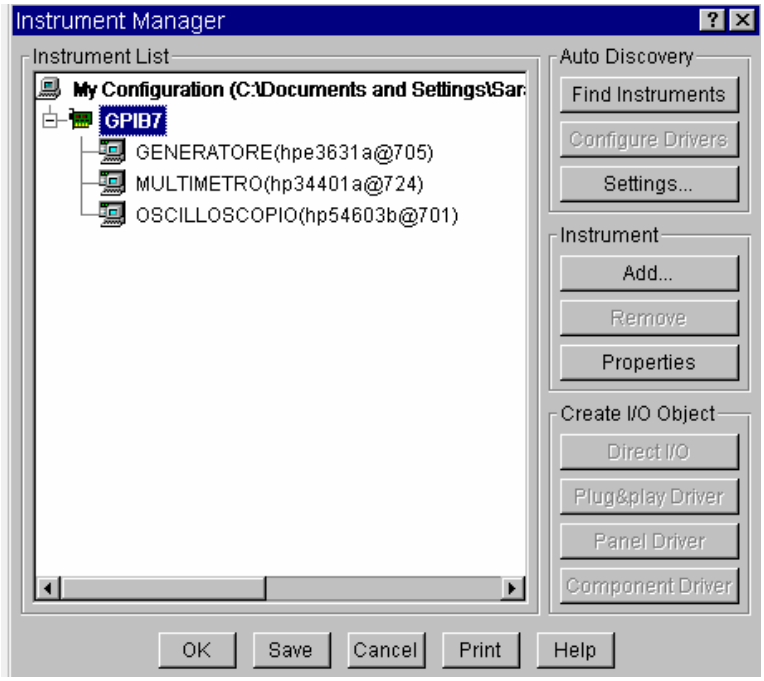

Figura 5.2 Instrument Manager VEE

Per attivare la funzione automatica di ricerca bisogna pigiare sul bottone "Find Instruments", lo strumento viene riconosciuto tramite tipo ed indirizzo. L'utente può in seguito specificare un nome "Properties", come per esempio GENERATORE.

A questo punto è possibile programmare ogni singolo strumento tramite VEE.

5.2. Codici

Per quanto riguarda la programmazione degli strumenti inizialmente ho avuto qualche difficoltà per quanto riguarda la codifica. Con il software VEE esistono varie possibilità per comunicare con lo strumento, che sono Direct I/O, Plug & Play Driver, Panel Driver e Component Driver. Il Panel Driver è un pannello di controllo grafico e corrisponde a grandi linee al pannello frontale dello strumento in questione. Sicuramente si può dire che è di facile utilizzo e se così si può dire "user friendly", ma è anche molto limitativo. Un'altra possibilità per comunicare è il Plug & Play Driver, che mostra un elenco di funzioni utilizzabili. Questo metodo è meno limitativo di quello descritto precedentemente, ma non l'ho utilizzato in questo progetto.

Le Direct I/O permettono di programmare lo strumento tramite delle stringhe di comando, che variano per ogni strumento. Per utilizzare le Direct I/O bisogna selezionare la barra degli strumenti I/O, poi Instrument Manager, a questo punto si clicca sullo strumento con il quale si vuole comunicare e si selziona l'opzione Direct I/O. Dovrebbe quindi apparire una figura simile a quella mostrata successivamente.

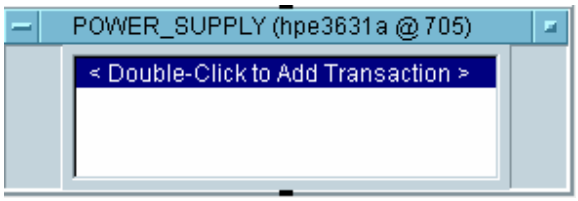

Figura 5.3 Direct I/O

Ora è possibile introdurre i codici per la programmazione dello strumento cliccando due volte sulla riga <Double-Click to Add Transaction>.

I codici sono descritti nei manuali d'uso dello strumento, in un capitolo chiamato generalmente "Remote Interface Programming". Purtroppo ho avuto difficoltà a trovare i manuali, sia in formato cartaceo che elettronico, essi sono indispensabili per poter comunicare con lo strumento.

Benchè vi siano alcuni comandi comuni a tutti gli strumenti, essi non permettono di programmare lo strumento, ma solo di verificare la comunicazione e di visualizzare dei registri. Nella tabella 6.1 sono raccolti questi comandi, essi appartengono allo standard IEEE 488.2.

Mnemonic	Group	Description
*IDN?	System Data	Identification Query
*RST	Internal Operations	Reset
*TST?	Internal Operations	Self-test query
*OPC	Synchronization	Operation complete
*OPC?	Synchronization	Operation complete query
*WAI	Synchronization	Wait to complete
*CLS	Status and Event	Clear status
*ESE	Status and Event	Event status enable
*ESE?	Status and Event	Event status enable query
*ESR?	Status and Event	Event status register query
*SRE	Status and Event	Service request enable
*SRE?	Status and Event	Service request enable query
*STB?	Status and Event	Read status byte query

Tabella 5.1 Comandi dello standard IEEE488.2

Se si interrogano i registri di uno strumento, la risposta ottenuta è rappresentata da un numero. Per conoscere cosa rappresenta il numero ho aggiunto la figura 6.2, che rappresenta l'event status register (ESR) e lo staus byte register (STB).

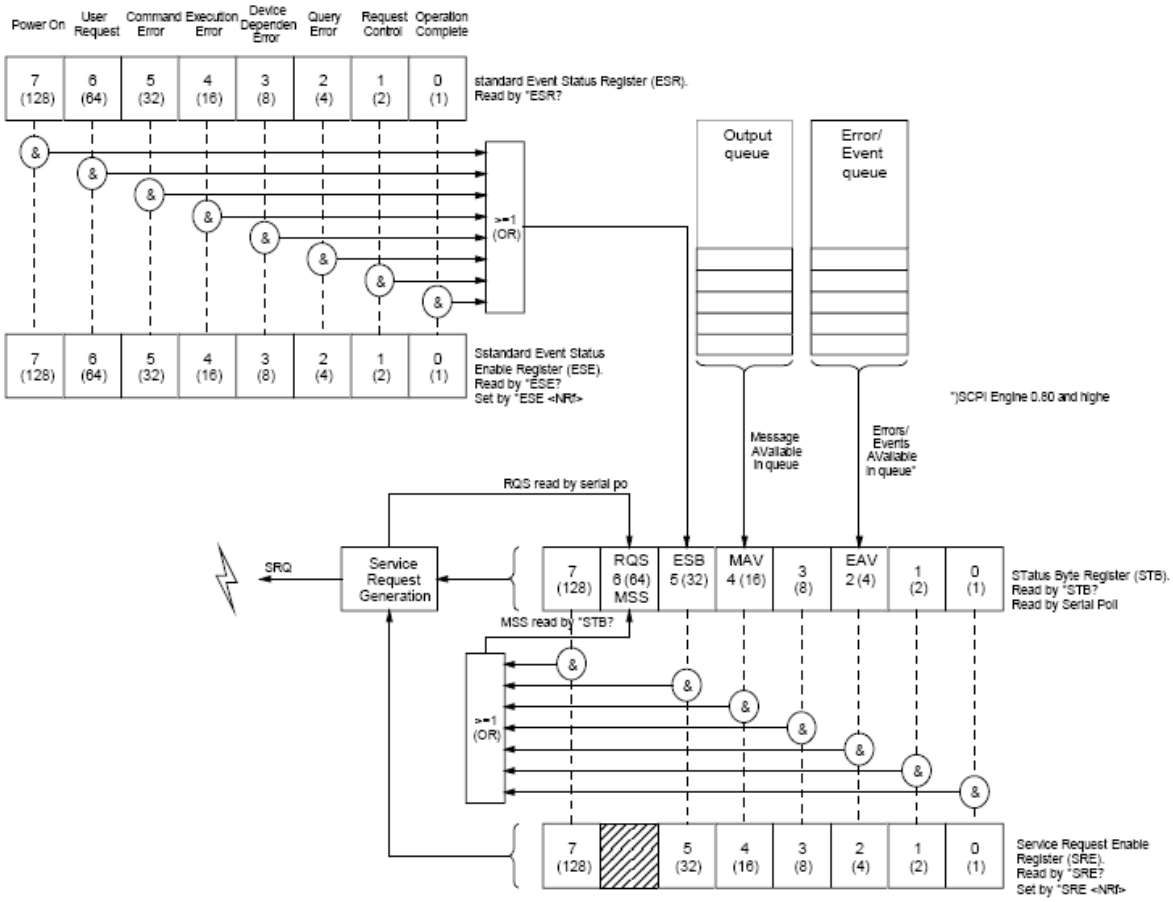

Figura 5.4 Registri

Specialmente se gli strumenti sono vecchi, il ritrovamento del manuale d'uso in formato elettronico sembra quasi impossibile.

Senza il manuale si può praticamente rinunciare alla comunicazione tramite bus GPIB. I manuali utilizzati durante questo lavoro vengono aggiunti come allegati.

Esiste pure una raccolta di comandi chiamata SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) che contiene i possibili codici utilizzabili. Purtroppo non si può sapere quali comandi valgono per quale strumento. Ho provato con un oscilloscopio della GOULD a comunicare tramite alcuni codici SCPI, visto che non ho trovato un manuale di programmazione. Mi sono resa conto che si perde tanto tempo visto che i comandi da provare sono raccolti su 700 pagine e non vi è la garanzia che uno di essi funziona.

In seguito una breve descrizione della codifica degli strumenti utilizzati durante questo progetto.

5.2.1. Power Supply HP E3631A

L'alimentatore HP E3631A fornisce da 0 a ±25 V con una corrente massima di 1A e da 0 a +6V con una corrente massima di 5 A.

Quando si programma l'alimentatore per interfaccia remota, esso opera nei modi listener and talker. Le funzioni implementate tramite GPIB o RS-232 sono le seguenti:

- Programmazione di tensione e corrente
- Lettura di tensione e corrente
- Abilitazione track mode
- Lettura dei registri
- Detezione degli errori
- Calibrazione della tensione e della corrente
- Abilitazione dell'uscita
- Self test

Inizialmente è opportuno introdurre la visualizzazione degli errori tramite il comando:

```
SYST:ERR?
```

A questo punto si possono visualizzare gli errori che avvengono durante la programmazione ed è quindi più facile corregere il codice.

Quando si inizia la programmazione di uno strumento è utile cominciare con un reset totale dello strumento, dove il settaggio delle varie funzioni è conosciuto. L'alimentatore HP E3631A viene portato a 6V e 5A con l'uscita disabilitata, il codice da utilizzare è il seguente:

```
*RST
```

Con il seguente comando è possibile selezionare l'uscita, la tensione e la corrente tramite un unico comando. L'esempio in seguito seleziona l'uscita 6V e definisce una tensione di 3V e una corrente di 1A.

```
APPL P6V, 3.0, 1.0
```

Per abilitare l'uscita è necessario un ulteriore comando. Dato che utilizzo il comando di reset dello strumento, l'uscita è sempre disabilitata. Dopo il settaggio delle tensioni e delle correnti si può quindi abilitare l'uscita con:

```
OUTP ON
```

Se non si vuole utilizzare la funzione APPLY è possibile utilizzare comandi di basso livello per selezionare l'uscita e programmare i valori di tensione e corrente.

```
INST:NSEL 1      % uscita 6V
INST:NSEL 2      % uscita positiva 25V
INST:NSEL 3      % uscita negativa 25V
INST P6V         % uscita 6 V
INST P25V        % uscita positiva 25V
INST N25V        % uscita negativa 25V
VOLT 3.0         % tensione di 3.0V
CURR 1.0         %corrente di 1.0A
```

Dopo aver programmato la tensione e la corrente è utile misurare i loro valori all'uscita dello strumento alle boccole.

```
MEAS?            % misura la tensione
MEAS:CURR?       % misura della corrente
```

Altri comandi possono essere consultati nel manuale e si trovano in allegato a questo documento.

5.2.2. Multimetro HP 34401A

Il multimetro digitale ha la precisione 6½ digits e permette la misura di corrente, tensione, resistenza, frequenza, periodo,… .

Per la misura di questi valori bisogna programmare lo strumento con i seguenti comandi.

```
MEAS:VOLT:DC?    % misura tensione DC range e risoluzione automatica
MEAS:VOLT:AC?    % misura tensione AC
MEAS:CURR:DC?    % misura corrente DC
MEAS:CURR:AC?    % misura corrente AC
MEAS:RES?        % misura resistenza
MEAS:FREQ?       % misura frequenza
MEAS:PER?        % misura periodo
MEAS:CONT?       % misura connessione attiva o no -beep
```

5.2.3. Data Acquisition / Switch Unit Agilent 34970A

Lo strumento 34970A combina uno strumento di alta precisione con connessioni flessibili per test di sistemi. Vi sono diversi moduli, introducibili negli slot dello strumento che permettono l'acquisizione di segnali. La combinazione di acquisizione dati e moduli di switching creano uno strumento versatile, utile per delle stazioni di misura.

Invece di utilizzare il multimetro descritto precedentemente, ho provato ad eseguire delle misure tramite questo strumento che permette di effettuare delle misure contemporaneamente.

In seguito alcuni comandi per pilotare lo strumento.

ROUT:SCAN (@101:110)	% seleziona canali da misurare slot 100 canali 1-10
MEAS:VOLT:DC? (@101)	% misura tensione DC del canale 101
MEAS:RES? (@102:104)	% misura resistenza del canale 102, 103 e 104
MEAS:CURR:AC? (@105)	% misura corrente AC del canale 105
MEAS:FREQ? (@106)	% misura frequenza del canale 106
MEAS:PER? (@107)	% misura il periodo del canale 107

5.2.4. Carico elettronico HM 8143

Per poter misurare vari punti della caratteristica V-I del generatore fotovoltaico ho collegato un alimentatore con la funzionalità di carico elettronico.

Infatti è possibile programmare lo strumento con un carico che varia secondo quanto programmato. Per generare queste funzioni ho utilizzato i codici seguenti.

ID?	% numero di identificazione – HM8143
STA	% stato in cui si trova lo strumento
TRU:1.23	% modalità tracking – U_1=U_2=1.23V
TRI:1.000	% modalità tracking – I_1=I_2=1°
OP1	% output on – OP0 output off
SU1:3.45	% pone la tensione a 3.45V all'uscita 1
SI2:1.000	% poni la corrente a 1A all'uscita 2
MU2	% misura la tensione all'uscita 2
MI1	% misura la corrente all'uscita 1
% Funzione Arbitrary	
ABT:A10.00_B5.00_52.00_N10	
% 1 s a 10V – 2s a 5V – 20ms a 2V – ripeti il ciclo 10 volte	
RUN	% avvia la funzione Arbitrary
STP	% ferma la funzione Arbitrary

5.2.5. Oscilloscopio HP 54600

Grazie al software VEE è possibile visualizzare dati su un grafico, malgrado questo ho deciso comunque di pilotare un oscilloscopio per monitorare dei segnali variabili nel tempo.

La programmazione di questo strumento è stata un po' più ostica, in seguito una piccola raccolta dei comandi basilari.

```
*RST                                % effettua il reset dello strumento
:TIMEBASE:RANGE 5E-4                % Base del tempo a 50 us/div
:TIMEBASE:DELAY 0                   % Ritardo 0
:TIMEBASE:REFERENCE CENTER          % Referenza al centro
:CHANNEL1:PROBE X10                 % Sonda 10:1
:CHANNEL1:RANGE 1.6                 % Range verticale a 1.6 V scala intera
:CHANNEL1:OFFSET -.4                % Offset a -0.4
:CHANNEL1:COUPLING DC               % Coupling DC
:TRIGGER:MODE NORMAL                % Trigger normale
:TRIGGER:LEVEL -.4                  % Trigger level a -0.4
:TRIGGER:SLOPE POSITIVE             % Trigger su fianco positivo
:ACQUIRE:TYPE NORMAL                % Acquisizione normale
:DISPLAY:GRID ON                    % Griglia attiva
```

Per quanto riguarda le scale del tempo e della tensione, il codice riguarda sempre tutta la scala e non vi sono le divisioni tipiche. In seguito delle tabelle per l'utilizzo delle suddivisioni tipiche.

Per la scala delle tensioni vi sono 8 divisioni.

Scala tipica	N° codice
5 V/Div	40
2 V/Div	16
1 V/Div	8
500 mV/Div	4
200 mV/Div	1.6
100 mV/Div	0.8
50 mV/Div	0.4
20 mV/Div	0.16
10 mV/Div	0.08
5 mV/Div	0.04
2 mV/Div	0.016

Tabella 5.2 Scala delle tensioni dell'oscilloscopio

Per la scala del tempo vi sono 10 divisioni.

Scala tipica	N° codice	N°codice
5 s/Div	50.00000000	5.E+01
2 s/Div	20.00000000	2.E+01
1 s/Div	10.00000000	1.E+01
500 ms/Div	5.00000000	5.E+00
200 ms/Div	2.00000000	2.E+00
100 ms/Div	1.00000000	1.E+00
50 ms/Div	0.50000000	5.E-01
20 ms/Div	0.20000000	2.E-01
10 ms/Div	0.10000000	1.E-01
5 ms/Div	0.05000000	5.E-02
2 ms/Div	0.02000000	2.E-02
1 ms/Div	0.01000000	1.E-02
500 µs/Div	0.00500000	5.E-03
200 µs/Div	0.00200000	2.E-03
100 µs/Div	0.00100000	1.E-03
50 µs/Div	0.00050000	5.E-04
20 µs/Div	0.00020000	2.E-04
10 µs/Div	0.00010000	1.E-04
5 µs/Div	0.00005000	5.E-05
2 µs/Div	0.00002000	2.E-05
1 µs/Div	0.00001000	1.E-05
500 ns/Div	0.00000500	5.E-06
200 ns/Div	0.00000200	2.E-06
100 ns/Div	0.00000100	1.E-06
50 ns/Div	0.00000050	5.E-07
20 ns/Div	0.00000020	2.E-07
10 ns/Div	0.00000010	1.E-07
5 ns/Div	0.00000005	5.E-08

Tabella 5.3 Scala del tempo dell'oscilloscopio

Grazie a queste tabelle si potrà consultare la scala che si desidera e si potrà introdurre il valore giusto.

5.2.6. Generatore d'onde HP 33120A

Per generare delle onde ho utilizzato lo strumento HP 33120A.

In seguito alcuni comandi per pilotare lo strumento.

```
%seleziona sinus, frequenza 5kHz, ampiezza 3Vpp, offset -2.5V DC
APPL:SIN 5.0E+3, 3.0, -2.5

FUNC:SHAP SIN          % Seleziona funzione sinus
FREQ 5.0E+3            % Frequenza 5kHz
VOLT 3.0               % Ampiezza 3Vpp
VOLT:OFFS -2.5         % Offset -2.5V DC
```

5.2.7. Cambiare la tensione

Il programma seguente permette di modificare la tensione impostata all'alimentatore, utilizzando alcuni dei blocchi predefiniti. Per esempio con la casella If/Then/Else seleziono la tensione da impostare.

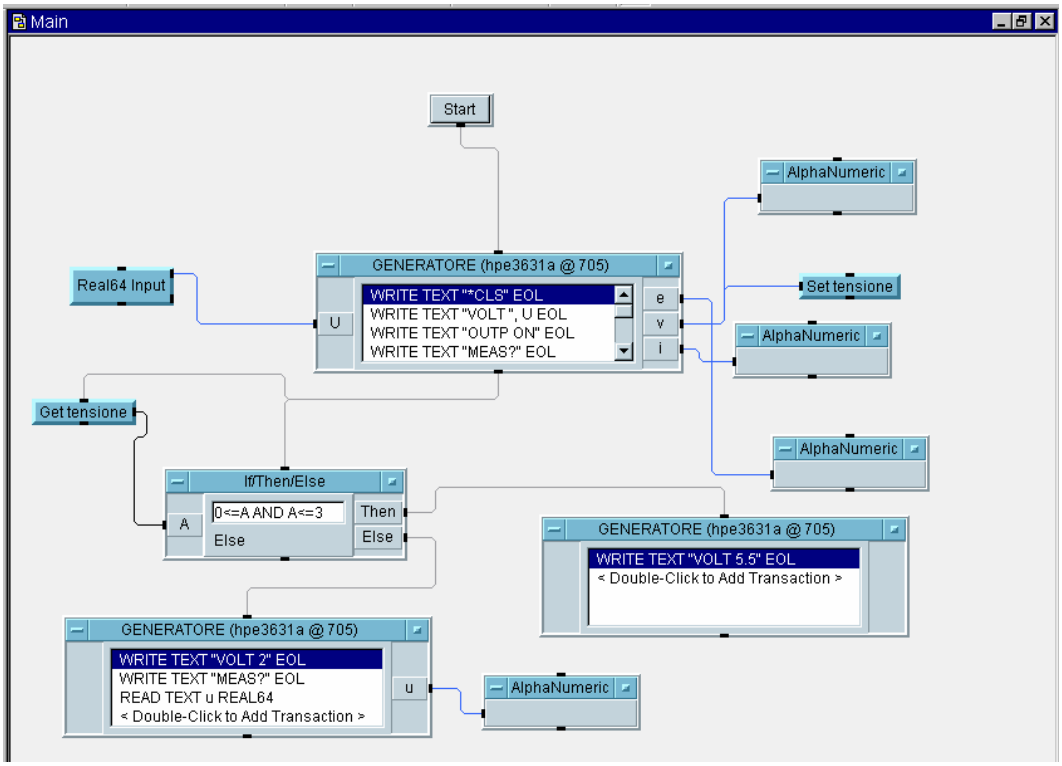

Figura 5.5 Cambiare la tensione

5.2.8. Misura col Multimetro

Col multimetro é possibile effettuare diverse misure, tra cui resistenza, tensione e corrente. In questo esempio ho voluto mostrare come si misura la resistenza, come si imposta il suo range di valore e la sua precisione. Si può modificare il codice a piacimento.

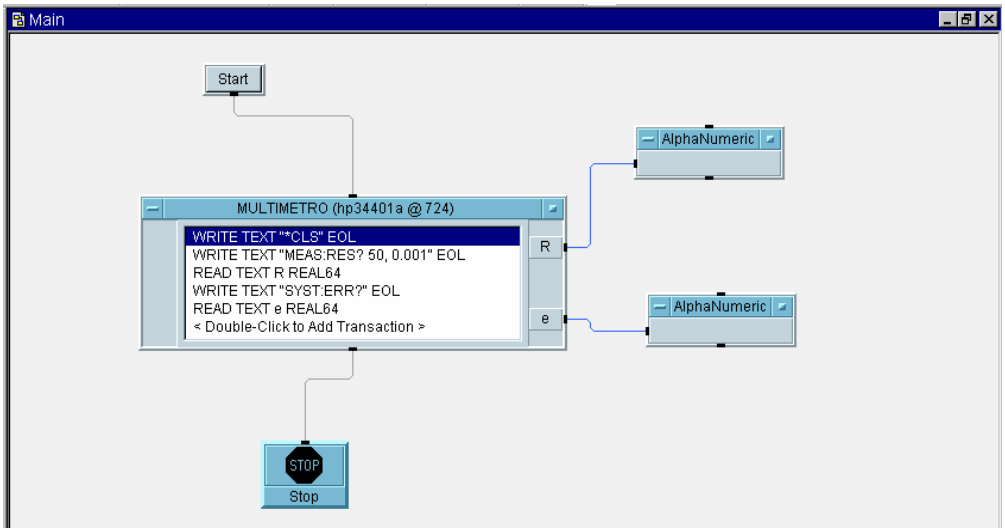

Figura 5.6 Misura col Multimetro

5.2.9. Misura col oscilloscopio

Il codice seguente mostra come effettuare delle misure con l'oscilloscopio e come acquisire delle immagini da esso.

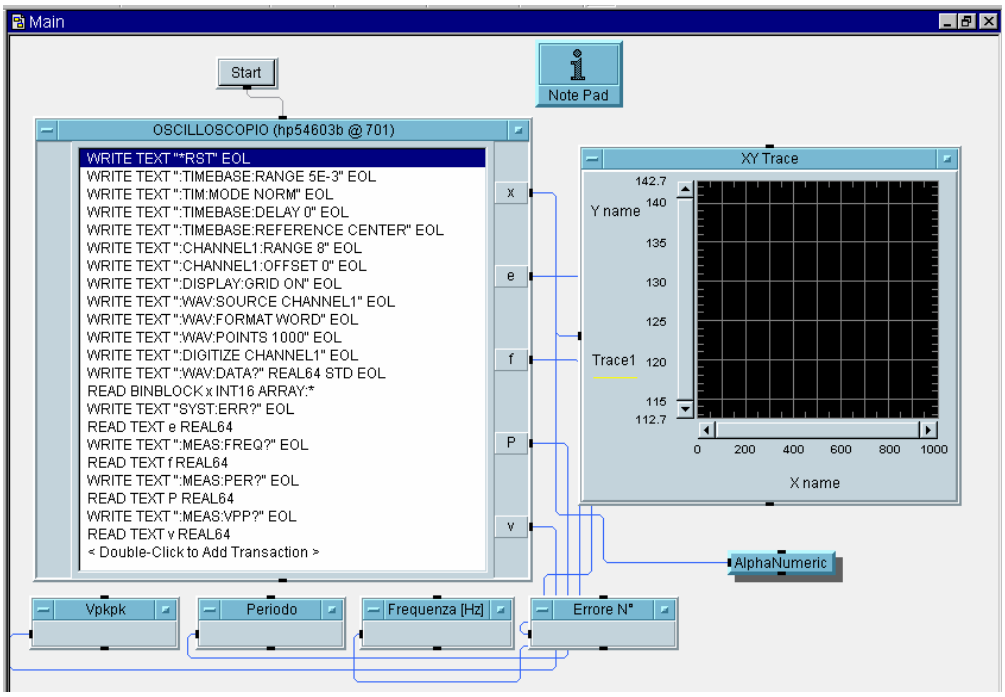

Figura 5.7 Misura col oscilloscopio

5.2.10. Arbitrary function del HM8142

Per testare la Arbitrary function dell'alimentatore HM8142 é stato redatto un codice. La funzione permette di impostare un ciclo ripetitivo in cui si impostano delle tensioni per un periodo temporale. Inoltre é stato collegato un multimetro e un Data Acquisition per verificare i valori di tensione.

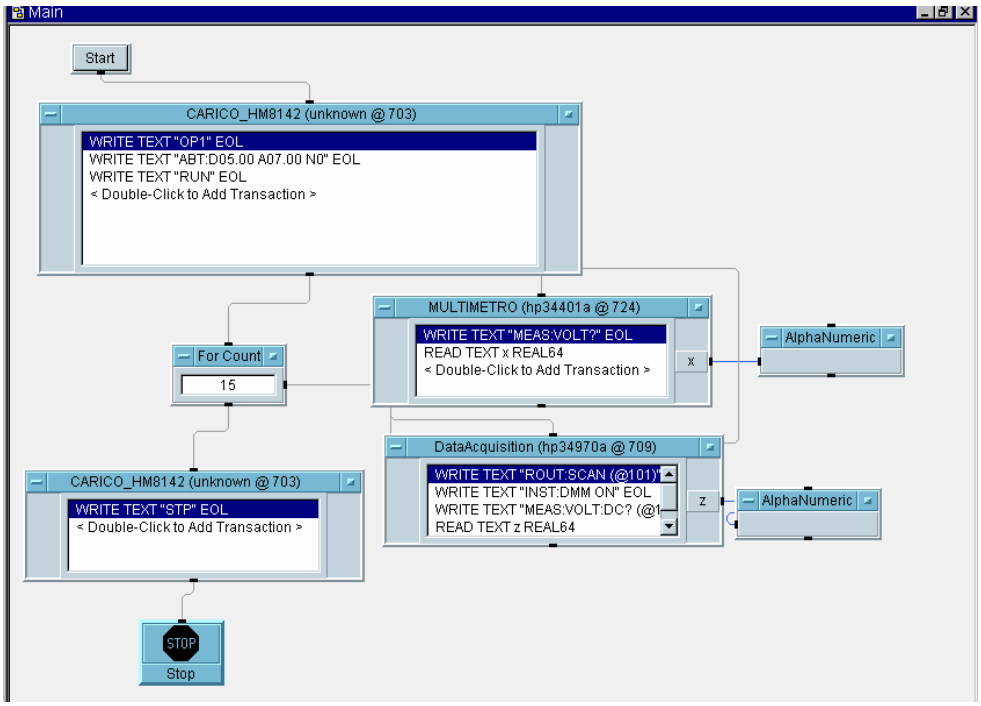

Figura 5.8 Arbitrary function

5.2.11. Oscilloscopio Gould

Per l'oscilloscopio della Gould non ho trovato il manuale del programmatore e ho quindi tentato di utilizzare i codici SCPI. Purtroppo ho trovato solo una stringa che non generava errori, essa é mostrata nella figura 5.9.

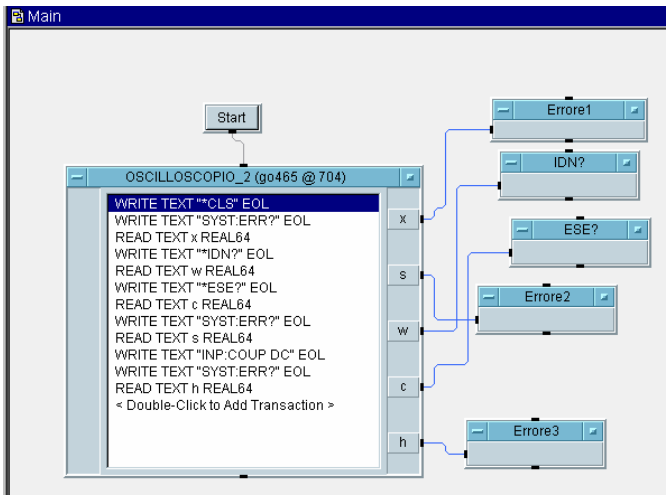

Figura 5.9 Oscilloscopio Gould

6. Realizzazione

6.1. Simulazione di un generatore fotovoltaico con EXCEL

Come primo passo verso l'implementazione in VEE ho simulato un generatore fotovoltaico con EXCEL, in seguito lo schema su cui si basano i calcoli.

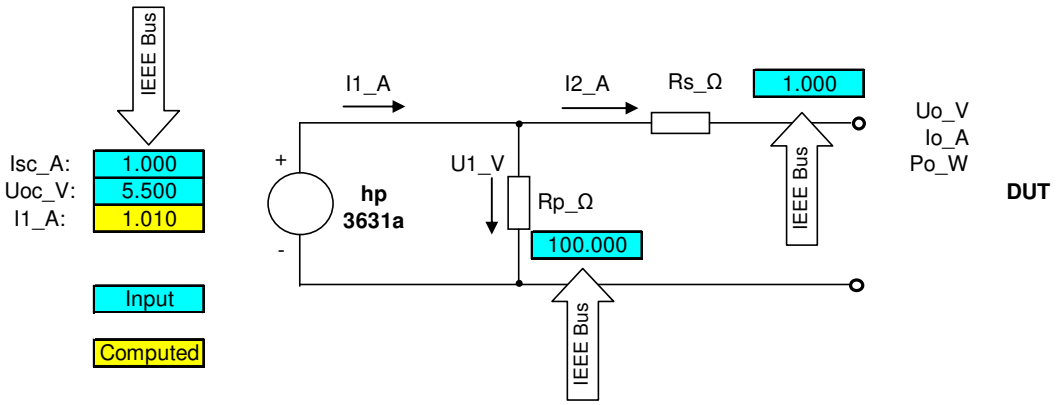

Figura 6.1 Schema di simulazione con EXCEL

Vengono fissati alcuni dati, tra cui la corrente di corto circuito I_{sc}, la tensione di circuito aperto U_{oc}, la resistenza serie R_s e la resistenza parallela R_p.

In base a questi dati si possono calcolare la tensione e la corrente in uscita se vi aggiungiamo un carico.

In seguito vediamo la caratteristica V-I generata dal circuito descritto sopra.

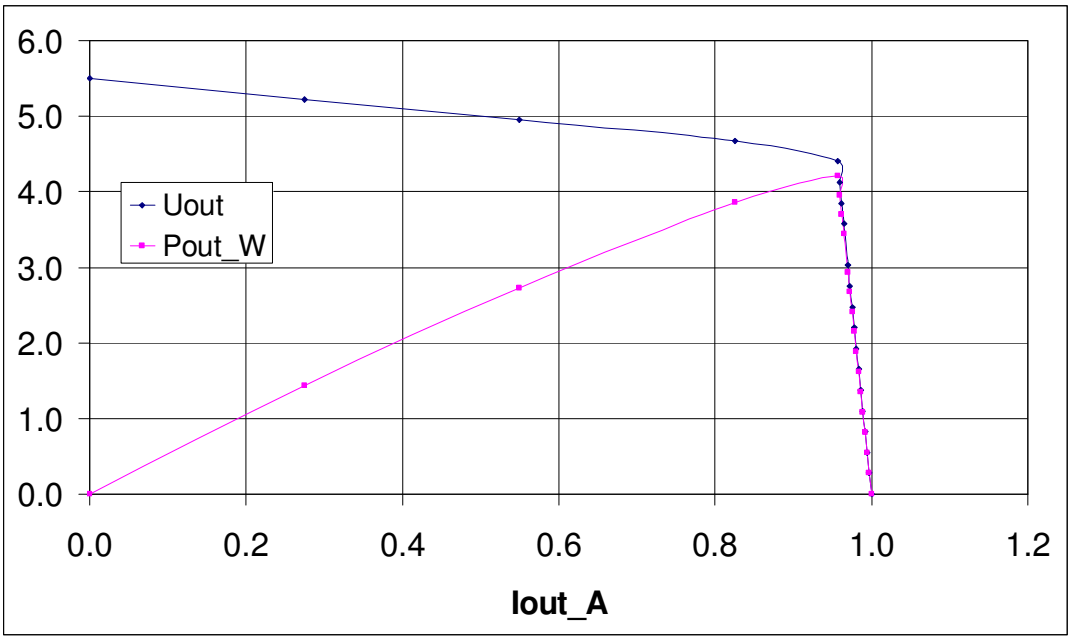

Figura 6.2 Rappresentazione grafica della simulazione EXCEL

La pendenza tra 0 e 0.956 A è determinata dalla resistenza serie e può essere modificata cambiando il valore di R_s.

La pendenza tra 0.956 e 1 A è determinata dalla resistenza parallela e può essere modificata cambiando il valore di R_p.

6.2. Sistema di controllo alimentazione

In seguito ho rappresentato un diagramma di flusso per spiegare più precisamente il sistema di controllo alimentazione.

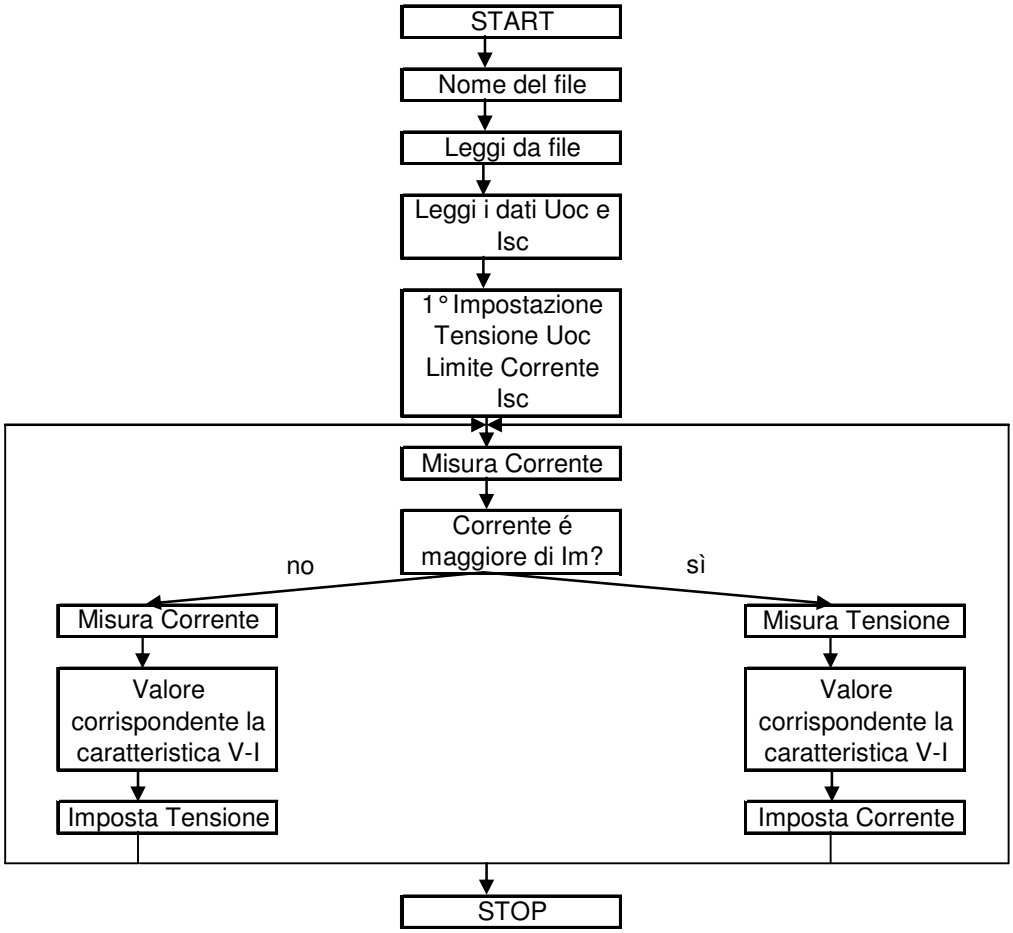

Figura 6.3 Diagramma di flusso

Per la generazione della curva caratteristica V-I di un generatore fotovoltaico ho salvato i suoi valori in una tabella V-I, che in seguito salvo come file di testo con tabulazioni. Sono indispensabili 3 punti per riuscire a generare la curva caratteristica, che sono la tensione di circuito aperto U_{oc}, la corrente di corto circuito I_{sc} e le coordinate del punto dove la potenza è massima. Più punti sono disponibili più la curva caratteristica si avvicinerà ad una caratteristica effettiva di una cella fotovoltaica reale.

Attivo il software VEE e chiedo all'utente di immettere il file da cui prendere i dati, vi è inserito un file di default in caso l'utente non avesse dei dati propri a disposizione. Leggo i dati che corrispondono alla tensione di circuito aperto U_{oc} e la corrente di corto circuito I_{sc} per conoscere le prime impostazioni da effettuare. Piloto l'alimentatore impostando una tensione iniziale pari a U_{oc} e limito la corrente al valore di I_{sc}.

Al generatore viene collegato un carico, quindi misuriamo la corrente che scorre. In base alla corrente viene scelto se impostare la corrente o la tensione. Se la corrente è minore al valore di I_m imposto la tensione, se la corrente è maggiore di I_m imposto la corrente. Per trovare il valore esatto da impostare viene effettuata una regressione lineare tra il punto successivo e quello precedente presenti nella tabella. Questa procedura viene ripetuta continuamente e viene terminata solamente se l'utente pigia sul bottone "Termina" o se i valori di tensione e corrente non variano più. In pratica ho verificato che il programma non termina il suo loop perché vi è sempre una variazione di tensione o corrente, anche se solo di un paio di mV o mA.

Se il carico non varia, la tensione e la corrente si stabilizzano.

Inoltre è stata implementata un'applicazione che permette di salvare i dati misurati, come corrente e tensione, in un file EXCEL.

Dopo aver ottenuto una prima versione funzionante ho voluto aggiungere anche il fattore temperatura. Infatti la curva caratteristica cambia con la variazione di temperatura. Ho quindi dichiarato una costante di temperatura che aggiunge o toglie corrente e/o tensione al valore calcolato tramite regressione lineare. Con questo metodo ho potuto tenere il programma redatto precedentemente, aggiungendo il fattore temperatura. Attualmente ho utilizzato dei valori forniti dal professore per calcolare la variazione, essi sono:

$$T_1 = 150°C$$
$$T_2 = -80°C$$
$$V_{OC150°} = 5.625V$$
$$V_{OC-80°} = 18.3V$$
$$I_{SC150°} = 86.5\,mA$$
$$I_{SC-80°} = 74.54\,mA$$

Si può notare che con l'aumento della temperatura la corrente aumenta mentre la tensione diminuisce. Otteniamo quindi le formule seguenti.

$$\boxed{\alpha_U = \frac{|V_{OC150°} - V_{OC-80°}|}{|T_1| + |T_2| + 1}}$$

$$\boxed{\alpha_I = \frac{|I_{SC150°} - I_{SC-80°}|}{|T_1| + |T_2| + 1}}$$

Il valore di tensione o corrente da aggiungere é quindi il seguente.

$$\boxed{\Delta U = (-\alpha_U)T\frac{I_m - I_x}{I_m}}$$

$$\boxed{\Delta I = \alpha_I T\frac{U_m - U_x}{U_m}}$$

Dove I_M e U_M rappresentano il punto dove la potenza ottenibile è massima e I_x e U_x sono la corrente e la tensione misurate ai capi delle boccole dell'alimentatore.

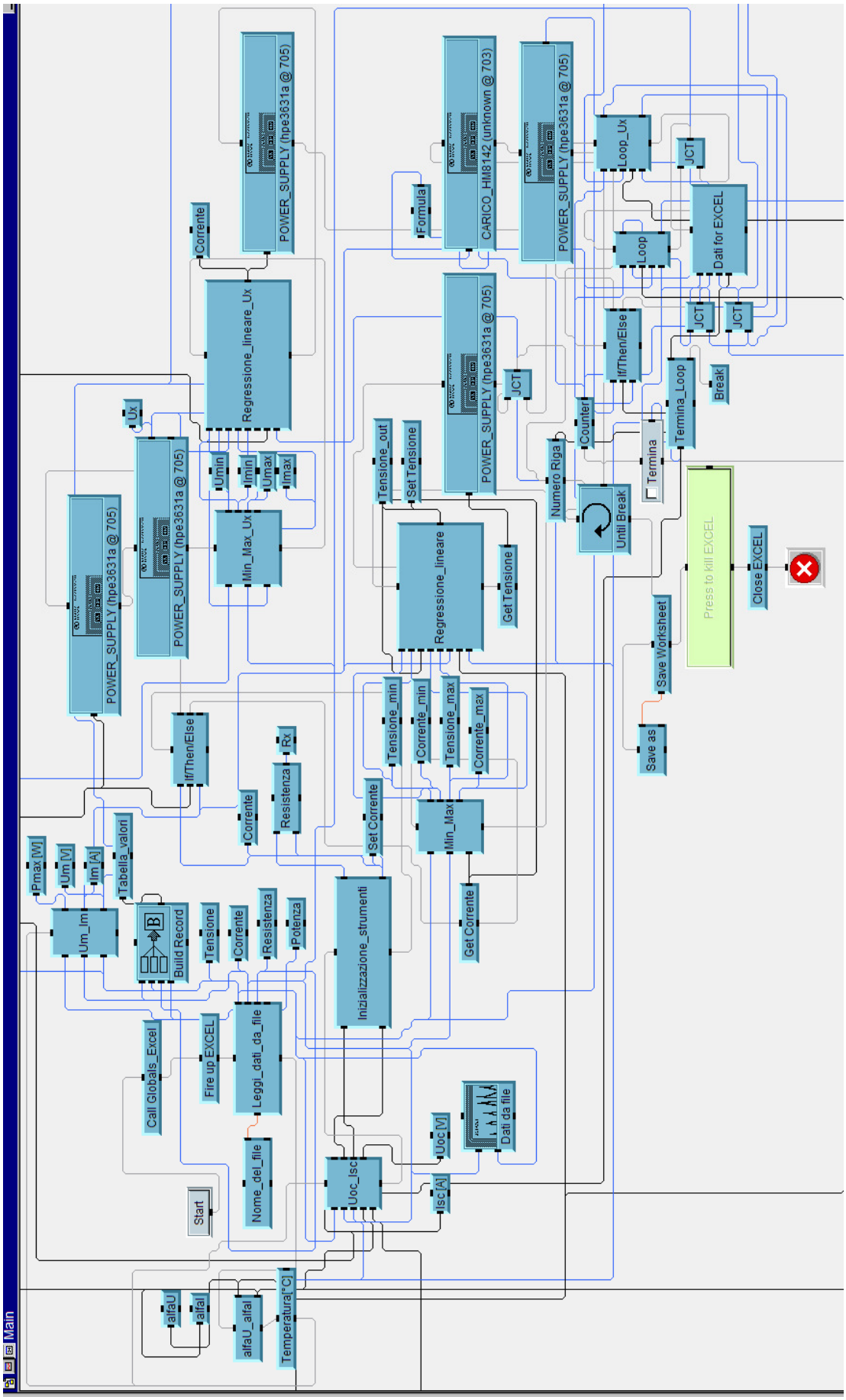

Figura 6.4 Main

La figura 6.4 rappresenta il programma principale "Main" e vi sono dei sottoblocchi che eseguono delle funzioni definite. Il software permette di fare questo tipo di costruzione a blocchi ed è molto utile per non perdere la padronanza del programma aumentando gli elementi utilizzati. In seguito spiegerò i sotto programmi che non sono visibili dalla figura precedente.

Inizialmente leggo i dati dal file chiedendo all'utente di immettere il nome del file (File Name), in caso l'utente non è in possesso di dati verrà caricato un file di default (Documenti\test_2.txt). A questo punto il blocchetto (From File) comincierà a leggere i dati di tensione, di corrente, delle resistenze e della potenza e li salverà in un array x, y, z e w. La lettura verrà terminata quando si raggiungerà la fine del file (EOF).

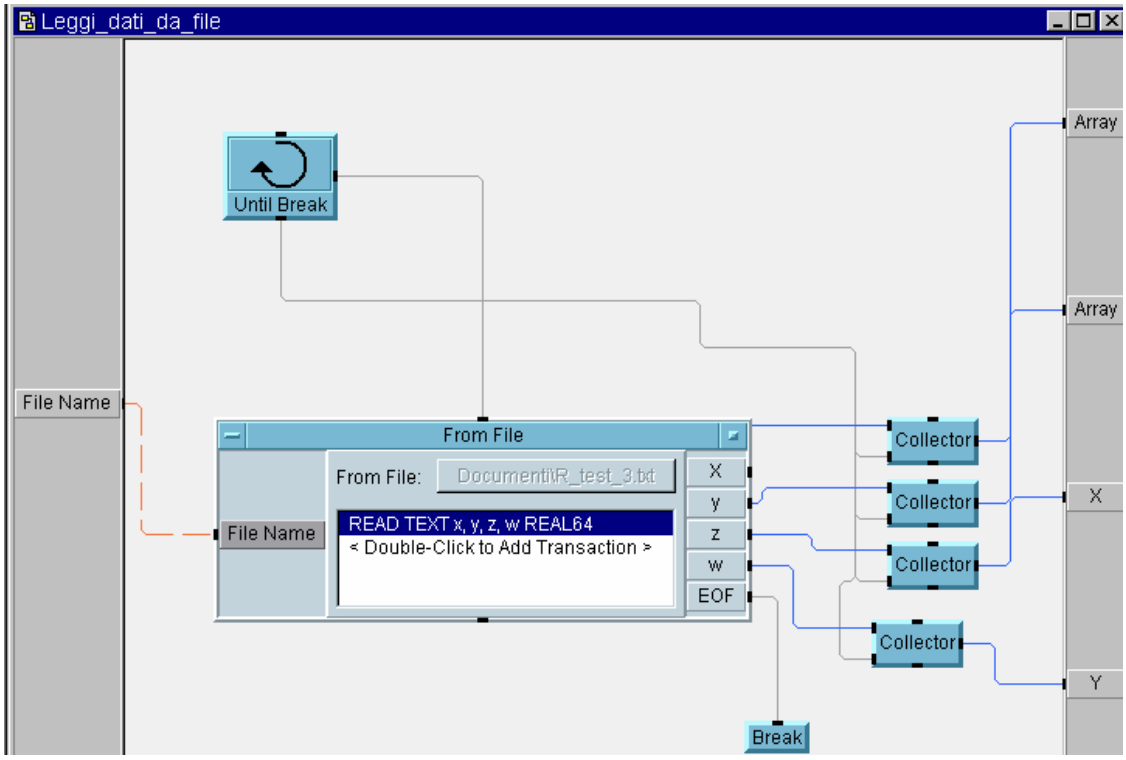

Figura 6.5 Leggi dati da file

Per utilizzare gli strumenti è necessaria una prima inizializzazione, che permette di impostare le funzioni base che lo strumento dovrà eseguire durante l'esecuzione del codice.

In questo programma ho utilizzato due alimentatori, l'HP E3631A si occupa di fornire delle tensioni e delle correnti simili ad un generatore fotovoltaico e l'HM8142 agisce come carico elettronico.

Dalla figura 6.6 si nota che vengono attivate le uscite del carico elettronico; poi l'alimentatore viene impostato con la tensione di circuito aperto U_{oc} e con il limite di corrente I_{sc}. In seguito si misura la tensione e la corrente alle boccole dell'alimentatore, questa funzione è già integrata nell'alimentatore, non è quindi necessario utilizzare altri strumenti.

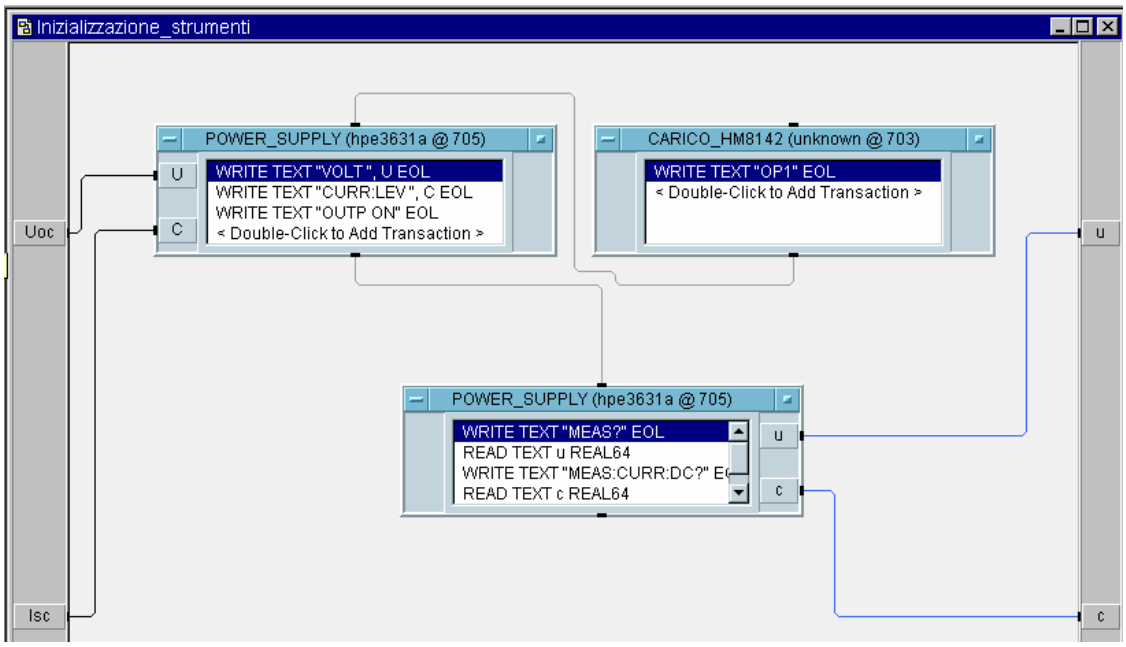

Figura 6.6 Inizializzazione strumenti

Dato che introduco anche il fattore di temperatura ho dovuto modificare le tensioni e le correnti in base ad esso. Il programma non ha subito dei cambiamenti, ma viene aggiunto o tolto un valore di tensione o corrente. La figura 6.7 visualizza dei valori di tensione e corrente ad una certa temperatura, con essi ho calcolato la variazione di tensione e corrente per 1°C, quindi basta moltiplicare la temperatura desiderata per questo valore, alfaI o alfaU.

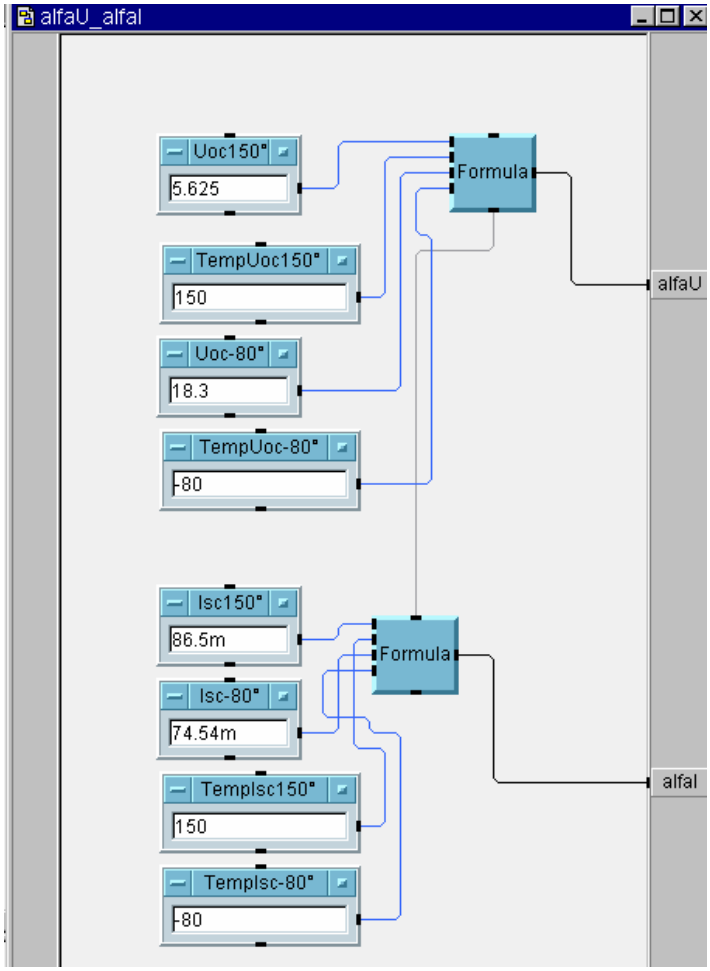

Figura 6.7 Costante di temperatura

Per impostare la tensione di circuito aperto U_{oc} e la corrente di corto circuito I_{sc} leggo da tabella il valore massimo di tensione e corrente per poter effettuare l'inizializzazione degli strumenti. Inoltre se ho una temperatura diversa da 0°C viene aggiunta o sottratta una determinata tensione o corrente.

Per quando riguarda il punto tensione-corrente dove la potenza massima, è importante sottolineare che esso non varia con la temperatura; nel blocchetto 6.9 non viene quindi aggiunto il fattore temperatura. Visualizzo il valore di corrente, tensione e potenza di questo punto per un controllo e per riutilizzarlo per decidere che metodo utilizzare.

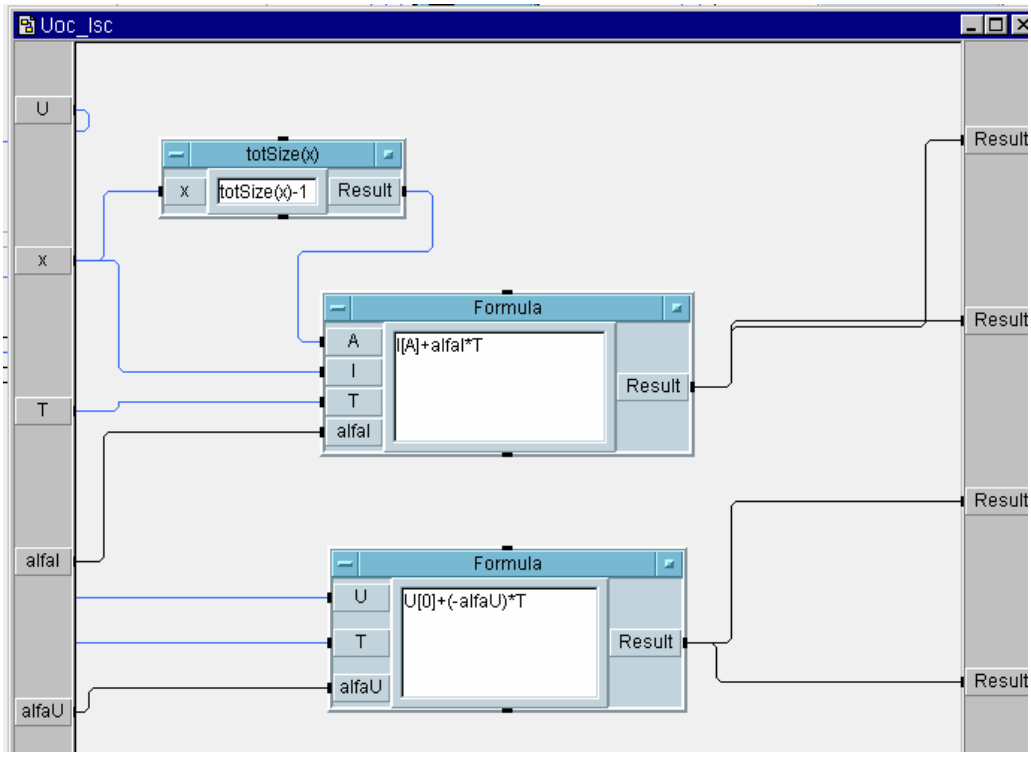

Figura 6.8 Uoc Isc

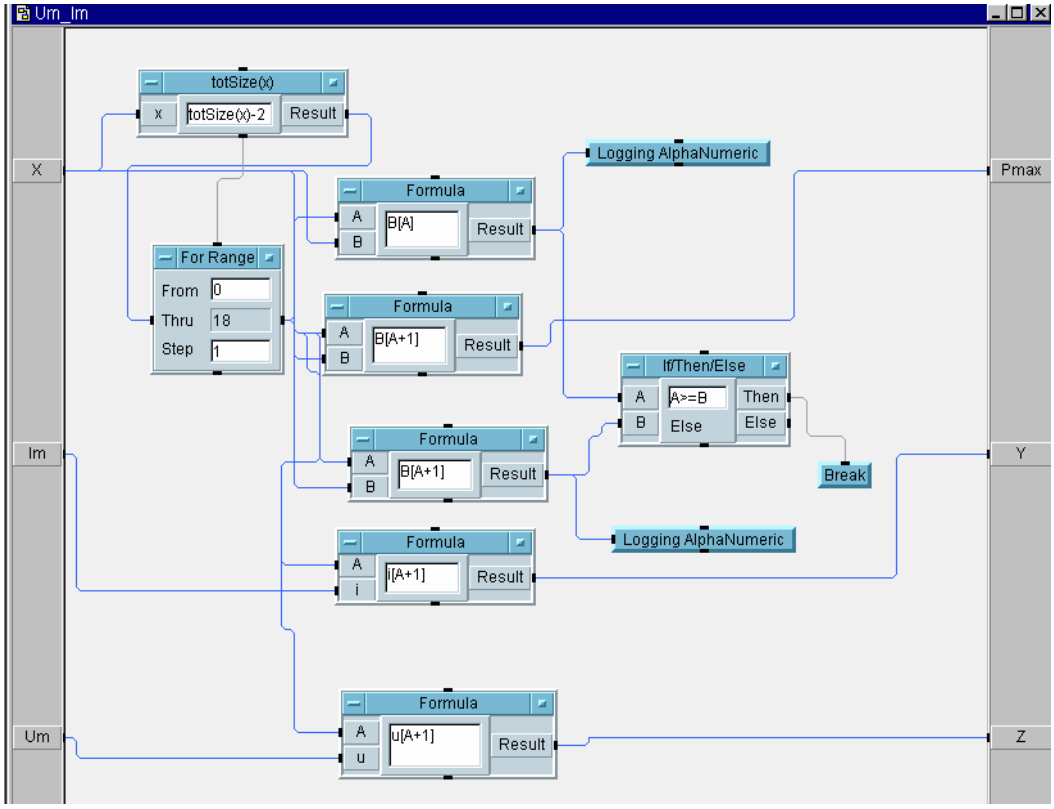

Figura 6.9 Um Im

A questo punto viene effettuata una prima misura della corrente per valutare che metodo utilizzare, vedi figura 6.10, quindi se la $0 \leq I \leq I_m$ misuro la corrente e imposto la tensione o se $I_m < I \leq I_{sc}$ misuro la tensione e imposto la corrente.

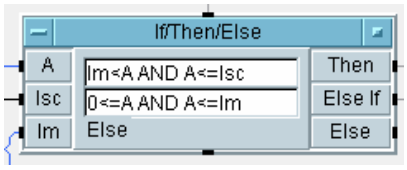

Figura 6.10 Metodo da utilizzare

I due metodi sono stati implementati con la stessa forma, l'unico cambiamento è rappresentata dalla corrente e dalla tensione, o si misura la corrente e si imposta la tensione o si misura la tensione e si imposta la corrente.

Metodo 1: misuro la corrente e imposto la tensione

Dato che i dati letti da file sono dei punti e non una funzione può capitare che per una certa corrente non vi sia il valore di tensione rispettivo, per questo motivo ho aggiunto il blocco Min Max. Questo blocchetto rileva l'intervallo in cui si trova la corrente e determina i punti corrente – tensione più vicini alla misura.

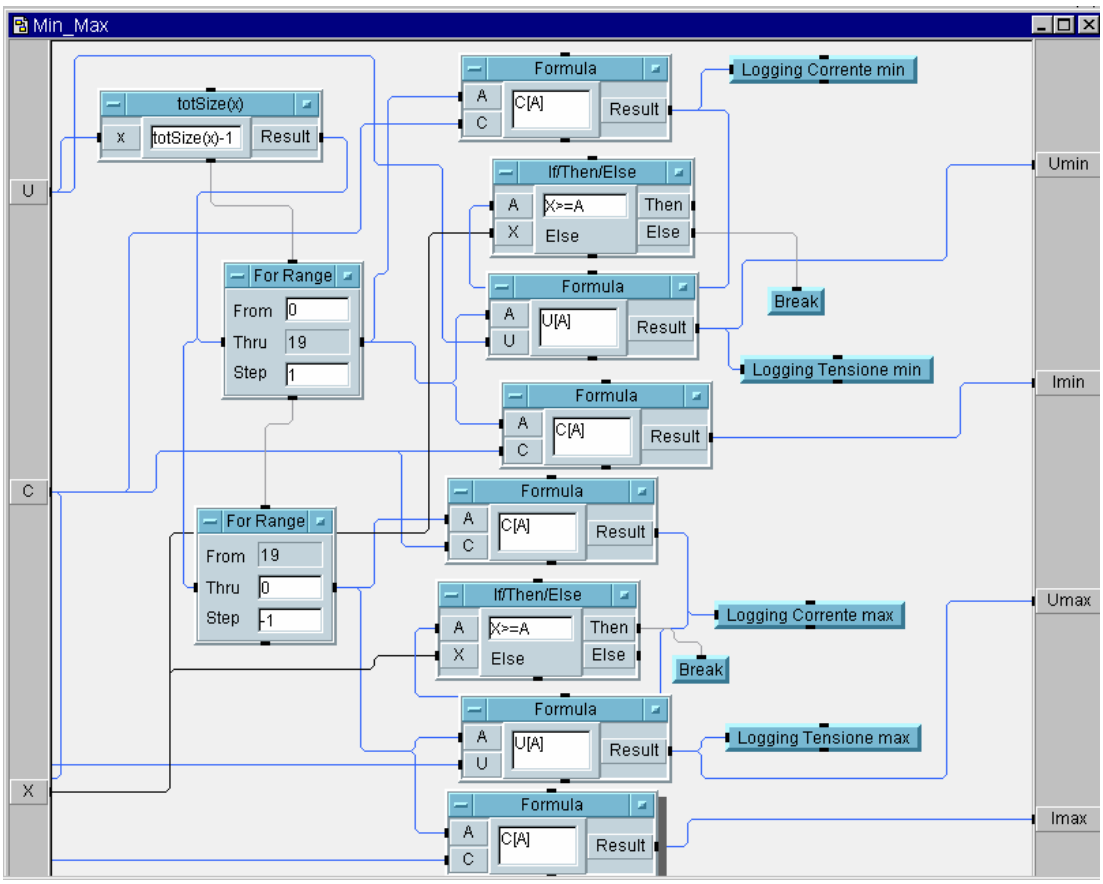

Figura 6.11 Min Max

Ottenendo l'intervallo in cui si trova la corrente richiesta è possibile effettuare una regressione lineare per ottenere la tensione da impostare nell'alimentatore. La formula della regressione lineare è pari a $U_x = -\frac{\Delta U}{\Delta I}(I_x - I_{\min}) + U_{\max}$ dove $\Delta U = U_{\max} - U_{\min}$ e $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$, grazie ad una rappresentazione grafica è più semplice comprendere la dipendenza delle variabili.

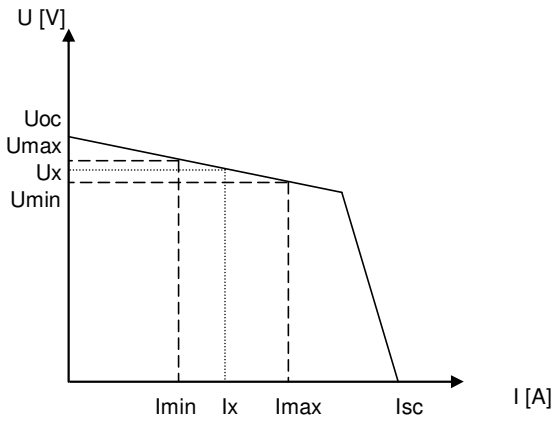

Figura 6.12 Grafico regressione lineare

Dopo aver trovato il valore di U_x si aggiunge o toglie il valore di tensione se la temperatura di discosta da 0°C.

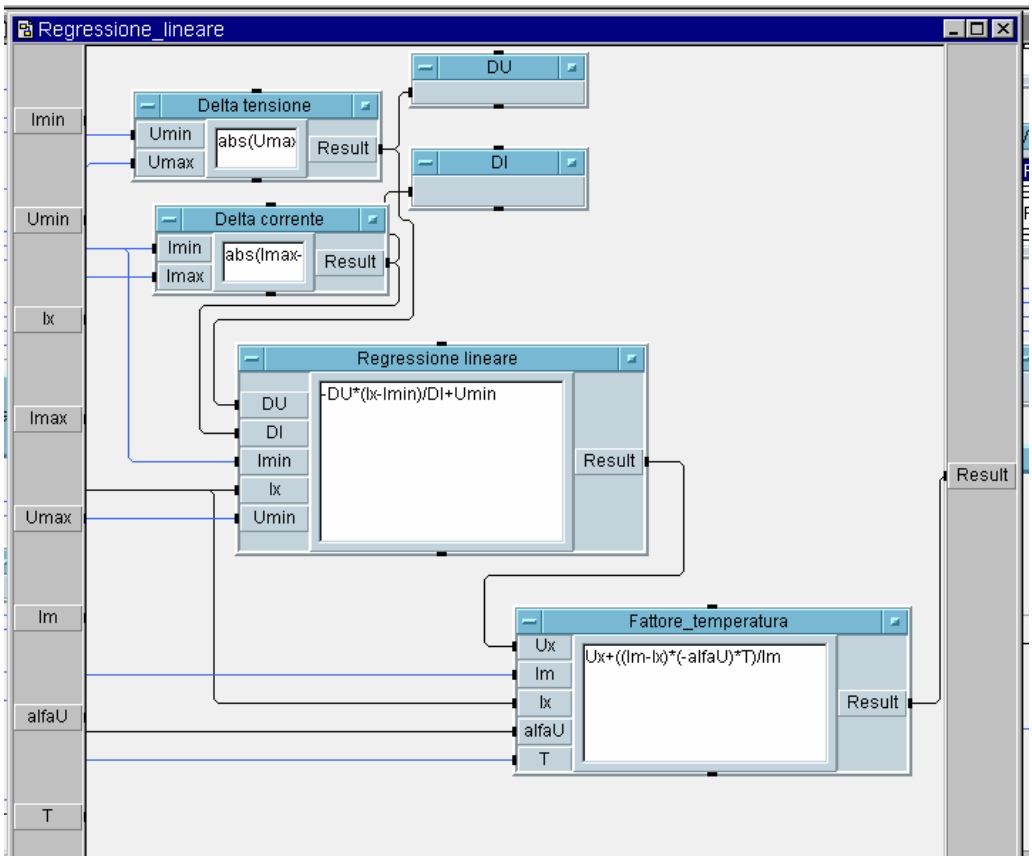

Figura 6.13 Regressione lineare

Il valore di tensione trovato viene impostato come tensione all'alimentatore.

A questo punto viene attivato un loop continuo che misura la corrente e calcola il valore di tensione corrispondente, che viene impostato all'alimentatore.

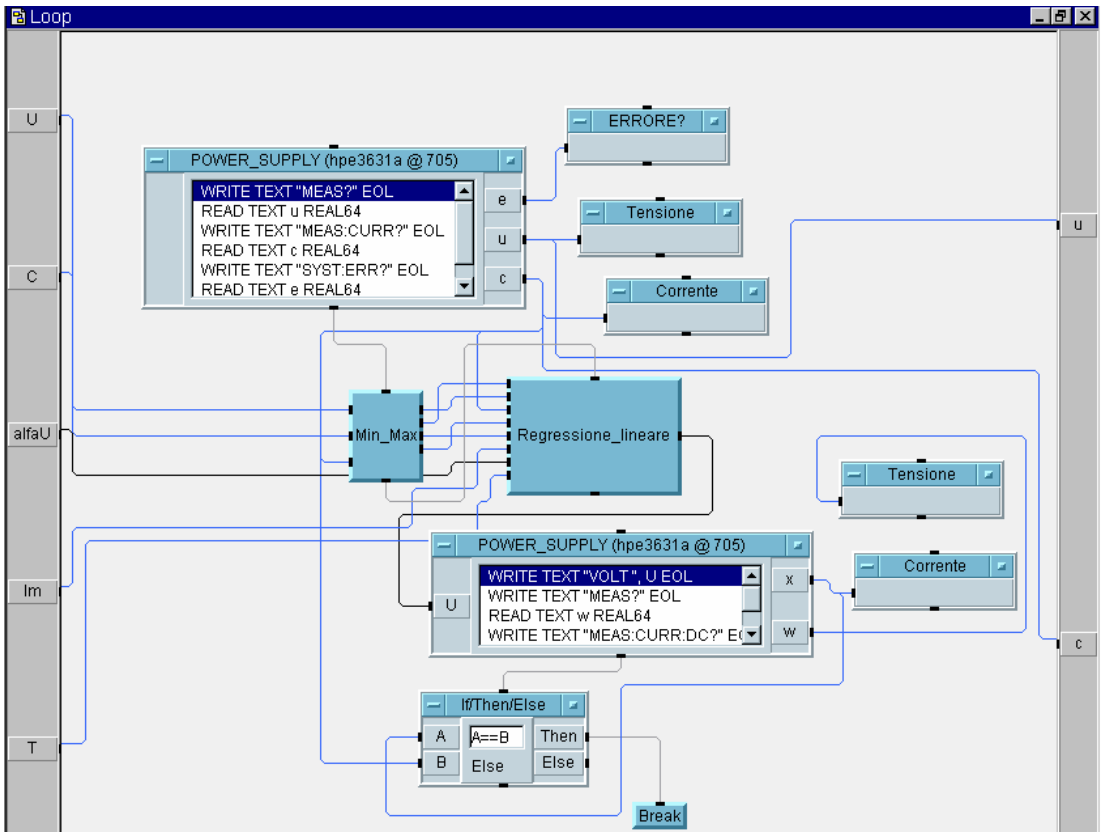

Figura 6.14 Loop

Dopo ogni ciclo viene controllato il valore di corrente per sapere se cambiare metodo.

Metodo 2: misuro la tensione e imposto la corrente

Il metodo 2 é stato implementato allo stesso modo del metodo 1.Dopo aver misurato una corrente dell'alimentatore superiore a I_m, si passa all'ecuzione del blocchetto visualizzato in figura 6.15.

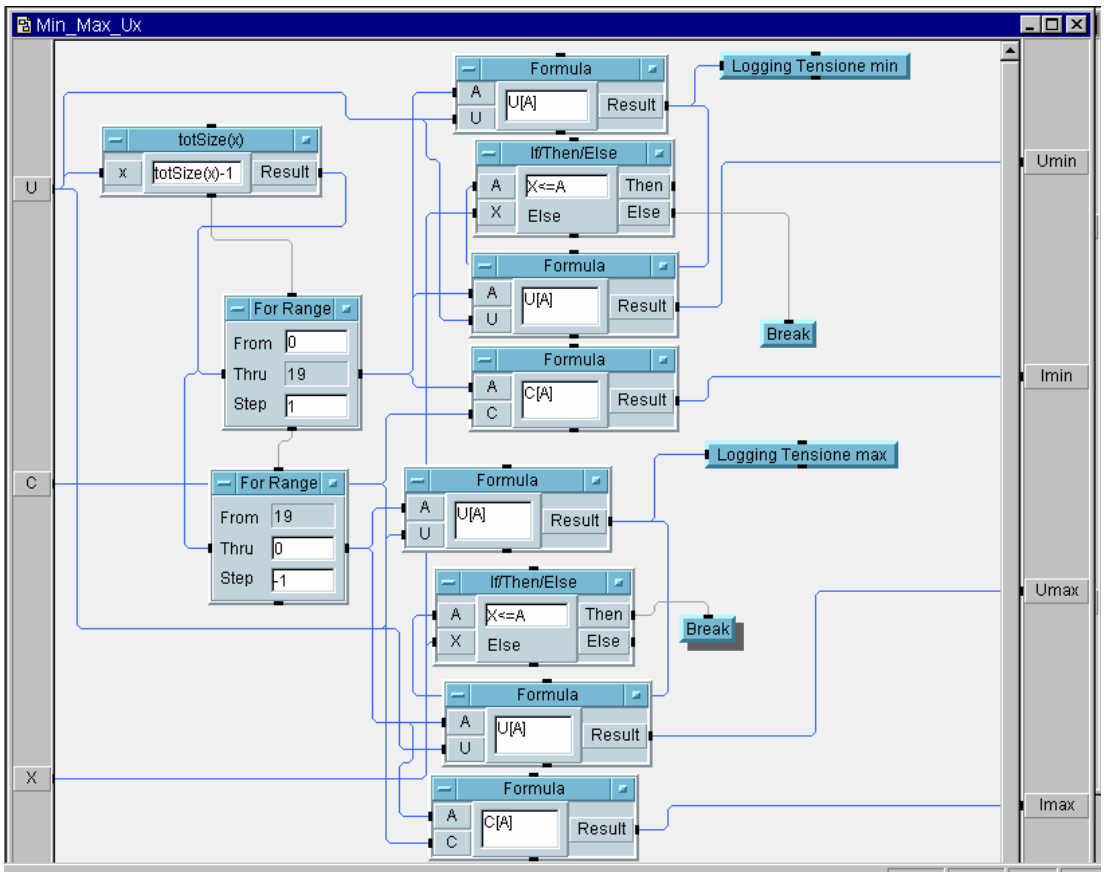

Figura 6.15 Min Max Ux

Per la tensione Ux misurata vengono rilevati i punti tensione –corrente più vicini alla misura per poter effettuare la regressione lineare.

Per quanto riguarda la regressione lineare le formule variano un po' visto che le variabili cambiano.

Per trovare il valore di corrente I_x vale la formula seguente $I_x = -\frac{\Delta I}{\Delta U}(U_x - U_{\min}) + I_{\max}$, dove $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$ e $\Delta U = U_{\max} - U_{\min}$.

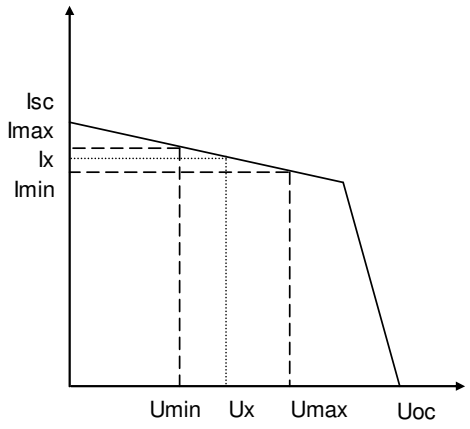

Figura 6.16 Grafico regressione lineare Ux

Al valore Ix trovato viene quindi aggiunto il fattore temperature ed impostato come corrente all'alimentatore.

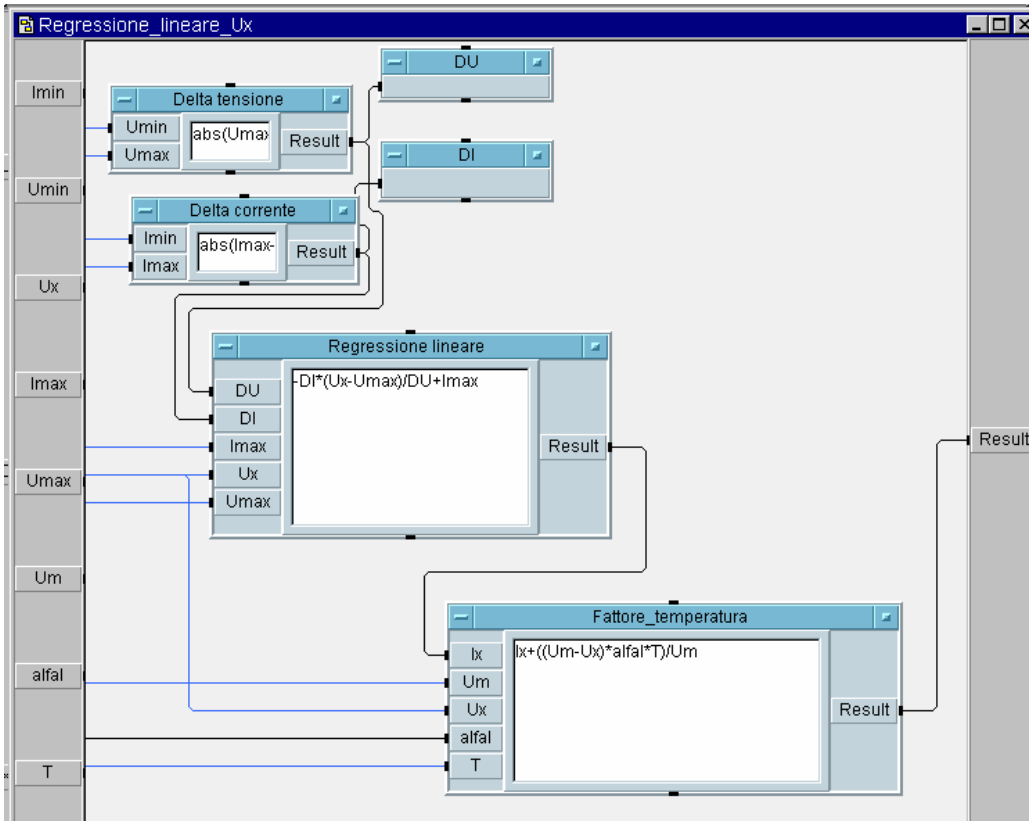

Figura 6.17 Regressione lineare Ux

Nella figura 6.17 si può notare i due blocchi che si occupano del calcolo della regressione lineare e del fattore temperatura.

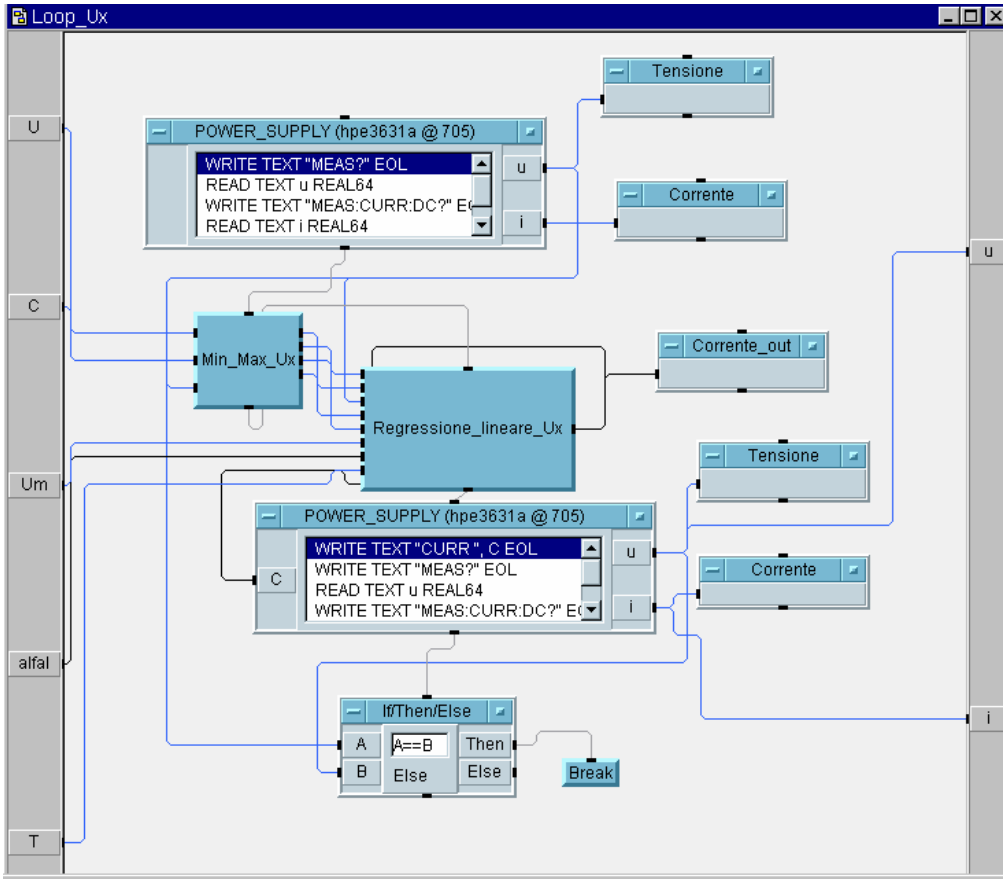

Figura 6.18 Loop Ux

Nella figura 6.18 é stato introdotto un blocchetto per interrompere il ciclo quando la tensione si stabilizza ad un valore. In pratica posso affermare che il ciclo non viene terminato, perchè la tensione varia sempre anche se solo di un paio di mV.

Per poter utilizzare l'applicazione per salvare i dati in un file EXCEL è importante seguire i passi descritti successivamente.

Innanzitutto bisogna dichiarare delle variabili globali, come book, sheet, app e ChartRange, che sono necessari per le impostazioni base di EXCEL.

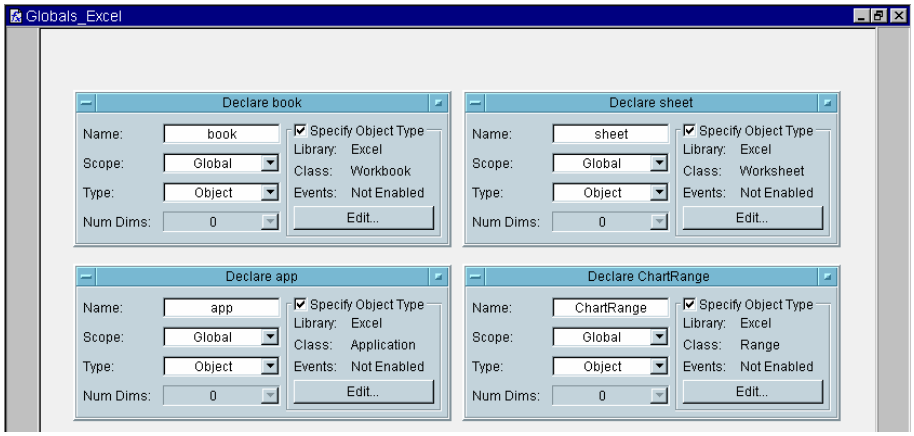

Figura 6.19 Variabili globali EXCEL

A questo punto il programma apre un file EXCEL nuovo, lo rende visibile, attiva un foglio di lavoro e riserva un range per un grafico.

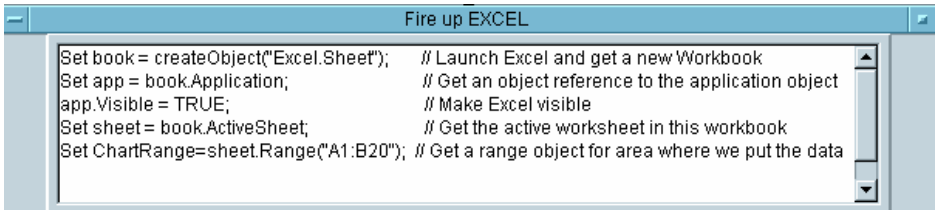

Figura 6.20 Apertura file EXCEL

Nel nostro loop ogni volta che avviene una misura, la salviamo in una cella del foglio EXCEL, la tensione nella colonna 1 e la corrente nella colonna 2. Per terminare il ciclo si deve attivare la casella "Termina", visibile nella figura 6.21. Quando essa viene attivata comincia la fase di salvataggio file e chisura del programma EXCEL.

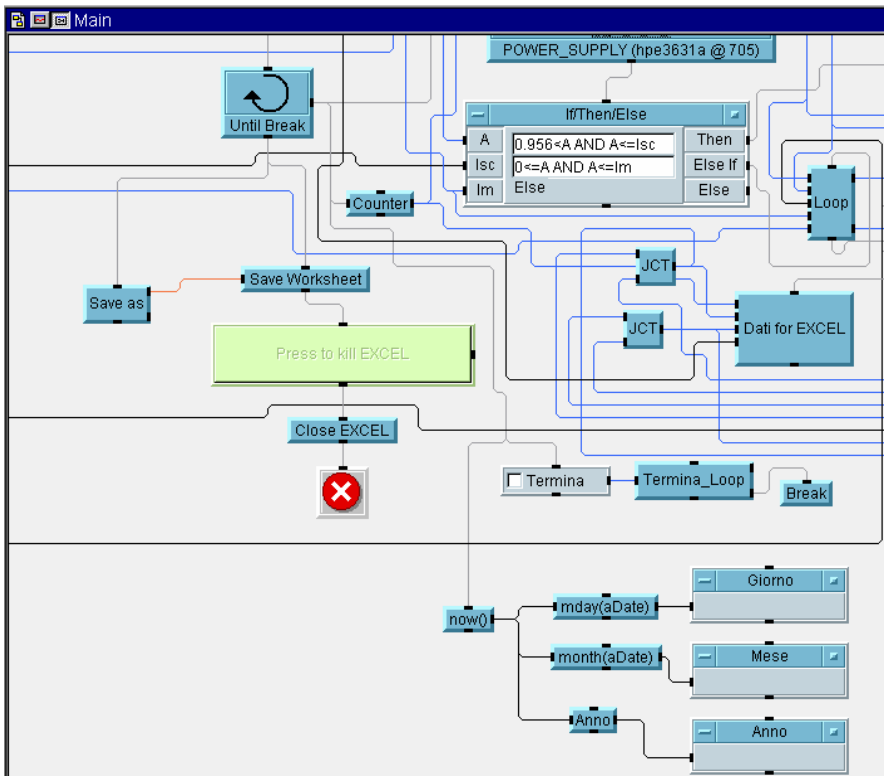

Figura 6.21 Termina file EXCEL

Dopo che il ciclo é terminato, il programma chiederà all'utente di immettere un nome per il file EXCEL, verrà quindi salvato il file con il nome immesso precedentemente e verrà chiuso il file.

Il programma verrà terminato.

6.3. Pannello utente

Il programma descritto precedentemente verrà "nascosto" agli occhi dell'utente, che invece interagirà con un pannello speciale. Nella figura seguente è mostrato il pannello utente aggiunto al codice redatto in precedenza. In genere il programmatore termina la codifica ed in seguito evidenzia i blocchi che vuole mostrare all'utente.

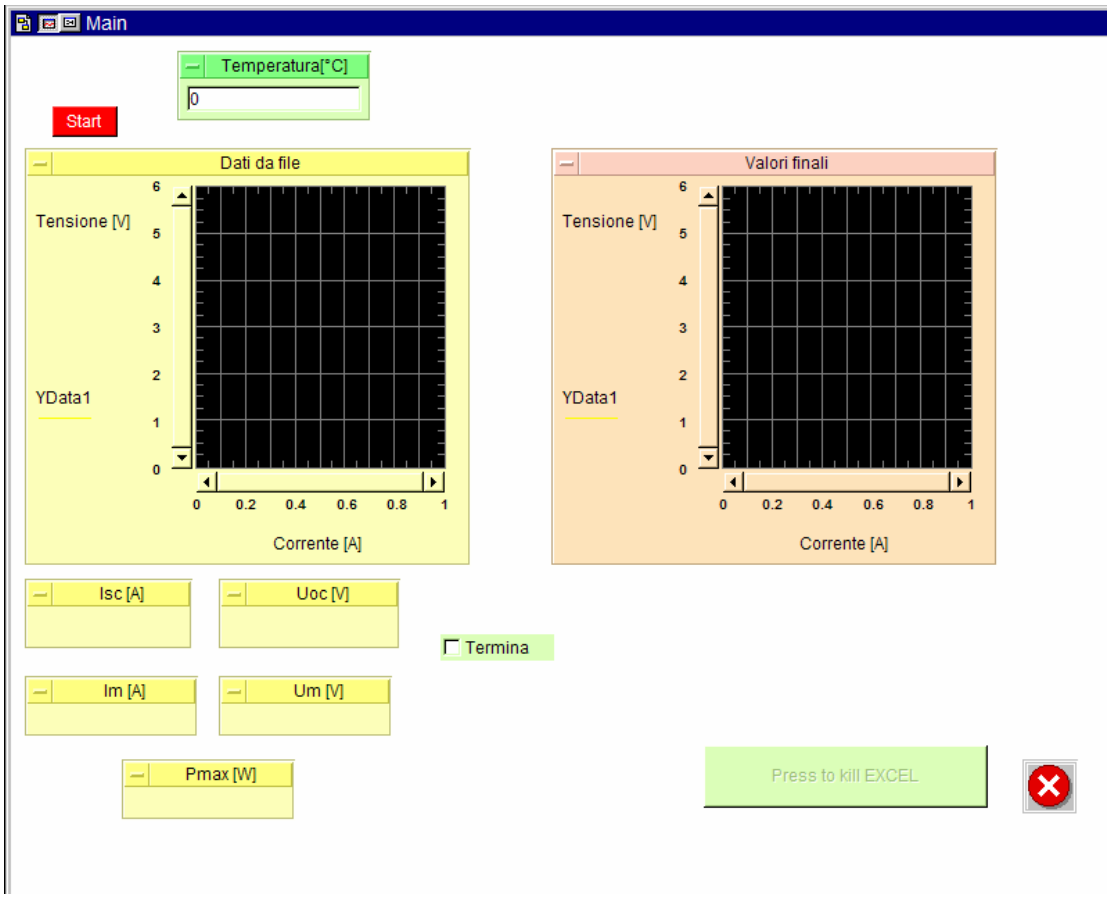

Figura 6.22 Pannello utente

Nella figura 6.22 sono visibili i blocchi che ho deciso di mostrare all'utente, essi riguardano i dati del file, la temperatura, i valori finali misurati e l'icona per terminare il programma. Ho utilizzato diversi colori per dimostrare che si può personalizzare il pannello a seconda dei gusti, addirittura è possibile aggiungere delle foto.

6.4. Sistema di controllo alimentazione 2

Il programma "sistema di controllo alimentazione" è stato modificato per ottenere un'altra soluzione possibile. La modifica è la seguente: misuro la tensione e la corrente, con questi dati calcolo la resistenza ed in base ad essa decido che tensione impostare. L'utente può quindi scegliere con che codice lavorare.

Non spiegerò in dettaglio il programma in quanto sarebbe una ripetizione. Ma vorrei sottolineare un problema di questo codice; quando esso è in esecuzione e l'utente effettua un corto sull'alimentazione, allora l'alimentatore pone la tensione e la corrente a 0. Per risolvere questo problema basta fermare il programma, togliere il corto circuito e far ripartire il programma.

Nella figura 6.23 è rappresentato il diagramma di flusso di questo programma e nella figura seguente il "Main".

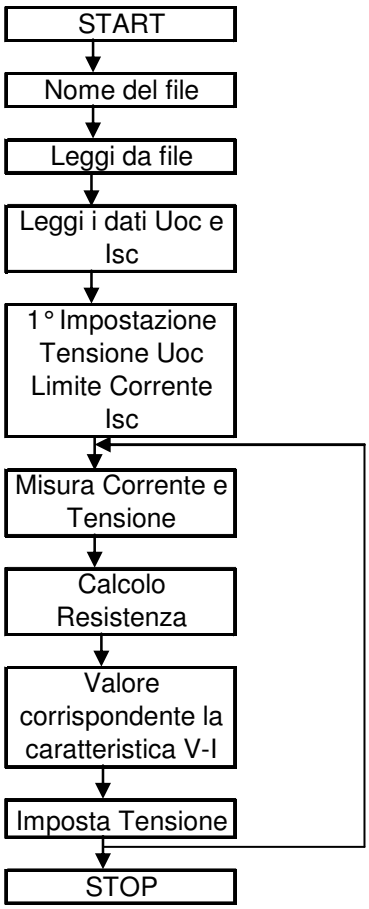

Figura 6.23 Diagramma di flusso 2

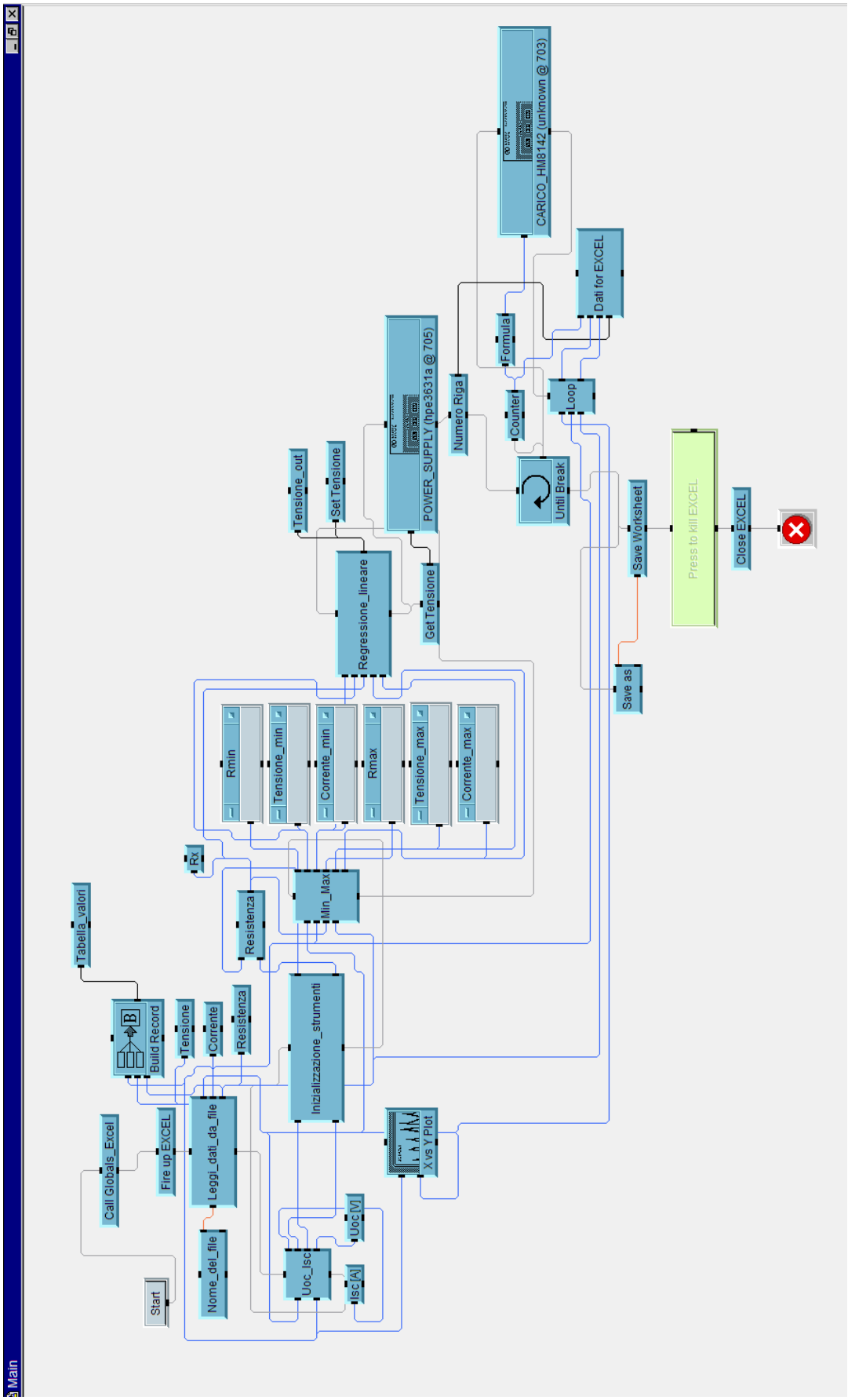

Figura 6.24 Main 2

7. Test

Per verificare il funzionamento dei programmi ho effettuato diversi test. Inoltre è interessante sapere quali sono i limiti del sistema e le azioni dell'utente sul sistema. Un esempio può essere il corto circuito sull'alimentatore.

7.1. Variazione del carico con una Culatti

Ho effettuato un test del programma "Sistema completo 3" collegando all'alimentatore una resistenza variabile "Culatti". La resistenza varia da 0 Ω a 40Ω e sopporta una corrente massima di 2A, importante notare che queste resistenze non sono precise.

Il programma legge i dati da file per sapere a che corrente corrisponde una certa tensione. La figura 7.1 rappresenta i dati del file utilizzati per questo test e la figura 7.2 mostra i punti misurati variando la resistenza.

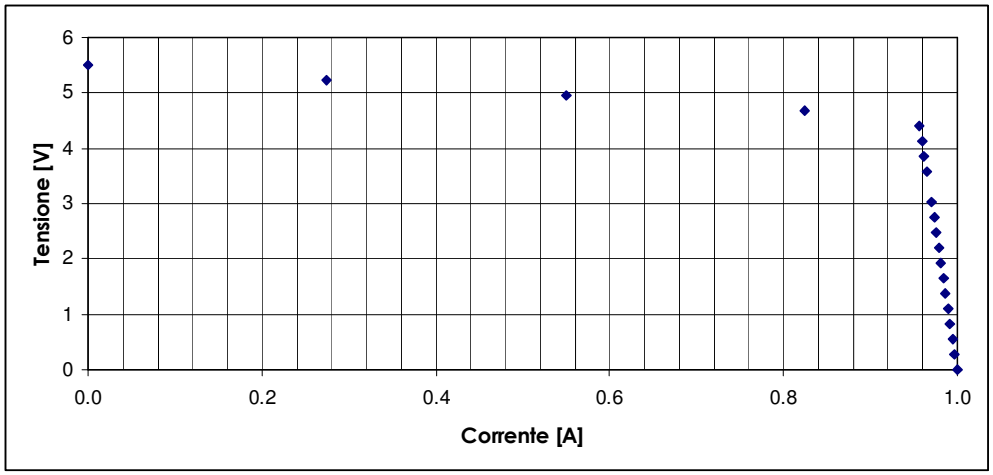

Figura 7.1 Dati da file

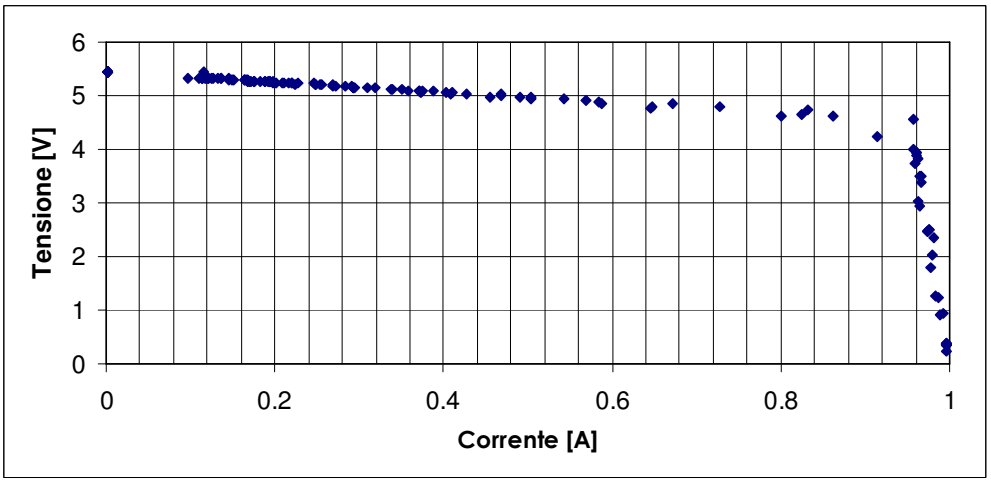

Figura 7.2 Misure del test Culatti

Dalle due figure precedenti si nota che le correnti e le tensioni impostate dall'alimentatore rispecchiano la caratteristica V-I del fotovoltaico tabulato. Vi é un punto misurato che non corrisponde esattamente alla caratteristica, esso si trova nella prossimità del punto di massima potenza. Probabilmente questo fenomeno é dovuto al tempo di reazione dell'alimentatore, dato che in quel punto il programma deve cambiare modalità, da misurare la corrente e impostare la tensione a misurare la tensione e impostare la corrente.

7.2. Utilizzo del carico elettronico

Avendo un carico elettronico a disposizione ho testato lo stesso programma "Sistema completo 3" variando la corrente del carico elettronico. Ho così ottenuto vari punti sulla curva caratteristica V-I, visualizzati in seguito.

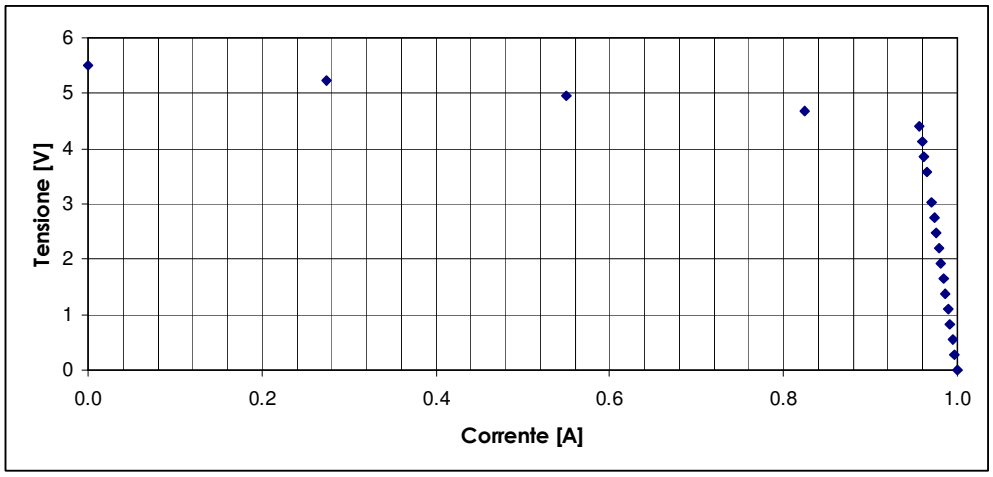

Figura 7.3 Dati da file

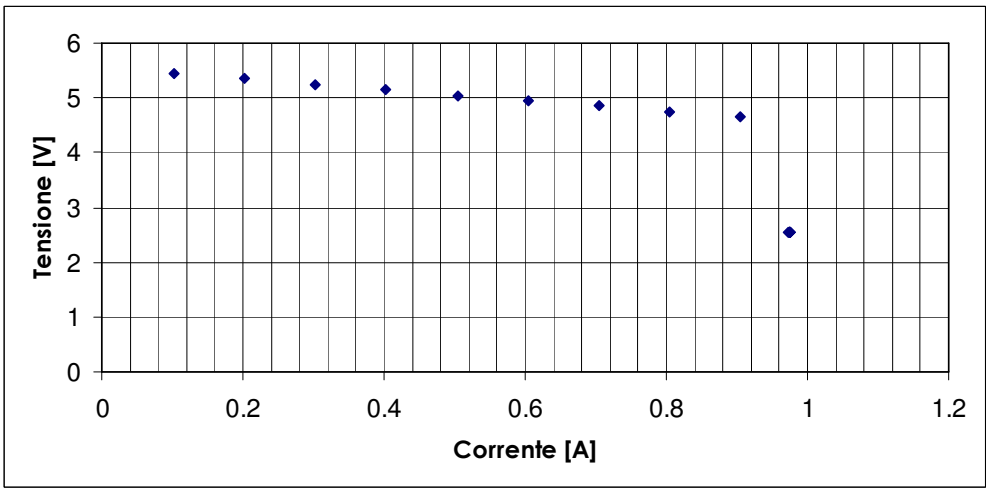

Figura 7.4 Misure del test con carico elettronico

Osservando le figure precedenti possiamo notare che i punti misurati corrispondono alle tensioni ed alle correnti tabulate.

Purtroppo non é stato possibile misurare più punti nell'intervallo $0.956A \leq I \leq 1A$, dove l'alimentatore misura la tensione e imposta la corrente, perchè il carico elettronico viene variato impostando la corrente.

8. CONCLUSIONI

Al termine del progetto posso affermare di aver raggiunto gli obiettivi principali e di essere tuttora interessata agli sviluppi futuri ed all'utilizzo nella pratica del mio lavoro di diploma.

Benchè il programma redatto sia abbastanza complesso, ho cercato di suddividerlo in tante parti per facilitarne la comprensione. Infatti é necessario che un qualsiasi utente non perda troppo tempo nell'apprendere i concetti di programmazione, ma che possa applicarlo per le sue necessità. Nei capitoli precedenti ho cercato di elencare i passi importanti, inoltre ho approfondito alcuni concetti teorici che personalmente mi incuriosivano e che credo siano interessanti per un apprendimento di tecnologie alquanto particolari, vedi il bus GPIB e i generatori fotovoltaici.

Per quanto riguarda i codici di programmazione dei singoli strumenti ho redatto un capitolo per elencare i comandi essenziali e ho aggiunto alcuni commenti che mi sembravano utili. Inoltre in allegato vi sono i capitoli che riguardano la programmazione delle interfacce via remoto di tutti gli strumenti utilizzati.

BIBLIOGRAFIA

Libri

[1] Angus R., Hulbert T., VEE Pro, Practical Graphical Programming, Springer

[2] Helsel R., Visual Programming with HP VEE, Hewlett-Packard Professional Books

[3] VEE Pro, User's Guide, Agilent Technologies

[4] VEE Pro, Advanced Programming Techniques, Agilent Technologies

Riferimenti Internet

[1] Laboratorio SpaceLab, http://www.spacelab.dti.supsi.ch/index_flash.html

[2] Enerpoint - sistemi solari fotovoltaici – approfondimenti sulla tecnologia, http://www.enerpoint.it/html/fotovoltaico_approfondimenti_tecnologia_fotovoltaica.php

[3] GPIB Tutorial, http://www.hit.bme.hu/~papay/edu/GPIB/tutor.htm

[4] Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, http://www.aero.polimi.it/~palamede

ALLEGATI

[A] Piani di lavoro

[B] Simulazione di un generatore fotovoltaico con EXCEL

[C] Errori di programmazione

[D] Manuali di programmazione strumenti

- Power Supply HP E3631A
- Multimetro HP 34401A
- Data Acquisition Agilent 34970A
- Carico elettronico HM 8143
- Generatore d'onde HP 33120A
- Oscilloscopio HP 54603B
- Logic Analyzer HP 54620A