

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica



TESI DI LAUREA

**MODELLISTICA E SIMULAZIONE DI  
SISTEMI CON GENERAZIONE DISTRIBUITA**

Relatore:

Prof. GIANFRANCO CHICCO

Candidato:

*ANTONINO PREVITI*

Maggio 2007

# INDICE

INTRODUZIONE. . . . .	. pag.5
 <b>CAPITOLO 1 : La Programmazione DSL</b>	
Paragrafo 1.1: Introduzione . . . . .	. pag.6
Paragrafo 1.2: I frame e la loro definizione . . . . .	. pag.6
Paragrafo 1.3: I blocchi elementari e la loro definizione . . . . .	. pag.9
Paragrafo 1.4: La definizione del Composite Model.. . . . .	. pag.14
Paragrafo 1.5: La definizione del Common Model.. . . . .	. pag.17
 <b>CAPITOLO 2 : La struttura di un generatore eolico</b>	
Paragrafo 2.1: Introduzione. . . . .	. pag.23
Paragrafo 2.2: La definizione del circuito unifilare.. . . . .	. pag.24
Paragrafo 2.3: Il modello matematico della turbina eolica. . . . .	. pag.25
Paragrafo 2.4: Approssimazione del modello di base. . . . .	. pag.26
Paragrafo 2.5: Lo schema a blocchi del modello di base. . . . .	. pag.27
Paragrafo 2.6: La rappresentazione grafica. . . . .	. pag.28
Paragrafo 2.7: Le simulazioni sul modello di base. . . . .	. pag.40
Paragrafo 2.8: Il modello di base con vento variabile. . . . .	. pag.45
Paragrafo 2.9: Il modello di base con il vento variabile ed il sistema di Pitch Control. . . . .	. pag.48
Paragrafo 2.10: Conclusioni.. . . . .	. pag.53
 <b>CAPITOLO 3 : L'influenza della generazione distribuita sulle reti in Bassa Tensione</b>	
Paragrafo 3.1: La definizione della rete in bassa tensione. . . . .	. pag.54
Paragrafo 3.2: La progettazione della rete in bassa tensione. . . . .	. pag.61
Paragrafo 3.3: Il dimensionamento della rete in bassa tensione. . . . .	. pag.64
Paragrafo 3.4: I diagrammi di carico. . . . .	. pag.68
Paragrafo 3.5: L'impianto di generazione eolica. . . . .	. pag.87

Paragrafo 3.6: Il modello di base con il vento variabile ed il sistema di Pitch Control. . . . .	. pag.87
Paragrafo 3.7: Ancora sui grafici di DIgSilent. . . . .	. pag.97
 <b>CAPITOLO 4 : Calcoli di corto circuito nelle reti ad Alta Tensione</b>	
Paragrafo 4.1: La definizione della rete ad Alta Tensione.. . . .	.pag.104
Paragrafo 4.2: Il calcolo del corto circuito con DIgSilent. . . . .	.pag.106
Paragrafo 4.3: Lo studio statico del corto circuito nelle reti ad Alta Tensione. . . . .	.pag.113
Paragrafo 4.4: Lo studio dinamico del corto circuito nelle reti ad Alta Tensione. . . . .	.pag.114
 <b>CAPITOLO 5 : Studio della rete in Media Tensione</b>	
Paragrafo 5.1: Definizione della rete in Medi Tensione. . . . .	.pag.122
Paragrafo 5.2: Definizione del modello di una linea elettrica. . . . .	.pag.128
Paragrafo 5.3: Definizione del modello di un carico. . . . .	.pag.138
Paragrafo 5.4: Definizione del modello di un trasformatore. . . . .	.pag.142
Paragrafo 5.5: Le prove sulla rete in Media Tensione. . . . .	. pag.148
 <b>BIBLIOGRAFIA.</b> . . . . .	 pag.153

A mamma, papà,  
Graziella e Salvatore  
con sincero affetto.

## **Introduzione**

La necessità di ridurre l'inquinamento ambientale ha accresciuto l'interesse in tutto il mondo per l'introduzione nelle reti di distribuzione di piccoli e medi generatori che impiegano fonti primarie rinnovabili, anche in relazione al fatto che le nuove tecnologie offrono soluzioni più convenienti rispetto al passato. Tuttavia, sono oggetto di studio anche nuove tecnologie che utilizzano combustibili fossili tradizionali, come le celle a combustibile e le microturbine, poiché permettono un significativo abbattimento delle emissioni inquinanti nel funzionamento in cogenerazione.

La diffusione dei sistemi di piccola e media generazione, prevista per i prossimi anni, pone il problema della loro integrazione nelle reti di distribuzione in media e bassa tensione, sia per il mantenimento degli standard attuali di qualità dell'energia fornita, sia per lo sfruttamento dei possibili vantaggi che ne possono derivare. D'altra parte però, un'introduzione disordinata e non regolamentata potrebbe portare ad un peggioramento della qualità dell'energia elettrica; infatti, la potenza e l'ubicazione della generazione distribuita (dipendenti da diversi fattori come la disponibilità della fonte primaria, delle infrastrutture, della situazione urbanistica e normativa) alterano il funzionamento della rete, e spesso anche la qualità del servizio.

Lo scopo di questo lavoro è quello di indagare come gli impianti di generazione distribuita influiscano sui sistemi elettrici (con diversi livelli di tensione, diverse strutture e diverse disposizioni dei carichi) al variare della loro potenza e della loro ubicazione. In particolar modo, sono state investigate le influenze della generazione distribuita sui flussi di potenza attiva e reattiva, sui profili di tensione, sulle perdite di potenza ed infine sulle correnti di corto circuito. Tutto questo lavoro di simulazione è stato eseguito con l'ausilio del software DIGSILENT. Le logiche di implementazione dei modelli all'interno del software sono richiamate nel corso della presentazione delle applicazioni.

# **CAPITOLO 1**

## **LA PROGRAMMAZIONE DSL**

### **Paragrafo 1.1:** Introduzione

La programmazione DSL è una programmazione per oggetti che permette di associare ogni possibile tipologia di schemi a blocchi a ciascuno degli elementi, attivo o passivo, disponibile con il software DIgSILENT.

Lo scopo di questo capitolo è di mostrare la procedura di costruzione di uno schema a blocchi e soprattutto mostrare come tale schema a blocchi viene legato ad un elemento presente nello schema unifilare preparato precedentemente.

### **Paragrafo 1.2:** I frame e la loro definizione

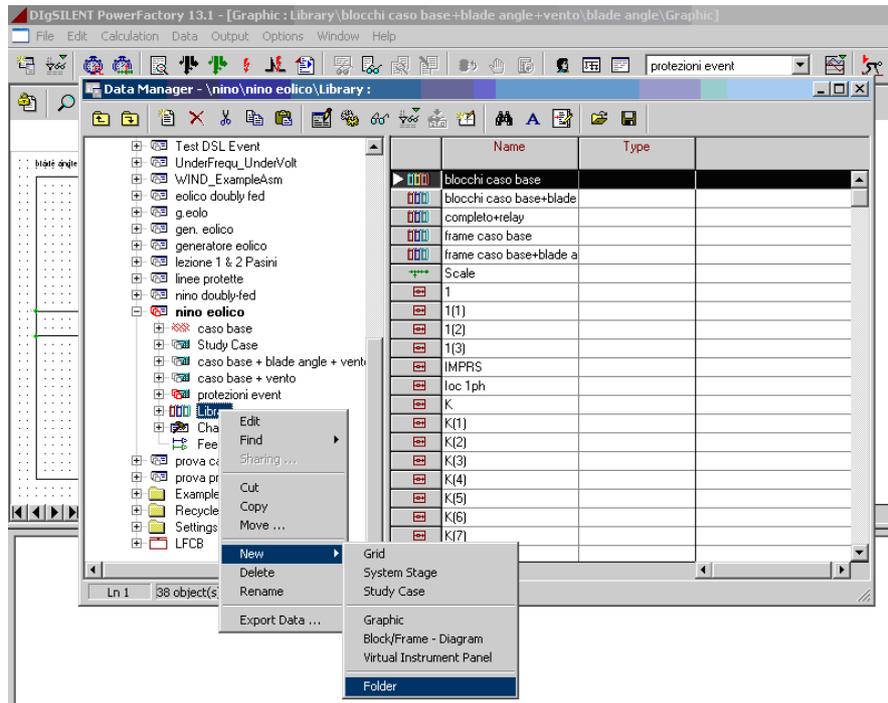
Un generico schema a blocchi presenta una struttura annidata, nel senso che lo schema finale è un frame che può contenere al suo interno altri frame, i quali a loro volta possono contenere al loro interno altri frame e così via fino all'ultimo livello dove si troveranno invece dei semplici blocchi.

La differenza sostanziale tra il frame ed il blocco sta nel fatto che i primi possono contenere solo altri schemi a blocchi mentre i secondi potranno contenere solo la funzione di trasferimento che modella un determinato componente del circuito.

Nell'uso di DIgSILENT bisogna tenere presente che tutti gli oggetti che si intende utilizzare in un determinato progetto devono risiedere nella sezione "LIBRARY " dello stesso progetto.

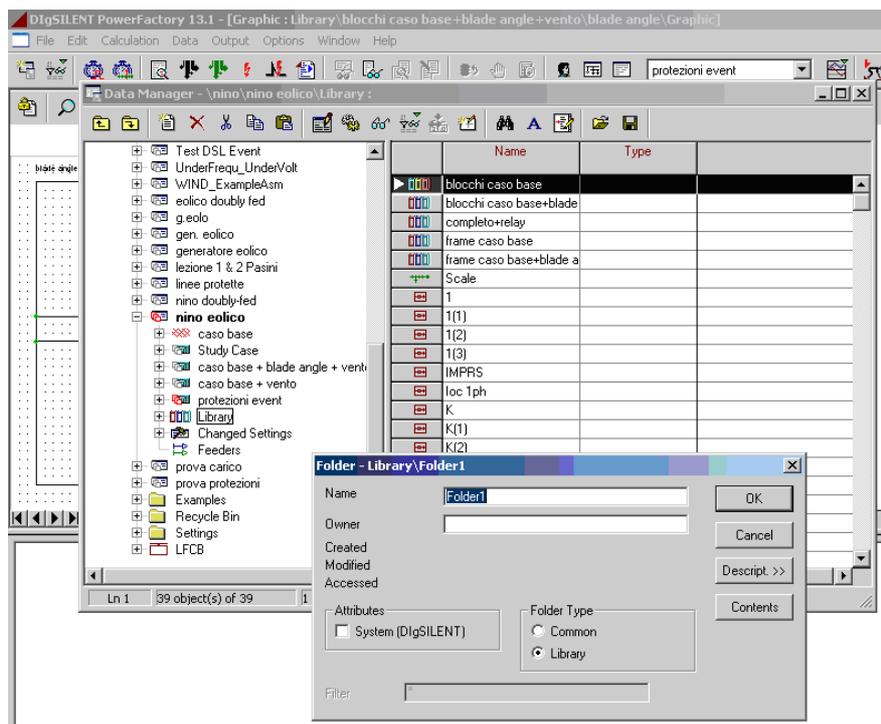
Il primo passo da compiere, per la progettazione di uno schema a blocchi, è creare un percorso all'interno della libreria di progetto che individui una directory che andrà a contenere tutti quegli elementi che serviranno alla costituzione dello schema a blocchi nella sua forma finale.

Per creare questa directory si procede come nella Fig.1.



**Fig. 1: Dettaglio creazione directory**

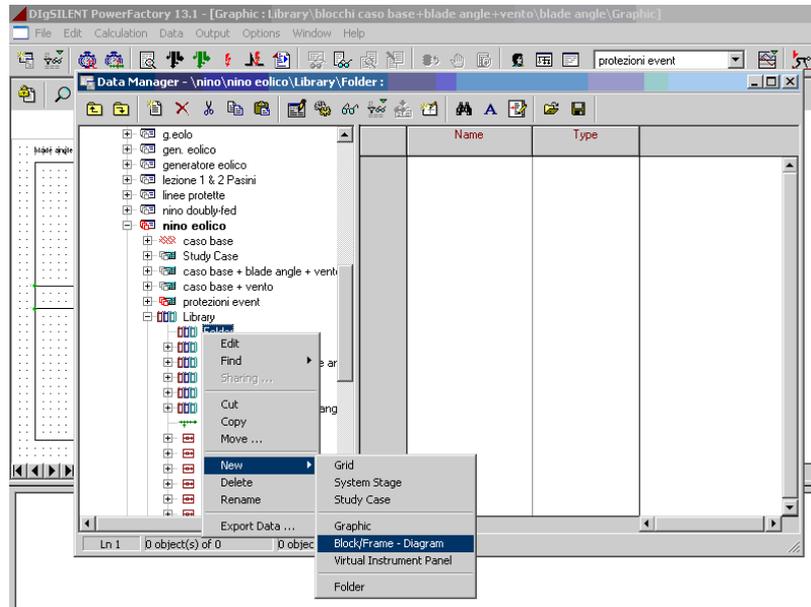
Comparirà a questo punto una finestra nei quali spazi vuoti bisognerà introdurre il nome della nuova directory e poi dare OK come in Figura2.



**Fig. 2: Dettaglio scheda directory**

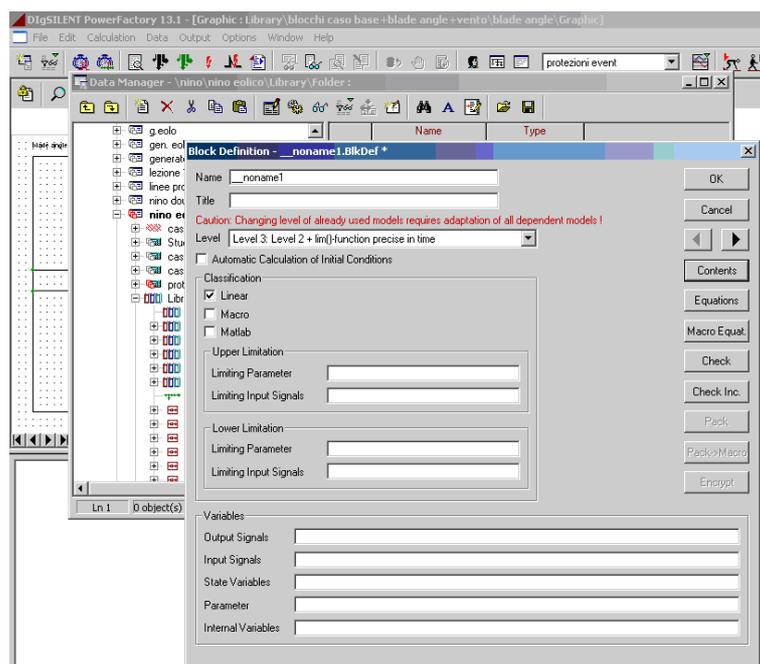
A questo punto comincia la vera progettazione dello schema a blocchi, partendo dallo schema finale e risalendo sino ai blocchi elementari.

Cominciamo con il creare il frame più esterno che conterrà lo schema a blocchi finale (Fig.3).



**Fig. 3: Dettaglio creazione frame**

Comparirà una finestra (Fig.4) che andrà riempita con il nome che si vuole dare all'oggetto che si sta creando, dopo di che si potrà dare OK.



**Fig. 4: Dettaglio scheda frame**

Il programma creerà un nuovo foglio di lavoro che presenterà una cornice con, in alto a sinistra, il nome che gli si è scelto.

Su tale foglio di lavoro si dovrà disegnare lo schema a blocchi che si intende realizzare attingendo, per i vari elementi, dalla colonna presente nella parte destra dello schermo.

Disegnato l'intero schema, si dovrà procedere con la costruzione dei singoli blocchi costituenti.

Nella libreria del progetto si creerà un nuovo blocco

DM → Library → Path folder → click tasto destro → new... → Block/Frame Diagram

Comparirà come di consueto una finestra di dialogo nella quale inserire il nome del blocco in questione, dopo di che si può dare l'OK.

Sul nuovo foglio di lavoro si procederà col disegnare uno schema a blocchi costituito da altri frame oppure, nel caso si sia giunti al livello più basso della nostra schematizzazione, da blocchi elementari che ricordiamo portano al loro interno le funzioni di trasferimento.

### **Paragrafo 1.3:** I blocchi elementari e la loro definizione

Riportati i singoli blocchi sul foglio di lavoro, si procederà con la loro definizione e ciò significa rappresentare in ognuno di essi una funzione di trasferimento.

Tutte le forme possibili per una funzione di trasferimento sono contenute in una directory della libreria generale di DIGSILENT , chiamata “ Macros ”, a cui si può accedere seguendo il percorso di Fig.5.

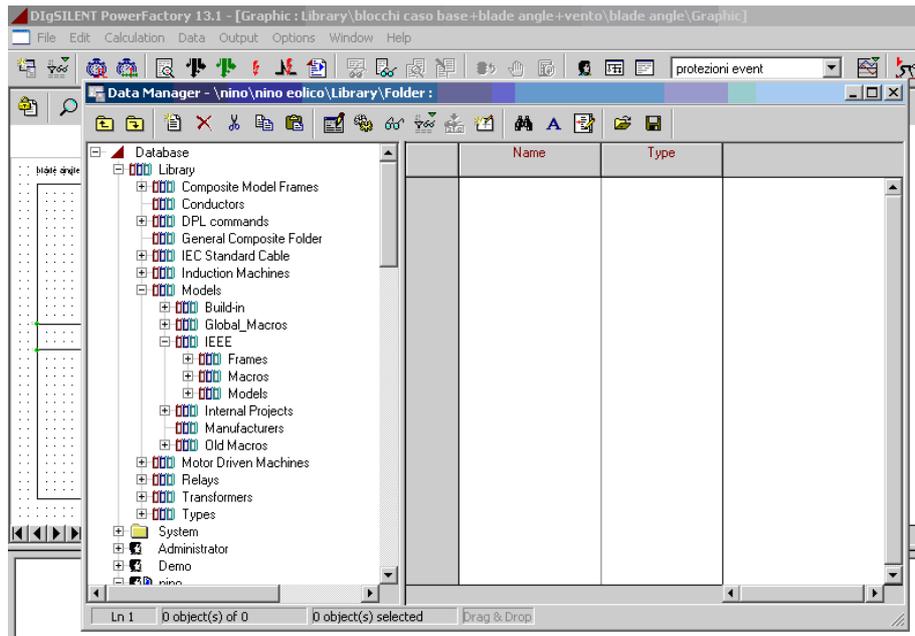


Fig. 5: Dettaglio directory Macros

Da questa lista si possono scegliere, una ad una, tutte le funzioni di trasferimento che servono al progetto, copiandole nella libreria di progetto.

Il prossimo passo che si dovrà eseguire sarà quello di assegnare ognuna delle funzioni di trasferimento ad ognuno dei blocchi; per questo si darà un doppio click sul blocco, dopo di che comparirà una finestra di dialogo come in Fig.6. Nella quale finestra viene data la possibilità di scegliere un tipo, per il blocco, selezionando sul pulsante ▾.

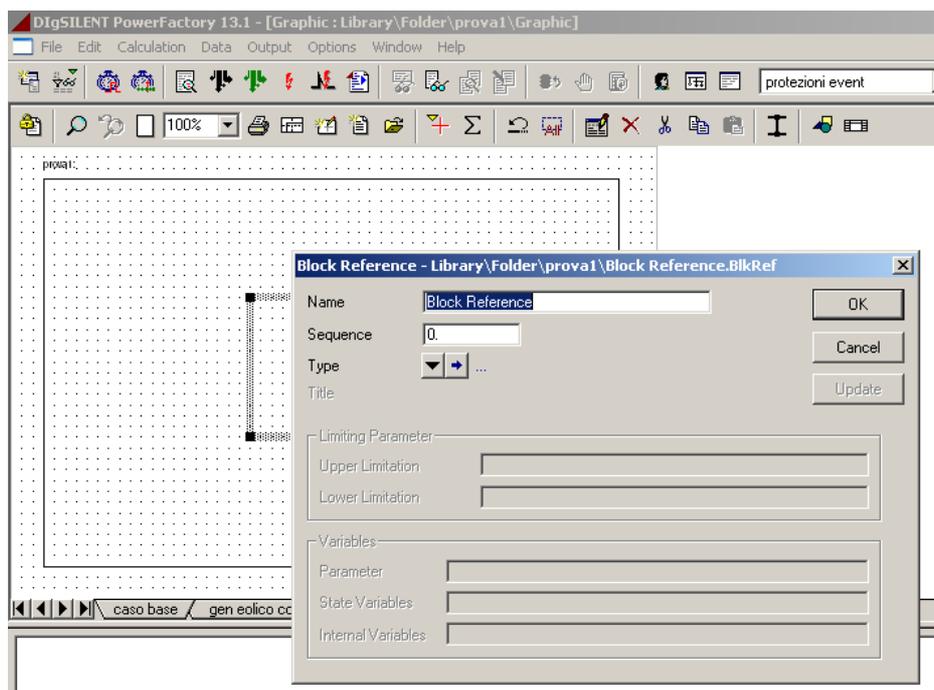
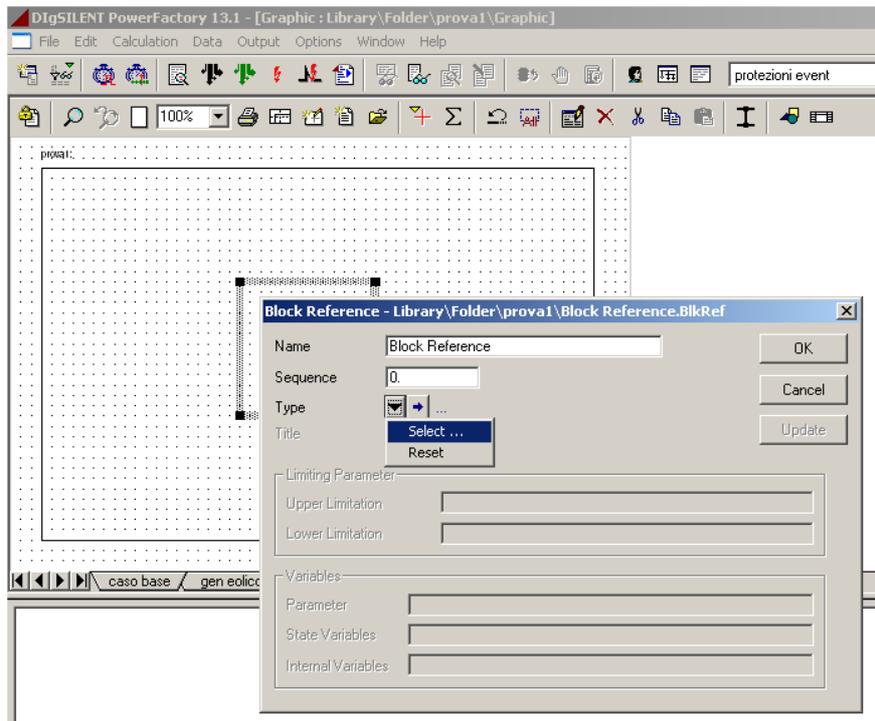


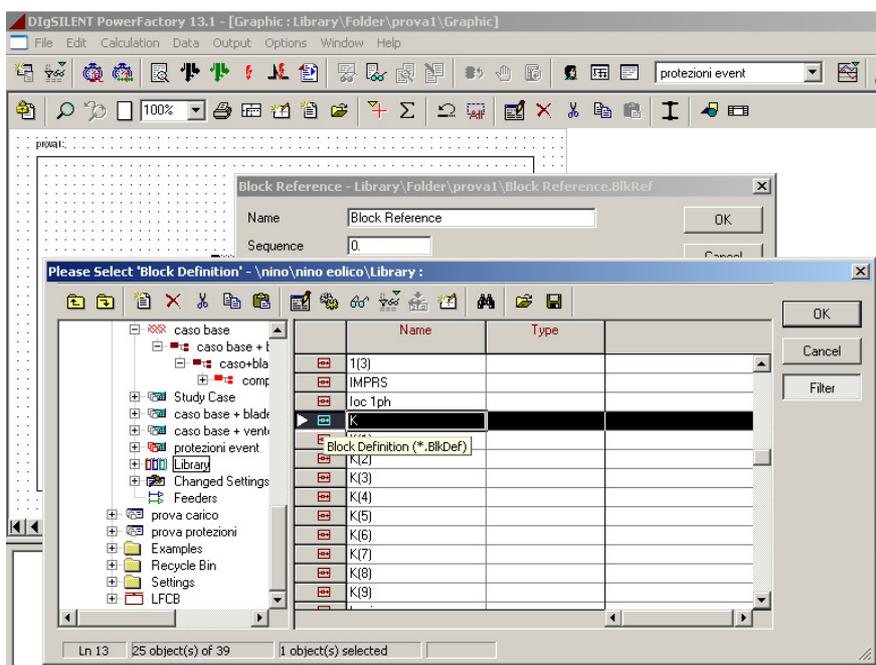
Fig. 6: Dettaglio scheda introduttiva del blocco

Verrà fuori un menù attivo dal quale bisognerà selezionare la voce “Select” (Fig.7).



**Fig. 7: Dettaglio selezione del tipo**

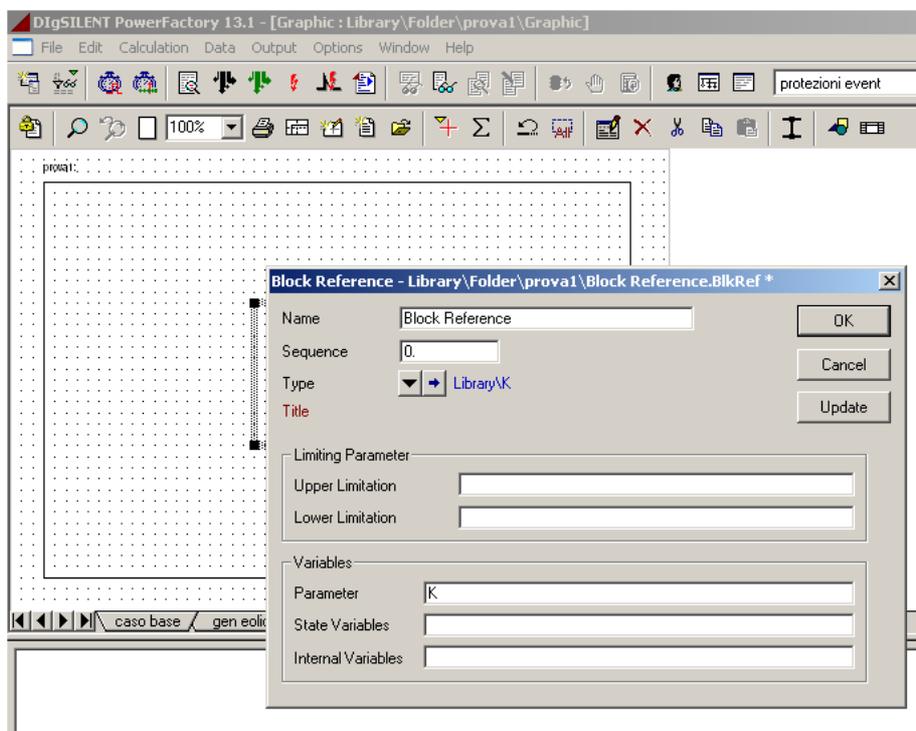
Apparirà dunque una finestra di dialogo che invita alla scelta di una tra le funzioni di trasferimento presenti nella libreria di progetto (in tale contesto le funzioni di trasferimento vengono indicate con il nome “block definition”) come in Fig.8.



**Fig. 8: Dettaglio scelta funzione di trasferimento**

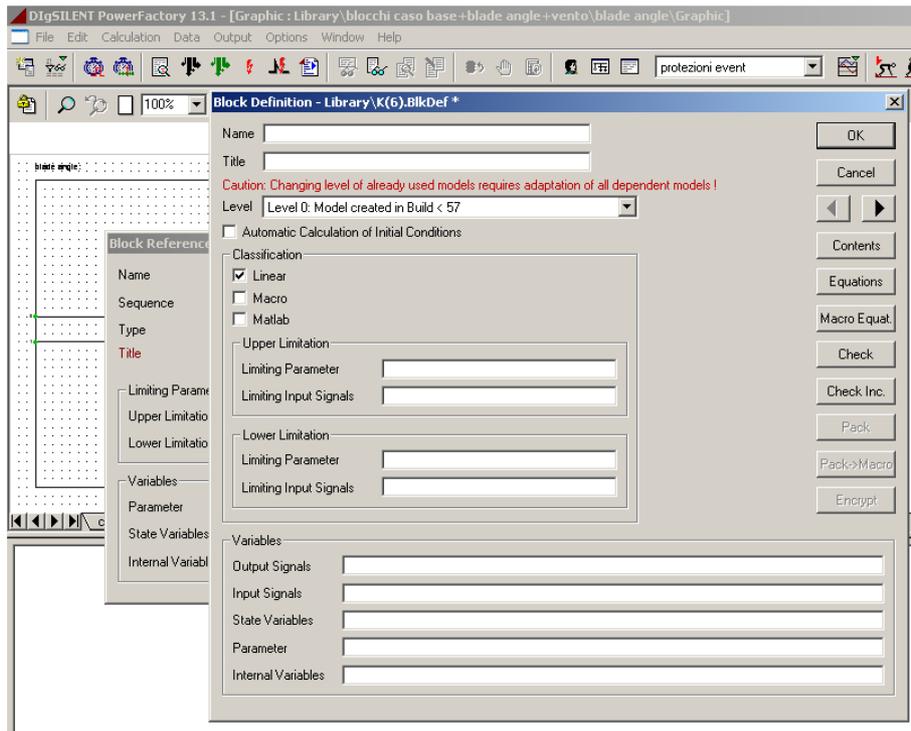
La scelta della funzione di trasferimento dovrà essere effettuata dalla colonna “Name” con un click sul tasto . Eseguita la scelta si potrà dare l’Ok ad entrambe le finestre ed a questo punto l’associazione tra blocco e funzione di trasferimento è stata completata. Questa procedura dovrà essere eseguita per ognuno dei blocchi presenti nello schema a blocchi.

Il successivo passo sarà quello di definire le grandezze in ingresso ed in uscita dal blocco, i parametri che entrano in gioco nel modello, le variabili interne e quelle di stato. Queste definizioni verranno effettuate selezionando con un doppio click il blocco ed avendo così accesso alla scheda dello stesso (Fig.9).



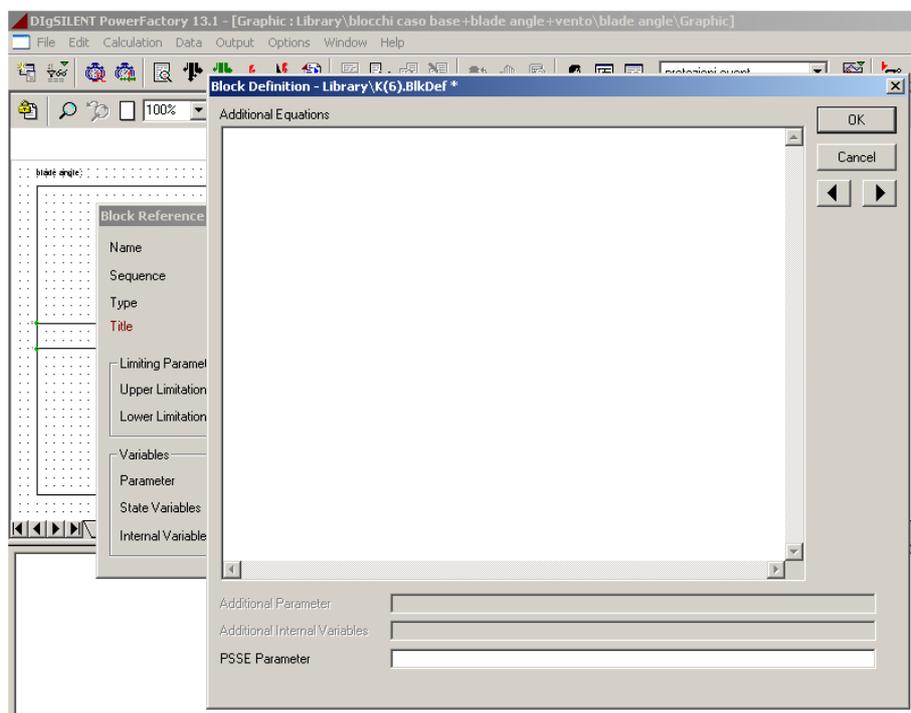
**Fig. 9: Dettaglio descrizione della scheda del blocco**

Successivamente, selezionando il pulsante  comparirà una finestra di dialogo nella quale bisognerà riempire i vari campi con le grandezze di cui sopra (Fig.10). In tale fase, bisogna fare attenzione perché ci deve essere assoluta congruenza tra il nome che si sceglie per le grandezze in ingresso od in uscita dal blocco ed il nome che viene inserito nei rispettivi campi degli altri blocchi, pena il non funzionamento del modello intero.



**Fig. 10: Dettaglio definizione blocco**

L'introduzione del modello matematico viene invece eseguita nella pagina successiva, alla quale si accederà selezionando il pulsante ► presente nella precedente finestra in alto a destra. Si avrà accesso ad una seconda pagina come si può vedere in Fig.11.



**Fig.11: Dettaglio introduzione modello matematico**

In questa nuova finestra sarà visualizzata la relazione tra l'uscita (indicata con  $y_o$ ) del blocco ed il suo ingresso (indicato con  $y_i$ ) attraverso la funzione di trasferimento che si era scelta per il blocco, con l'unica differenza che la funzione di trasferimento era stata scelta come funzione nel dominio di Laplace mentre adesso compare come funzione nel dominio del tempo.

E' consigliabile sostituire i nomi assegnati dal software alle variabili di ingresso ed uscita con i propri, al fine di evitare errori e per una più immediata lettura e comprensione del modello intero.

Definito così il modello matematico completo, bisognerà definire le condizioni iniziali per ognuna delle variabili che compaiono nel modello.

Questa operazione può essere eseguita nella stessa pagina che contiene il modello usando l'istruzione

$$\text{inc}(\text{nome\_variabile})=\text{valore\_variabile}$$

Quest'ultima operazione risulterà essere necessaria perché quando si effettuerà una simulazione nel tempo ( RMS Simulation ) il software chiederà di lanciare prima il calcolo delle condizioni iniziali ed è in tale frangente che lo stesso software attingerà alle condizioni iniziali dichiarate nel modello di cui sopra.

Sarà allo stesso tempo importante che le condizioni iniziali siano calcolate in maniera esatta, al fine di evitare delle possibili incongruenze negli andamenti che si intende visualizzare.

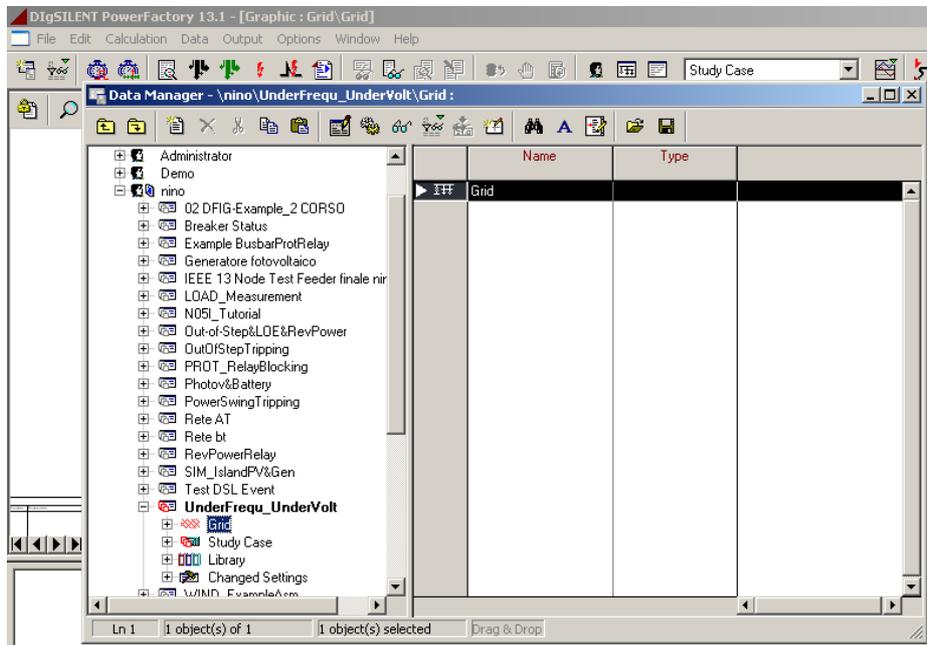
Fatto ciò si possono chiudere tutte le finestre perché il blocco è stato definito in tutte le sue parti.

#### **Paragrafo 1.4:** La definizione del Composite Model

Il Composite Model è il mezzo di cui ci si serve per collegare effettivamente il modello matematico che si introduce con gli schemi a blocchi al componente elettrico presente nello schema unifilare.

Il Composite Model deve essere creato nella griglia in studio, in quanto è a tutti gli effetti un componente della rete, anche se non compare fisicamente nello schema unifilare.

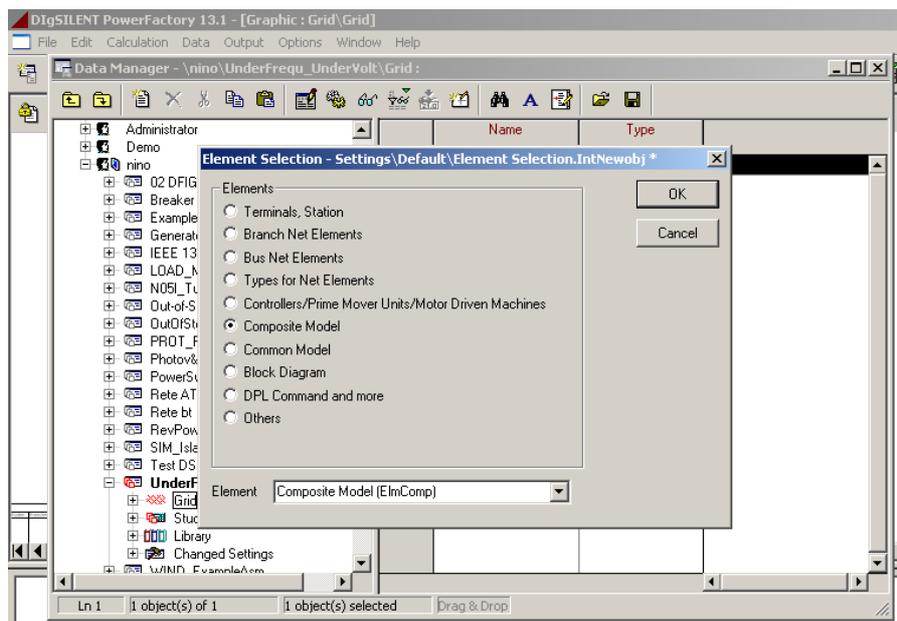
Per creare un Composite Model bisogna innanzitutto selezionare con un singolo click la griglia oggetto di studio (Fig.12).



**Fig. 12: Dettaglio destinazione Composite Model**

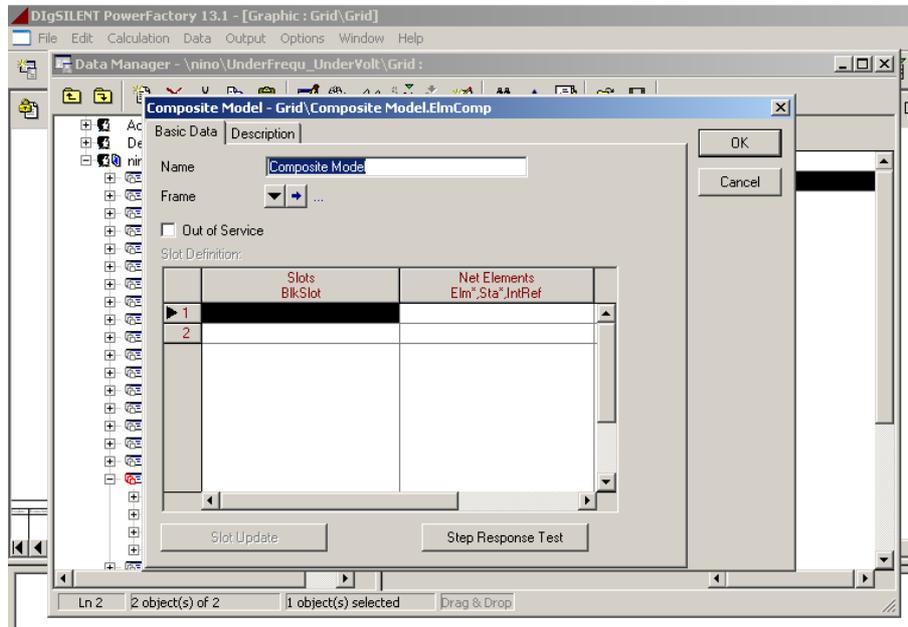
A questo punto bisognerà creare l'oggetto Composite Model selezionando il tasto “new object”  posto in alto a destra nella barra degli strumenti del “Data Manager”.

Comparirà una finestra di dialogo come in Fig.13 nella quale sono presenti una lista di oggetti e dalla quale bisognerà scegliere la voce “Composite Model”.



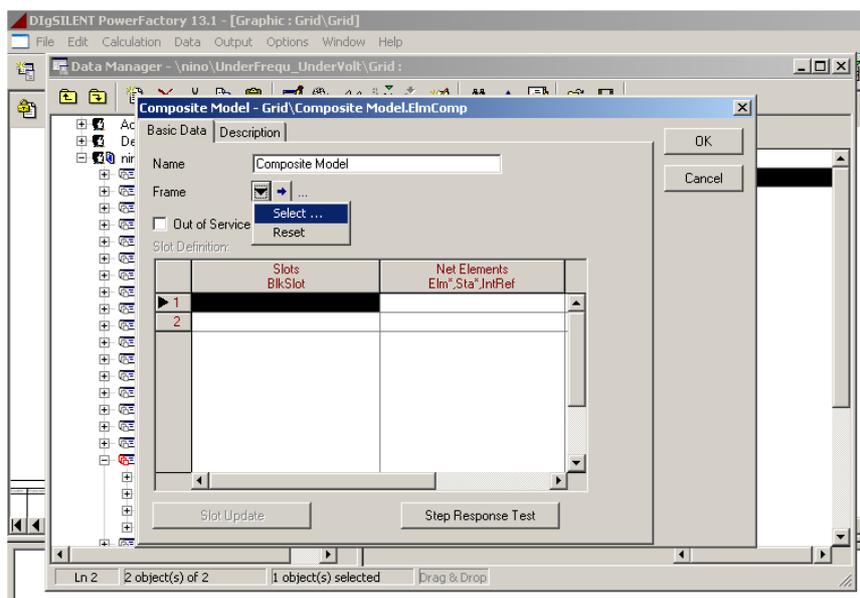
**Fig. 13: Dettaglio selezione elemento Composite Model**

Dando l' OK comparirà una nuova finestra Fig.14. Il primo passo sarà quello di dare un nome al Composite Model. Il successivo passo sarà quello di scegliere il frame a cui il Composite Model dovrà puntare, e ciò significa specificare quale schema a blocchi si vuole realizzare durante una simulazione.



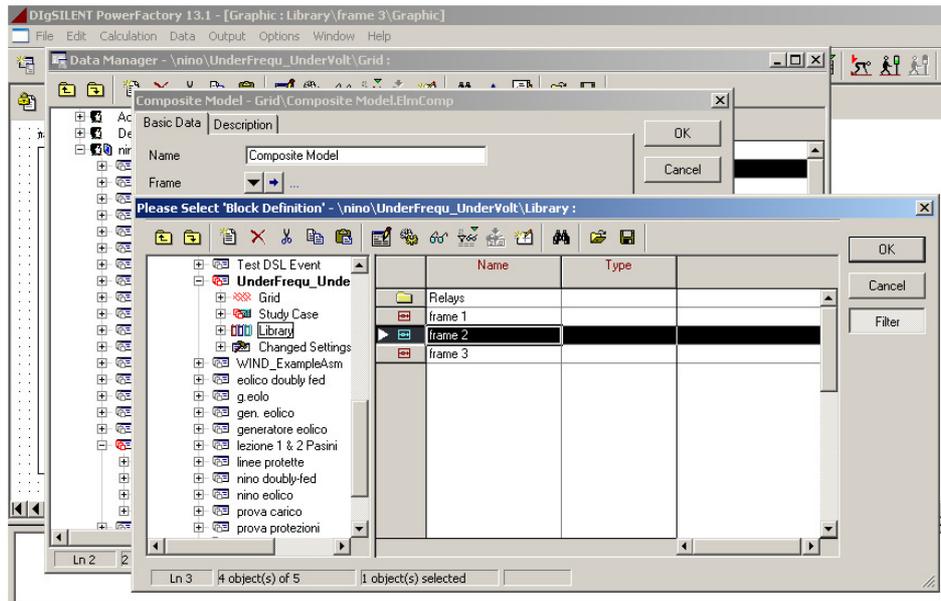
**Fig. 14: Dettaglio scheda descrittiva Composite Model**

Selezionando il pulsante  spunterà un menù attivo con due voci, dal quale bisognerà scegliere la prima semplicemente trascinandoci sopra il cursore ed eseguendo un singolo click (Fig.15).



**Fig. 15: Dettaglio selezione frame di riferimento**

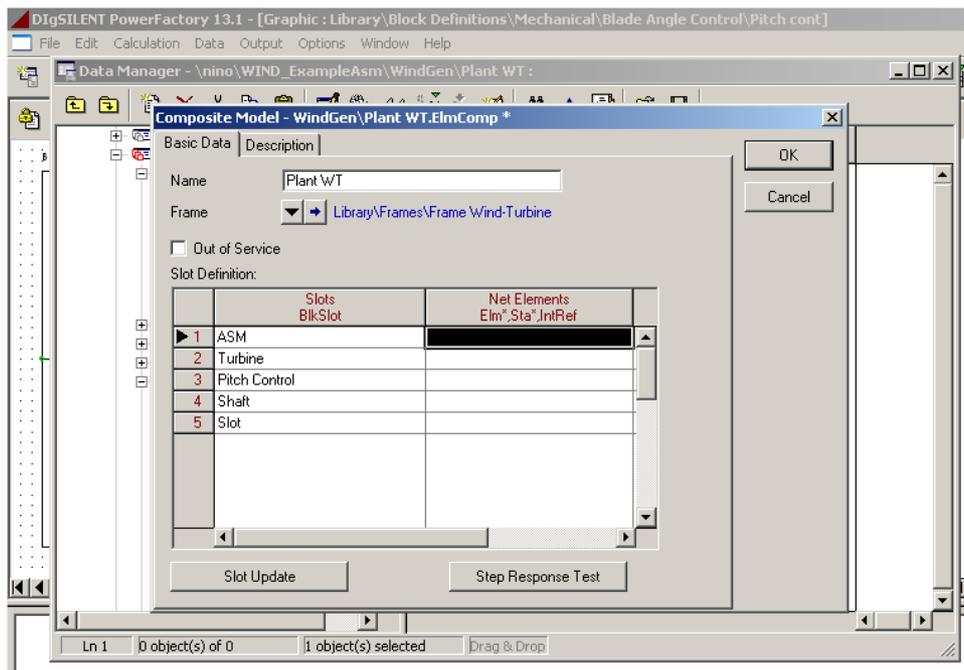
Verrà fuori una finestra come in Fig.16 che inviterà alla scelta di un frame.



**Fig. 16: Dettaglio elenco frame**

La scelta del frame deve avvenire dalla colonna “Name”, selezionando con un click il simbolo  corrispondente al frame desiderato.

Si potrà notare adesso che nella parte sottostante della finestra del Composite Model (che adesso sarà in primo piano) è comparso l’elenco di tutti i blocchi (slots) presenti nel frame appena scelto, come si può vedere dalla Fig.17.



**Fig. 17: Dettaglio elenco slot**

A questo punto bisognerà associare ad ognuno di questi slot le funzioni di trasferimento dei singoli blocchi. Questa operazione verrà eseguita facendo puntare i singoli slot ad un nuovo elemento di DIgSilent, che si chiama Common Model e che verrà trattato nel prossimo paragrafo.

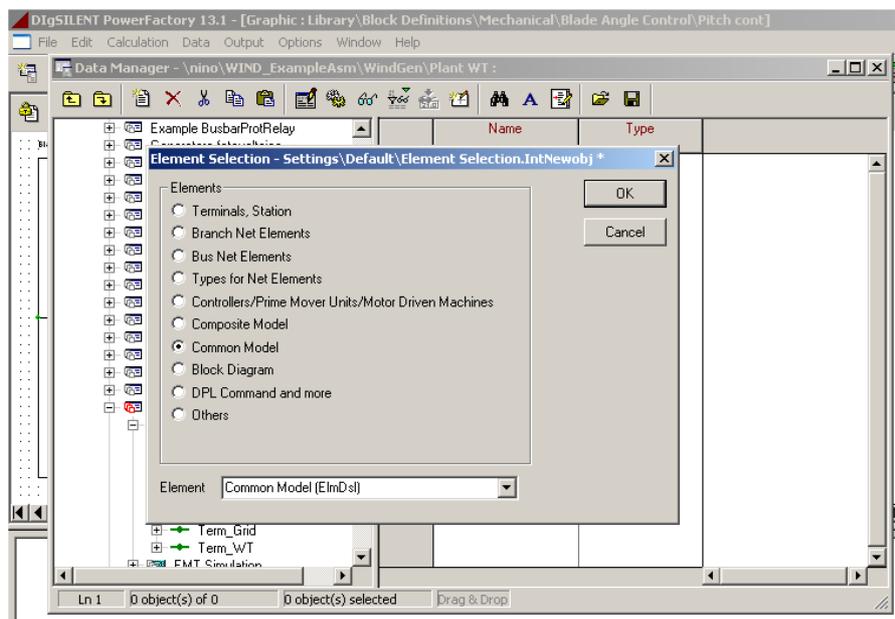
### **Paragrafo 1.5:** La definizione del Common Model

Nelle funzioni di trasferimento che sono state introdotte nei vari blocchi saranno probabilmente presenti costanti di tempo e parametri che sono stati introdotti semplicemente con il loro nome. Il Common Model è lo strumento che permette di associare ad ognuna di queste grandezze un valore numerico preciso.

E' meglio creare i vari Common Model in una sottodirectory del Composite Model a cui si vuole siano associati, per evitare confusione nel loro futuro utilizzo.

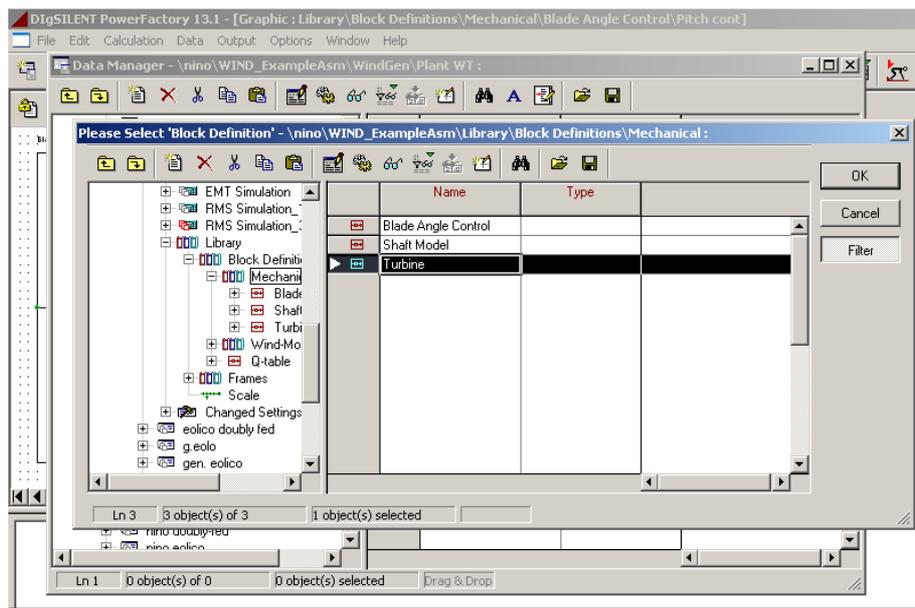
Per creare un Common Model bisogna prima selezionare con un singolo click il Composite Model presente nel Data Manager, così da specificare la cartella in cui creare i Common Models, successivamente si andrà a selezionare il pulsante "insert new object" avente il simbolo  che si trova nella barra degli strumenti dello stesso Data Manager.

Verrà fuori una finestra di dialogo contenente una lista di oggetti, dalla quale bisognerà scegliere la voce Common Model come in Fig.18.



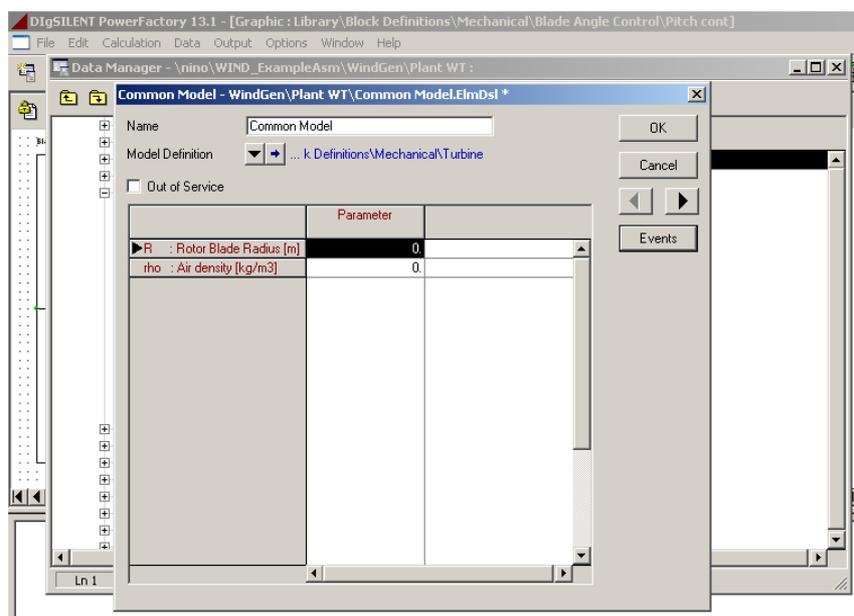
**Fig. 18: Dettaglio scelta elemento Common Model**

Dopo aver dato l'OK comparirà in primo piano una nuova finestra di dialogo che invita alla scelta del blocco a cui si desidera che il Common Model punti (Fig.19). Si ricorda in questo frangente che tutti i blocchi sono presenti in un percorso all'interno della libreria di progetto ed è da qui che devono essere scelti, pena il messaggio di errore. Tale scelta viene eseguita selezionando il tasto , come si vede dalla Fig.19.



**Fig. 19: Dettaglio scelta blocco di riferimento**

Una volta operata la scelta si potrà dare l'OK ed avere così l'accesso alla scheda del Common Model (Fig.20).

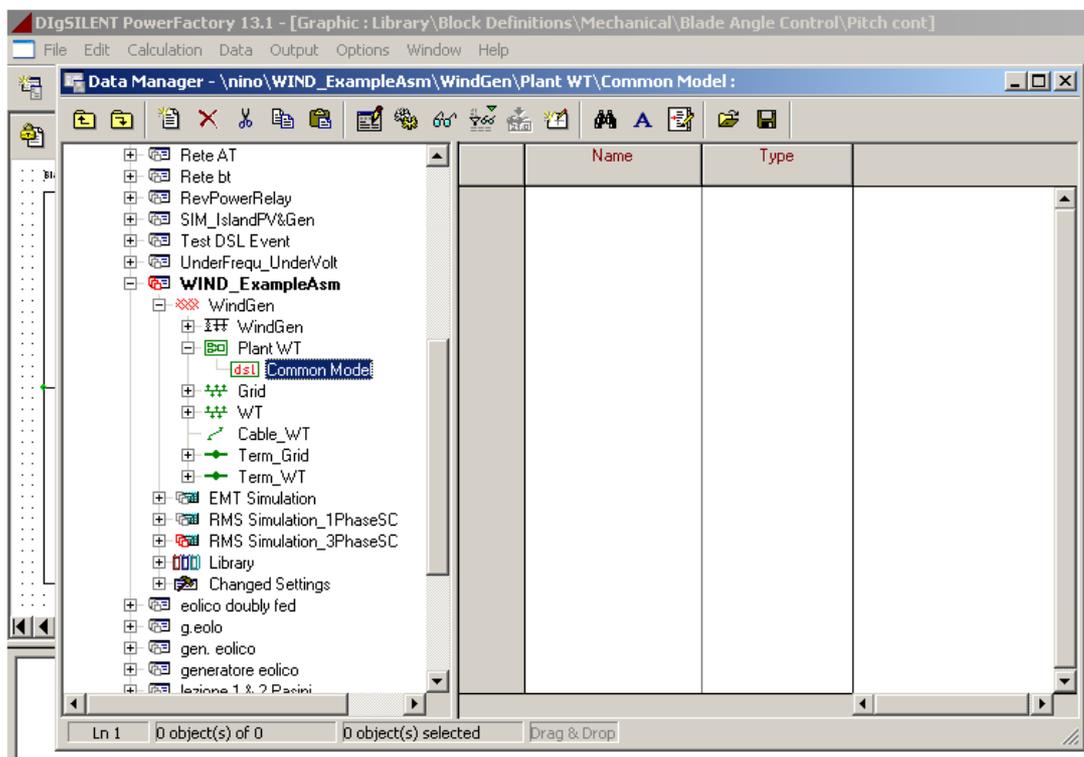


**Fig.20: Dettaglio elenco di definizione parametri interni**

Come si potrà notare, alla voce “ Model Definition “ compare il percorso che identifica il blocco a cui punta lo stesso Common Model, mentre le due colonne sottostanti elencano i nomi di tutti i parametri presenti nel blocco, quella di destra, ed i loro valori numerici quella di sinistra.

Nell’eventualità si volesse cambiare uno o più valori dei parametri, basterà selezionare con un singolo click la casella corrispondente al parametro nella colonna “ parameter ” ed inserire quindi il nuovo valore.

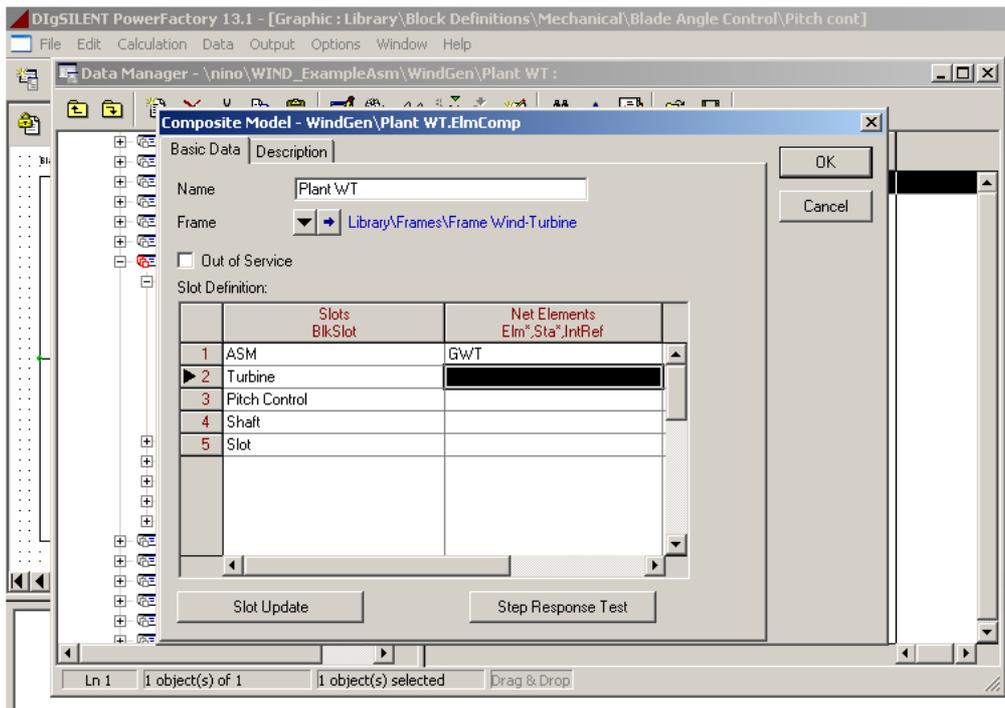
Selezionando OK la scheda del Common Model verrà chiusa ed il simbolo dello stesso comparirà nella cartella del Composite Model selezionato inizialmente come in Fig.21.



**Fig. 21: Dettaglio destinazione Common Model**

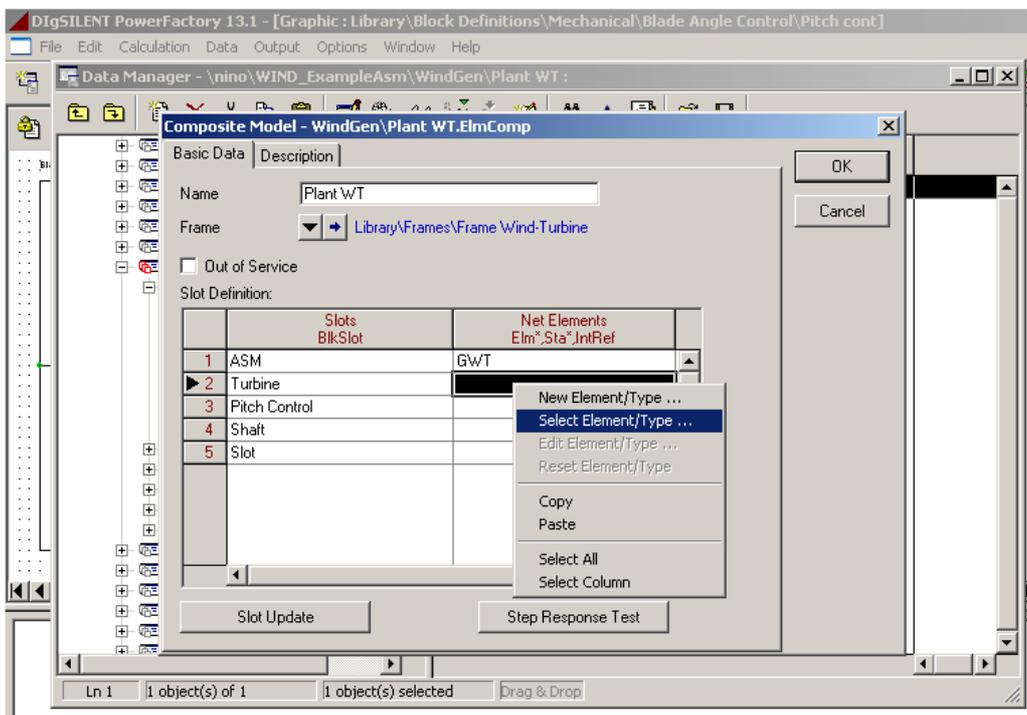
A questo punto il Common Model è stato definito in ogni sua parte, per cui si può andare oltre nella definizione del Composite Model che si era lasciata alla fase di riempimento degli slot.

Ritornando al Data Manager, si selezioni il Composite Model con un singolo click, poi con un click del tasto destro verrà fuori un menù attivo nel quale si dovrà selezionare la prima voce “ Edit “; si aprirà quindi l’editor dello stesso Composite Model, come in Fig.22.



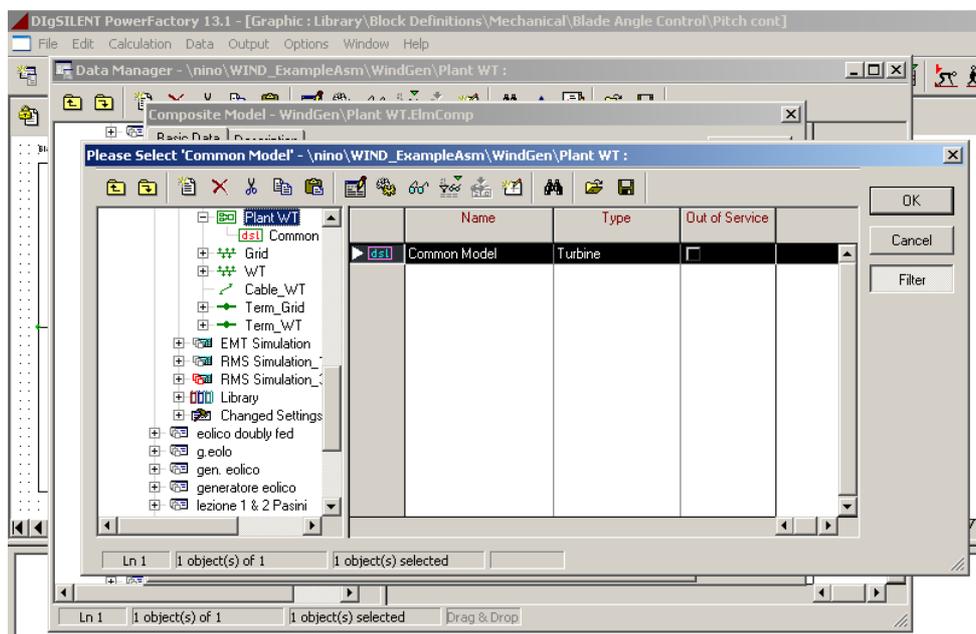
**Fig. 22: Dettaglio associazioni slot-componenti elettrici**

Andando direttamente nella sezione degli slot, si dovrà selezionare con un singolo click una delle caselle vuote nella colonna “ Net Elements “ e successivamente con un click del tasto destro comparirà un menù attivo come in Fig.23.



**Fig. 23: Dettaglio associazione slot – Common Model**

Selezionando la voce “ Select Element/Type “ verrà fuori una finestra di dialogo, che inviterà alla scelta del Common Model a cui dovrà puntare lo slot (Fig.24).



**Fig.24: Dettaglio scelta del Common Model**

La scelta dovrà essere fatta selezionando il tasto , presente nella parte destra della finestra, con un singolo click. Successivamente selezionando Ok la finestra si chiuderà ritornando così all’ Editor del Composite Model. Si potrà notare adesso che la casella non è più vuota a verifica del fatto che l’assegnazione è andata a buon fine.

Questa procedura dovrà essere eseguita per tutti gli slot vuoti che compaiono nell’Editor.

In questa fase, si può incorrere nell’errore di associare ad un determinato slot un Common Model sbagliato e purtroppo non avere nessun messaggio di errore da parte del software; per evitare ciò è consigliabile denominare ogni singolo oggetto che si crea in maniera inequivocabile. Ad esempio, se uno slot dovrà contenere la funzione di trasferimento di una turbina lo si potrà denominare “Turbina“, mentre il Common Model che punterà al blocco della turbina potrà essere denominato Common Model Turbina. Questa operazione, che a prima vista potrebbe sembrare macchinosa, si rivelerà utile in caso di un funzionamento anomalo oppure di un non funzionamento del modello durante una simulazione. Infatti, possibili errori nell’ assegnazione degli oggetti salteranno subito fuori da una ispezione visiva, evitando così di dover spulciare tutti gli oggetti creati alla ricerca del possibile errore.

## CAPITOLO 2

### STRUTTURA DI UN GENERATORE EOLICO

#### Paragrafo 2.1: Introduzione

In generale un generatore eolico comprende due parti principali, una turbina eolica ed un generatore asincrono.

L'idea di fondo è di realizzare un modello della turbina eolica e di usare invece un modello di generatore asincrono che dovrà solo essere dimensionato nelle sue parti essenziali.

Le caratteristiche meccaniche della turbina eolica sono state prelevate dal sito di un produttore europeo, VESTAS, riferendosi al modello V80-2MW avente le seguenti caratteristiche:

- 1) diametro turbina = 80 m;
- 2) area spazzata dalle pale =  $5024 \text{ m}^2$  ;
- 3) velocità = 16.7 rpm;
- 4) intervallo di funzionamento =  $(9 \div 19)$  rpm;
- 5) numero pale = 3;
- 6) velocità nominale vento =  $15 \text{ m/s}$  (corrispondente ai 2MW);
- 7) intervallo di funzionamento =  $(4 \div 25) \text{ m/s}$  ;
- 8) potenza nominale in uscita = 2 MW;
- 9) tensione nominale = 690 V;
- 10) frequenza = 50 Hz.

Per quanto riguarda invece il generatore asincrono, si è cercato nella libreria generale del software DIGSILENT ma non se ne è trovati della taglia cercata. Per tale motivo si è sfruttata la possibilità (del software) di definire un generatore asincrono di tipo generico, semplicemente introducendo le caratteristiche di potenza richieste.

$P_{nom} = 2 \text{ MW}$     singola gabbia di scoiattolo

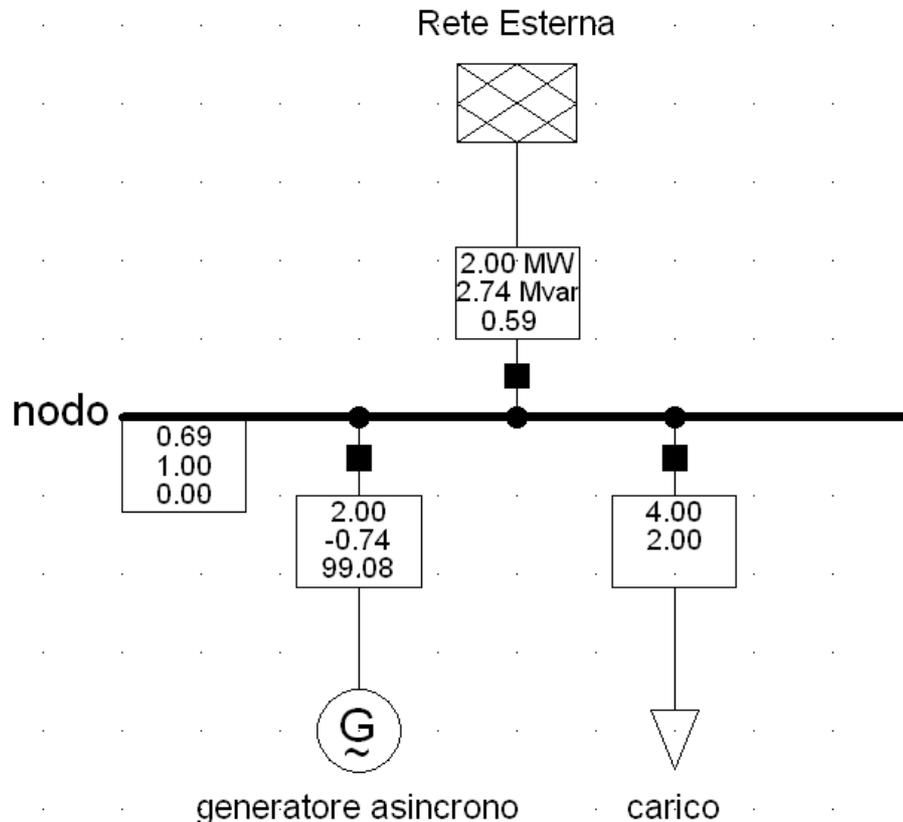
**Paragrafo 2.2:** La definizione del circuito unifilare

Per eseguire tutte le varie prove sul modello del generatore eolico bisognerà metterlo in condizioni di poter funzionare e ciò significa collegarlo ad una rete. La rete, proprio perchè si tratta di prove,

è costituita da un solo nodo, al quale vengono allacciati tre elementi:

- 1) una rete di potenza prevalente con funzione di slack;
- 2) il generatore eolico;
- 3) un carico con potenza attiva 4 MW e potenza reattiva 2 Mvar.

Lo schema così costituito dovrà essere validato per verificare la mancanza di errori nella definizione degli elementi. Si lancia così una simulazione di load-flow che risulterà convergente a prova della bontà dello schema. In Fig.1 è riportato lo schema unifilare con tutti i flussi di potenza sia attiva che reattiva per tutti gli elementi.



**Fig. 25:** Schema unifilare

**Paragrafo 2.3:** Il modello matematico della turbina eolica

La funzione della turbina eolica è quella di trasformare l'energia cinetica del tubo di flusso di aria in movimento, che investe le pale, in energia meccanica.

Tale trasformazione non sarà mai totale perché ciò imporrebbe di avere fluido in movimento nella parte anteriore della turbina e fluido completamente fermo nella parte posteriore e ciò è impossibile.

La potenza totale estraibile dal vento e disponibile all'albero sarà la seguente:

$$P_{turbina} = \frac{\rho}{2} \cdot c_p(\lambda, \theta) \cdot A_R \cdot v_w^3$$

dove :  $\rho$  è la densità dell'aria pari a  $1.23 \text{ kg/m}^3$  s.l.m.;

$c_p$  è il coefficiente di prestazione adimensionale;

$A_R$  è l'area spazzata dalle pale della turbina espressa in  $m^2$ ;

$v_w$  è la velocità del vento, espressa in  $m/s$ .

Tra i vari termini, il  $c_p$  è quello che ricopre la maggiore importanza importanza, per il semplice fatto che per ogni fissata velocità del vento si può intervenire su di esso per fargli assumere il massimo valore possibile in quelle determinate condizioni.

Esistono diversi modi per rappresentare in forma analitica tale coefficiente  $c_p$  e questo perché non essendo perfettamente descrivibili tutti i fenomeni che lo influenzano ci si può affidare ad approssimazioni. Quella che è stata presa in considerazione in questa sede è la seguente ([S,P,K-2001])

$$c_p = 0.22 \cdot \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \cdot \theta - 5 \right) \cdot e^{\left( \frac{-12.5}{\lambda_i} \right)}$$

dove  $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}$  ;

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_w} ;$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_w}{\omega \cdot R}\right) - \alpha \quad ([J-1976]).$$

Il coefficiente  $\lambda$  è chiamato “tip speed ratio” ed è il rapporto tra la velocità all’estremità della pala e la velocità del vento. L’angolo  $\theta$  è invece chiamato “blade angle” oppure “pitch angle” ed è l’angolo con cui la pala incide il vento.

#### **Paragrafo 2.4:** Approssimazioni del modello base

Per la descrizione del modello del generatore eolico, si comincerà da un modello estremamente semplificato per arrivare, alla fine, ad un modello molto più vicino alla realtà.

Le approssimazioni contenute nel modello base sono una velocità del vento ed un angolo di pitch (detto anche blade angle) costanti. In tale modo, il modello matematico da implementare con il software sarà il seguente

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{0.16 + \frac{40 \cdot \omega}{v_{wind}}} - 0.003889;$$

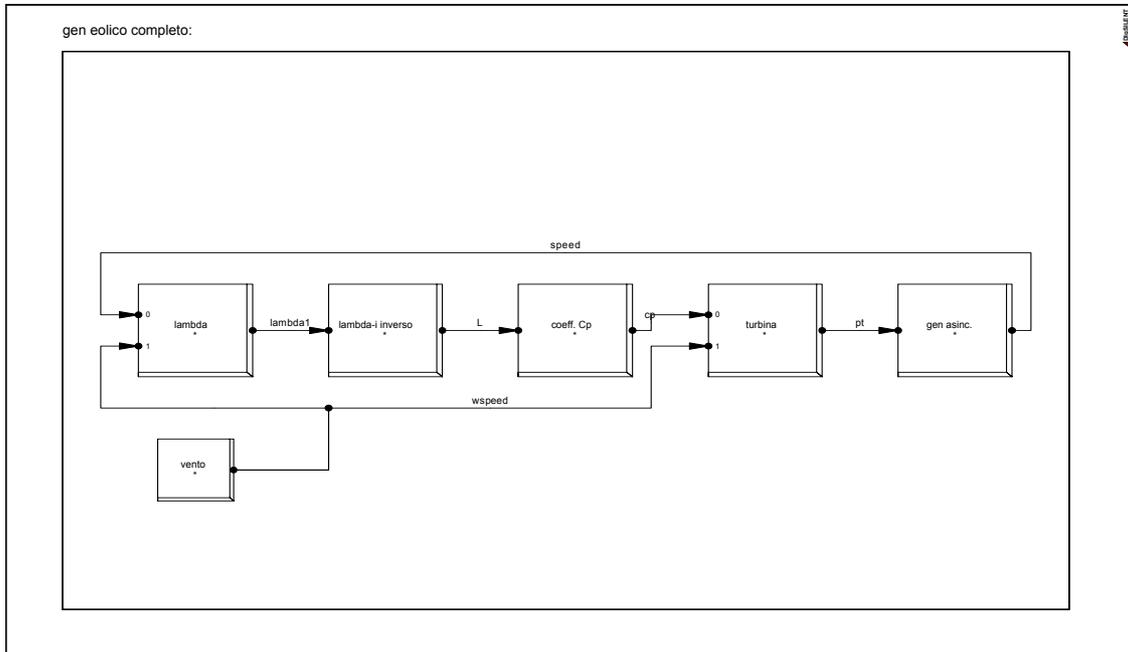
$$c_p = \left( \frac{25.52}{\lambda_i} - 1.276 \right) \cdot \exp\left( -\frac{12.5}{\lambda_i} \right);$$

$$P_t = 3089.76 \cdot c_p \cdot (v_{wind})^3 \quad [\text{W}];$$

Si può notare come la velocità alla punta della pala sia ottenuta moltiplicando la velocità dell’albero espressa in rad/s per il raggio della pala ( 40 m ) della turbina. Per il vento si è scelto un valore di velocità pari a 15 m/s mentre per l’angolo  $\theta$  si è scelto un valore pari a 2 deg.

**Paragrafo 2.5:** Lo schema a blocchi del modello di base

Lo schema a blocchi del caso base rappresentato in Fig.2.



**Fig. 26: Schema a blocchi del generatore eolico**

La logica che sta dietro a questo schema è molto semplice, in quanto viene prelevata la velocità di rotazione dell'albero che costituirà l'ingresso del primo blocco, il quale calcolerà il coefficiente  $\lambda$ . L'uscita del primo blocco sarà l'ingresso del secondo blocco che lo userà per il calcolo del coefficiente  $1/\lambda_i$ , che permetterà al terzo blocco di calcolare il coefficiente  $c_p$ .

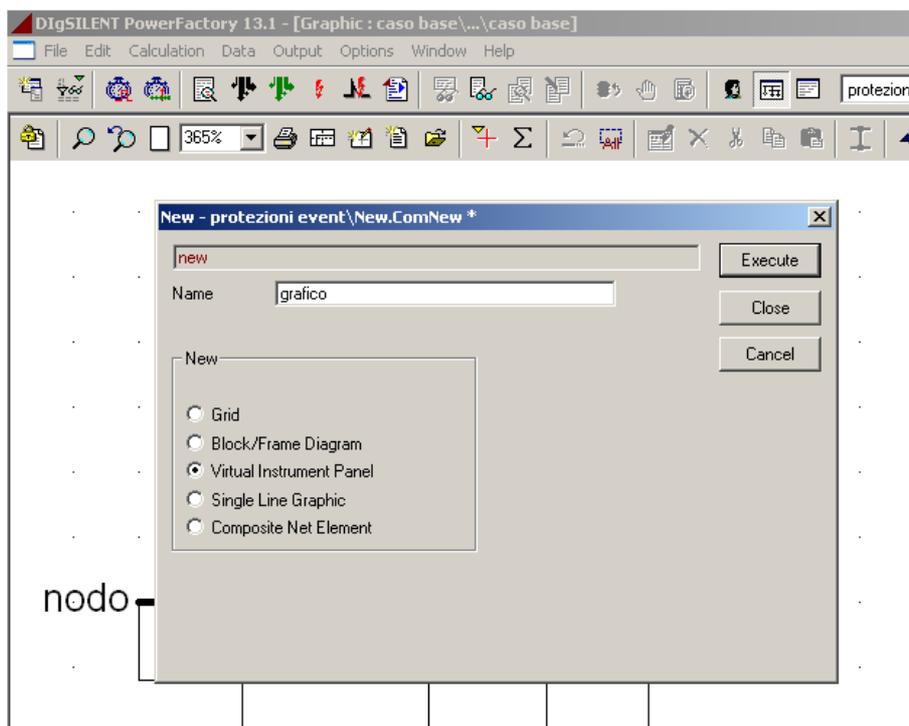
Il cerchio si chiuderà con il calcolo della potenza meccanica  $P_i$  da parte del quarto blocco. Questo valore di potenza è quello che metterà in moto il generatore asincrono.

Bisogna precisare che deve essere prestata attenzione alle u.d.m. di quelle grandezze che devono comandare i componenti elettrici. Un errore in tal senso può causare o un funzionamento anomalo oppure un funzionamento del componente secondo i parametri inseriti nella sua scheda di definizione e quindi come se lo schema a blocchi non esistesse.

**Paragrafo2.6:** La rappresentazione grafica

Vediamo prima però come creare una pagina grafica dove visionare i vari andamenti.

Nella seconda riga della barra degli strumenti si troverà un pulsante di “Insert New Graphic” con il simbolo , selezionando il quale verrà fuori una finestra di dialogo come nella Fig.3



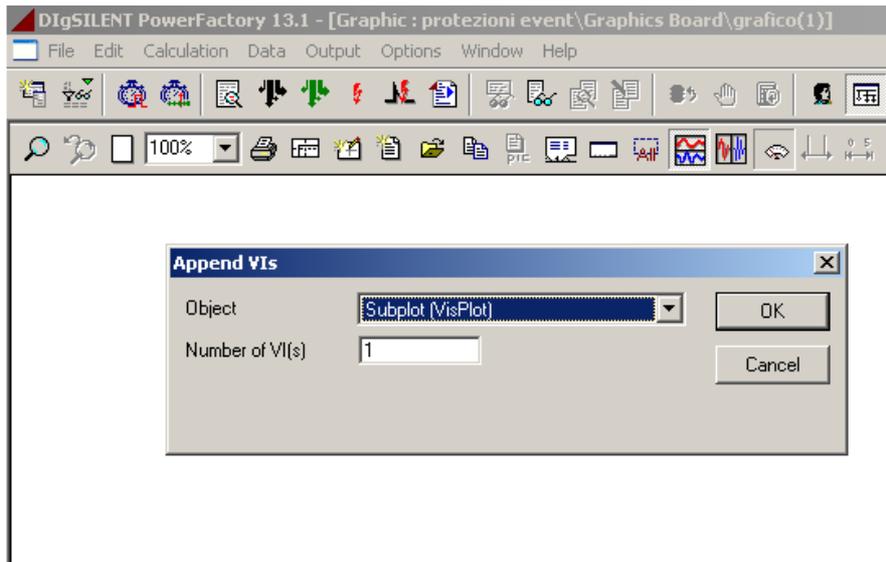
**Fig. 27: Dettaglio selezione strumenti grafici**

Nella nuova finestra comparirà una lista dalla quale bisognerà scegliere la voce “Virtual Instrument Panel” e dopo di che si potrà dare il comando di “Execute”.

Ricordiamo che DIgSilent divide l’intera schermata in due parti che chiama rispettivamente Graphic Window ed Output Window la prima corrispondente alla parte superiore dello schermo e la seconda corrispondente alla parte inferiore. A questo punto la finestra scomparirà e sul piano di lavoro sarà comparso un nuovo foglio di lavoro in cui dovranno essere posizionati i grafici.

Adesso si può scegliere quanti grafici posizionare in tale foglio selezionando il pulsante , che è disponibile solo per le pagine grafiche, che darà l’accesso ad una finestra come in Fig.4.

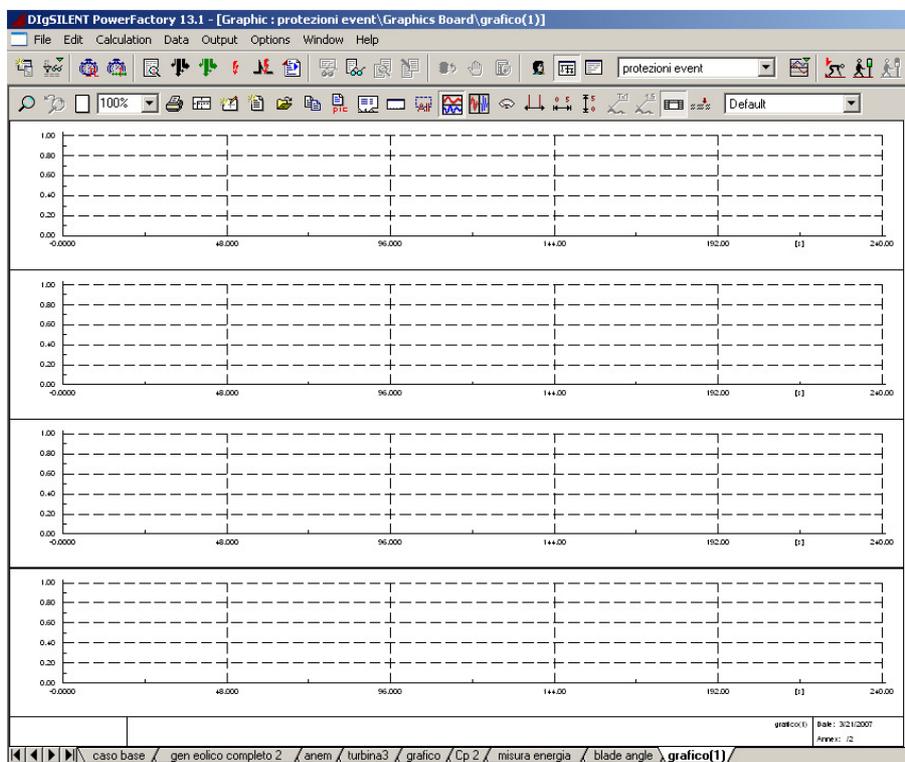
In tale finestra, alla voce “Object” sono disponibili tutta una serie di tipi di grafici, ma per gli scopi di questo capitolo si terrà conto solo della prima “Subplot”.



**Fig. 28: Dettaglio selezione del tipo di grafico**

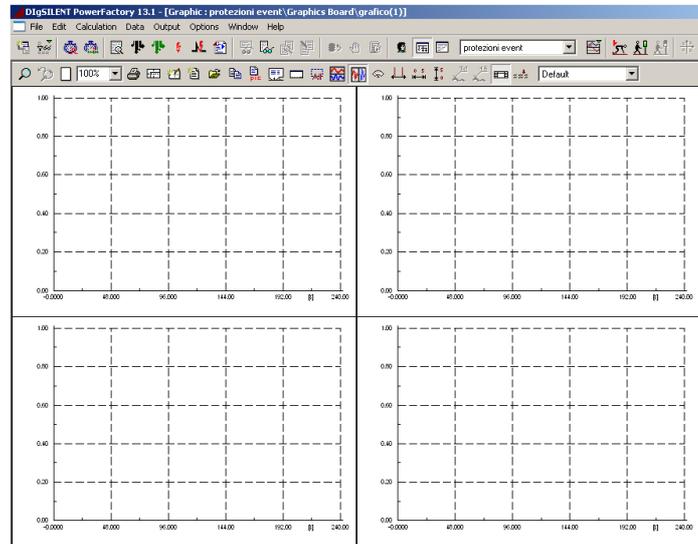
Alla voce “Number VI” bisognerà introdurre il numero di grafici che si vuole siano rappresentati assieme sullo stesso foglio.

Se si sceglie per esempio di visualizzare quattro grafici, di otterrà un risultato come nella Fig.5.



**Fig.29: Dettaglio pagina grafica**

Per ottenere una diversa disposizione dei grafici, si può selezionare il pulsante  che permetterà una disposizione come in Fig.6.

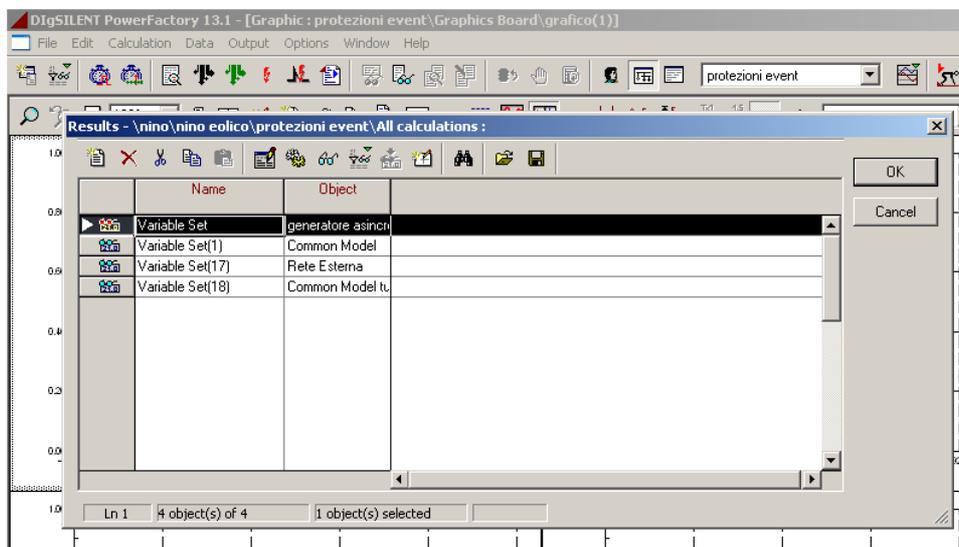


**Fig. 30: Dettaglio pagina grafica con diversa disposizione**

Per ognuno dei quattro grafici bisognerà definire la grandezza che si vuole rappresentare; e questo può essere fatto eseguendo i due punti descritti a seguire:

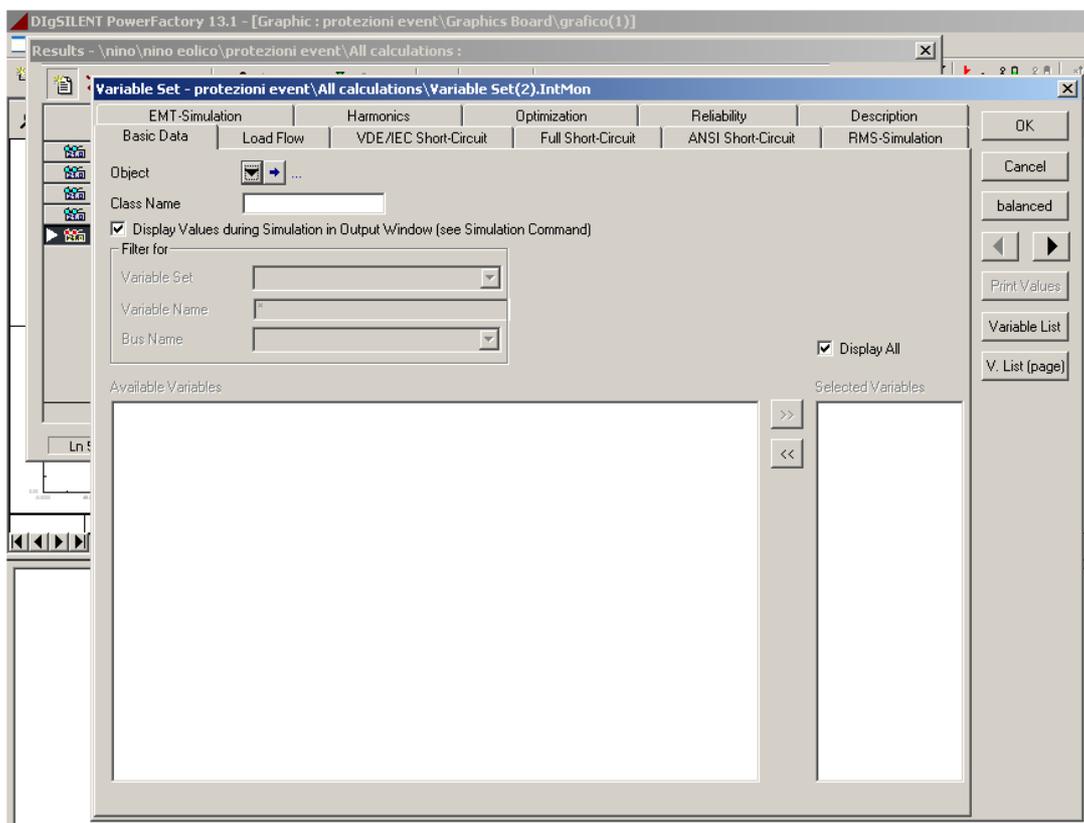
Punto 1) Il primo punto richiede di inserire in un elenco tutte le grandezze di interesse e questo può essere fatto nella maniera seguente.

Si selezioni il pulsante , che si trova nella prima riga della barra degli strumenti, per accedere ad una nuova finestra come si vede in Fig.7.



**Fig.31: Dettaglio elenco componenti con grandezze visualizzabili**

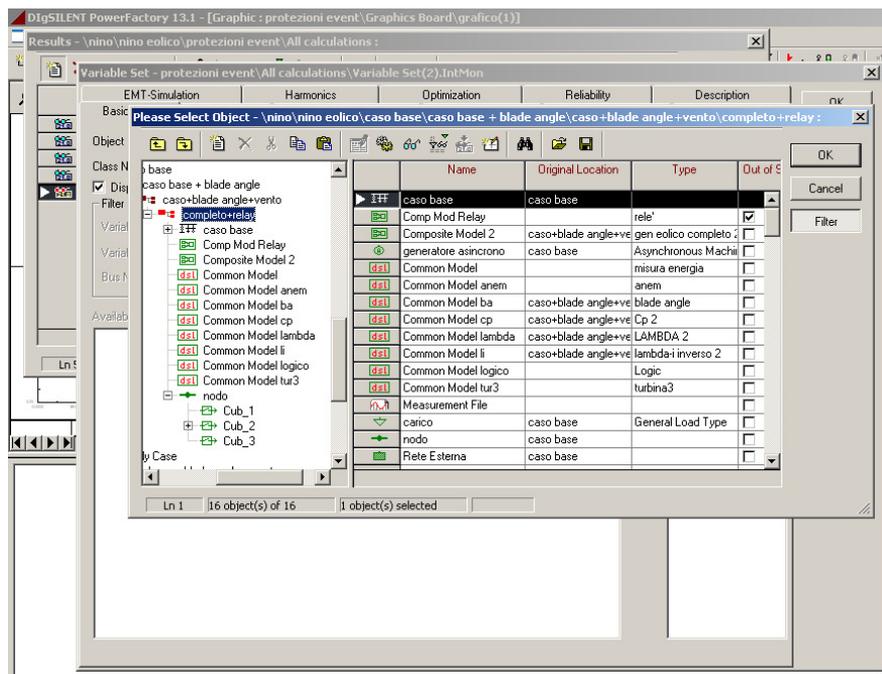
Per poter rappresentare una generica grandezza, bisogna sapere a quale elemento della rete essa appartenga, e quindi bisognerà introdurre tale elemento nella colonna “Object”, selezionando il tasto  con un singolo click e così facendo si aprirà una nuova finestra, come in Fig.8.



**Fig.32 . Dettaglio scheda selezione grandezze da visualizzare**

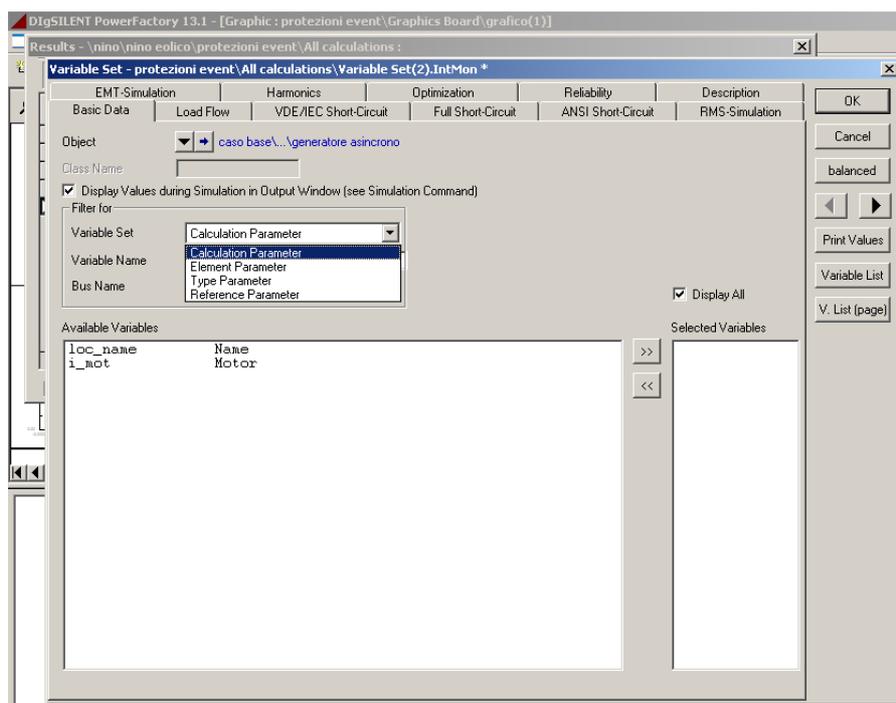
Alla voce “Object”, selezionando il pulsante  verrà fuori un menù attivo dal quale bisognerà scegliere la voce “Select”. Questa selezione permetterà di determinare quale componente della “Grid”, e non importa se è oppure no un componente elettrico, si vuole introdurre nella lista.

Avendo dunque selezionato la voce Select, verrà fuori una finestra (Fig.9) che invita alla scelta del componente desiderato. Si ricorda che la scelta deve essere effettuata nella finestra di destra selezionando uno dei pulsanti recanti il simbolo.



**Fig. 33 : Dettaglio scelta di componente**

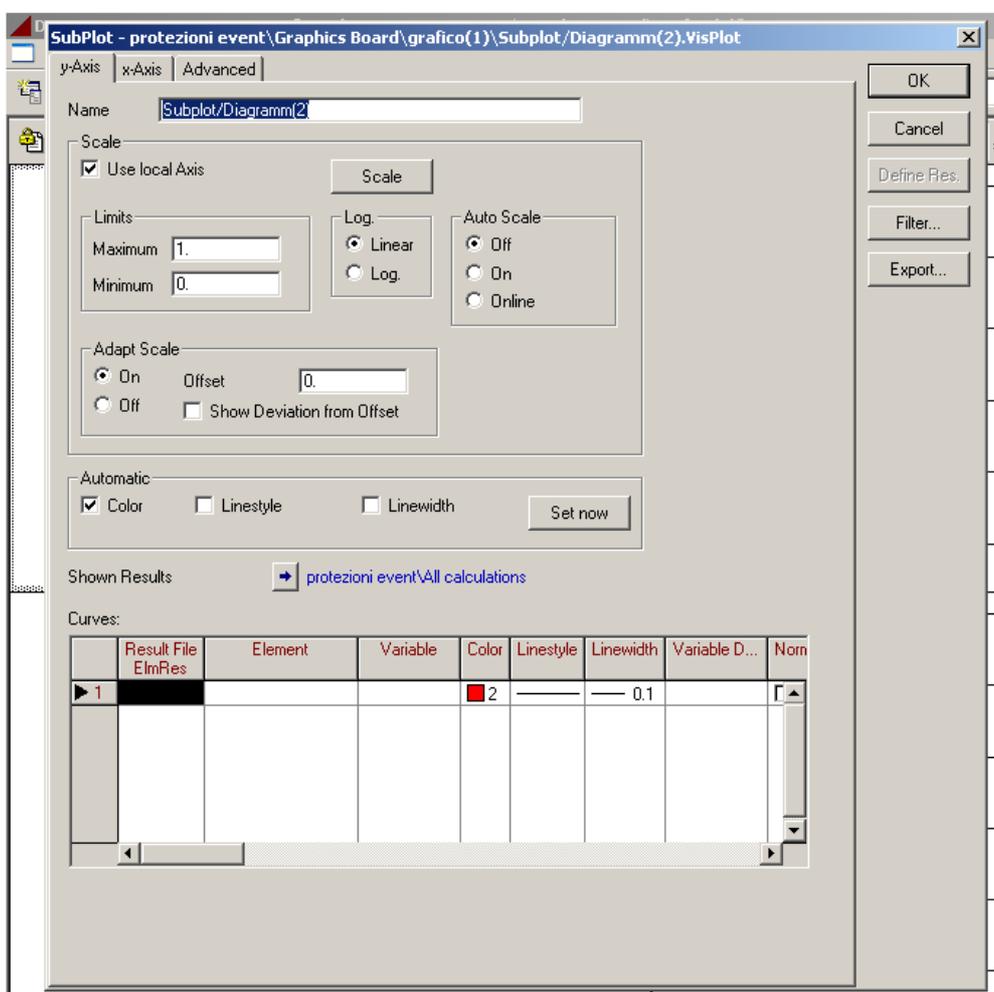
Premendo Ok si ritornerà alla precedente finestra e si noterà come alla voce “Object” viene riportato il componente scelto, mentre nella sezione centrale della stessa finestra è adesso attiva la voce “Variable Set” che prima era invece inattiva. Selezionando il pulsante  verrà fuori una lista (vedi Fig.10) che riporta tutti i raggruppamenti delle grandezze relative al componente scelto.



**Fig.34: Dettaglio elenco tipi di grandezze presenti per il componente**

Per ognuna di queste liste esisterà un gruppo di grandezze che verrà elencato nella parte sottostante della finestra. Selezionando una grandezza con un doppio click, questa apparirà nella colonna di destra; un secondo modo per fare ciò è selezionare una grandezza con un singolo click e premere poi il pulsante  .

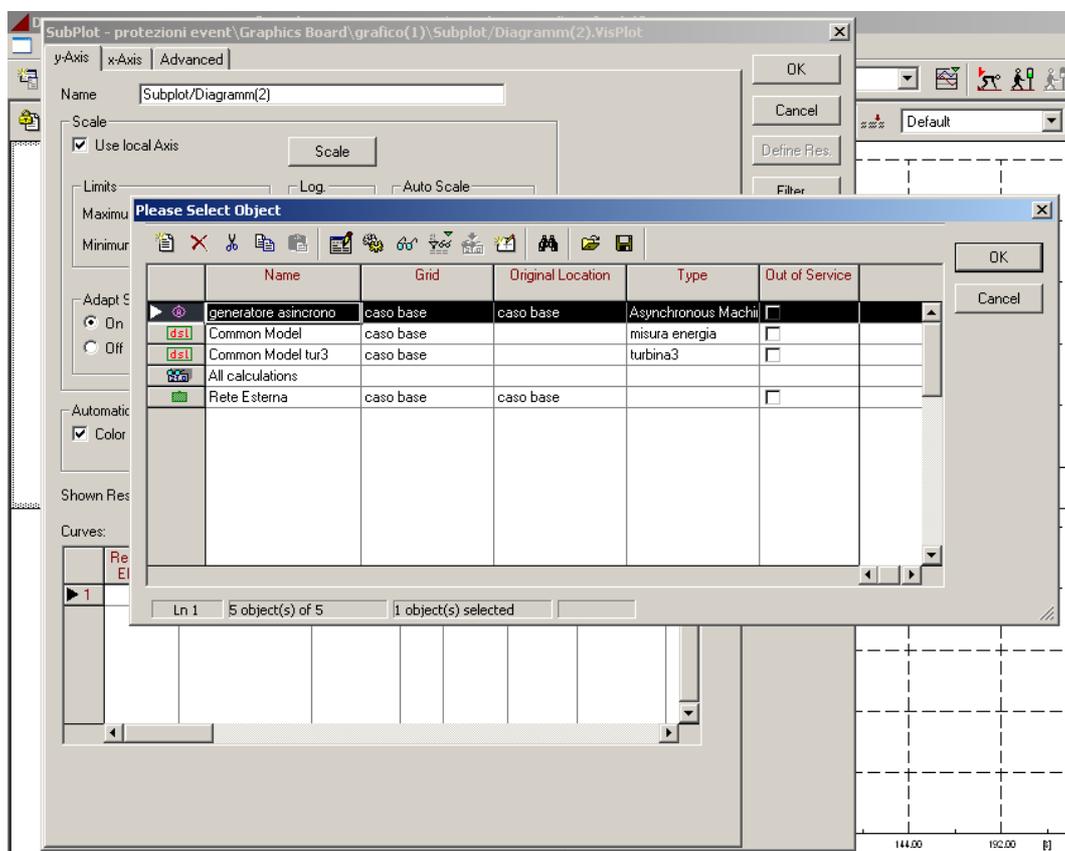
Punto 2) Si è adesso in grado di rappresentare gli andamenti delle grandezze selezionate nel foglio grafico. Portando il cursore del mouse su uno dei quattro grafici presenti sul foglio di lavoro, si proceda con un doppio click entrando così nella scheda del grafico come in Fig.11.



**Fig.35: Dettaglio scheda della pagina grafica**

Per il momento, è possibile saltare direttamente alla sezione inferiore della finestra denominata “Curves”. Procedendo con un doppio click nella casella vuota della colonna “Element” verrà fuori una finestra che conterrà tutti i componenti della rete che sono stati scelti precedentemente come si può vedere dalla Fig.12.

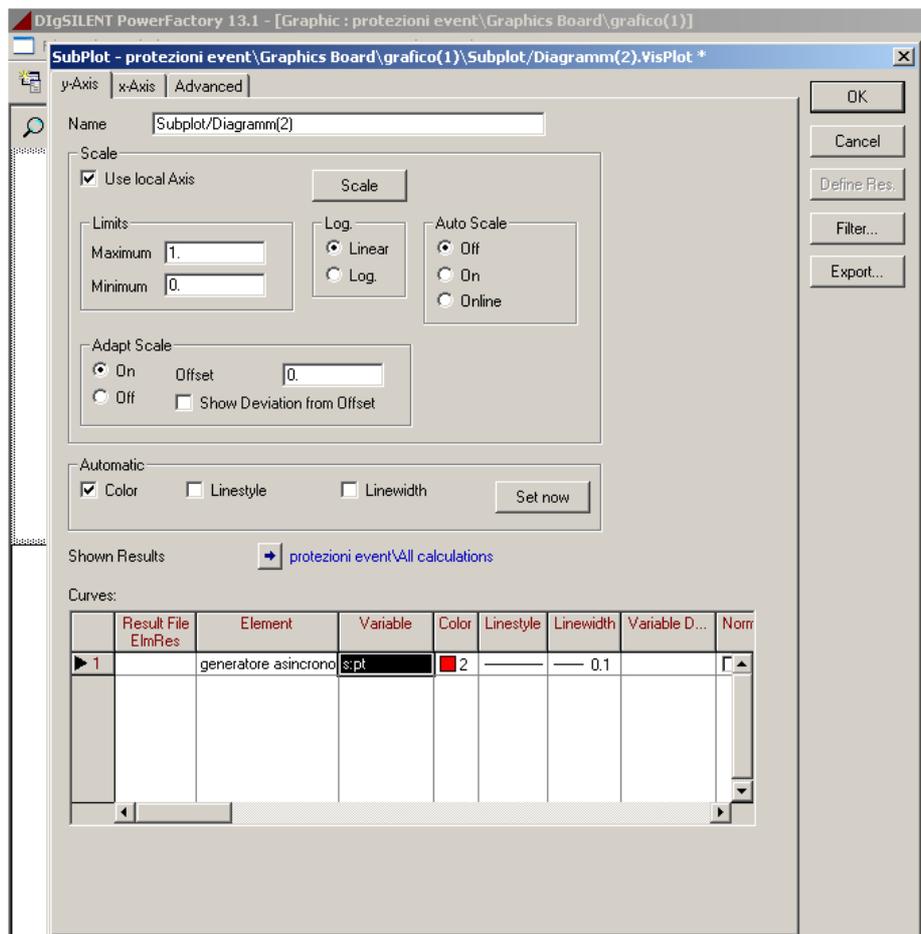
Da questa finestra bisognerà scegliere un componente, selezionandone il simbolo nella colonna a sinistra e successivamente si potrà dare l'OK.



**Fig. 36: Dettaglio scelta del componente**

Si è ritornati alla scheda del grafico e si noterà che la colonna “Element” adesso conterrà il componente che si è scelto. Per scegliere invece la grandezza che si vuole rappresentare bisognerà selezionare con un singolo click del tasto destro del mouse la casella vuota nella colonna “Variable”. Verrà fuori un menù attivo, dal quale bisognerà selezionare la voce di “Edit” che farà comparire una finestra che elenca tutte le grandezze che erano state selezionate per il componente e dalla quale se ne dovrà scegliere una semplicemente trascinando il cursore sul nome seguito da un singolo click col tasto sinistro.

Adesso la scheda del grafico comparirà come nella Fig.13.

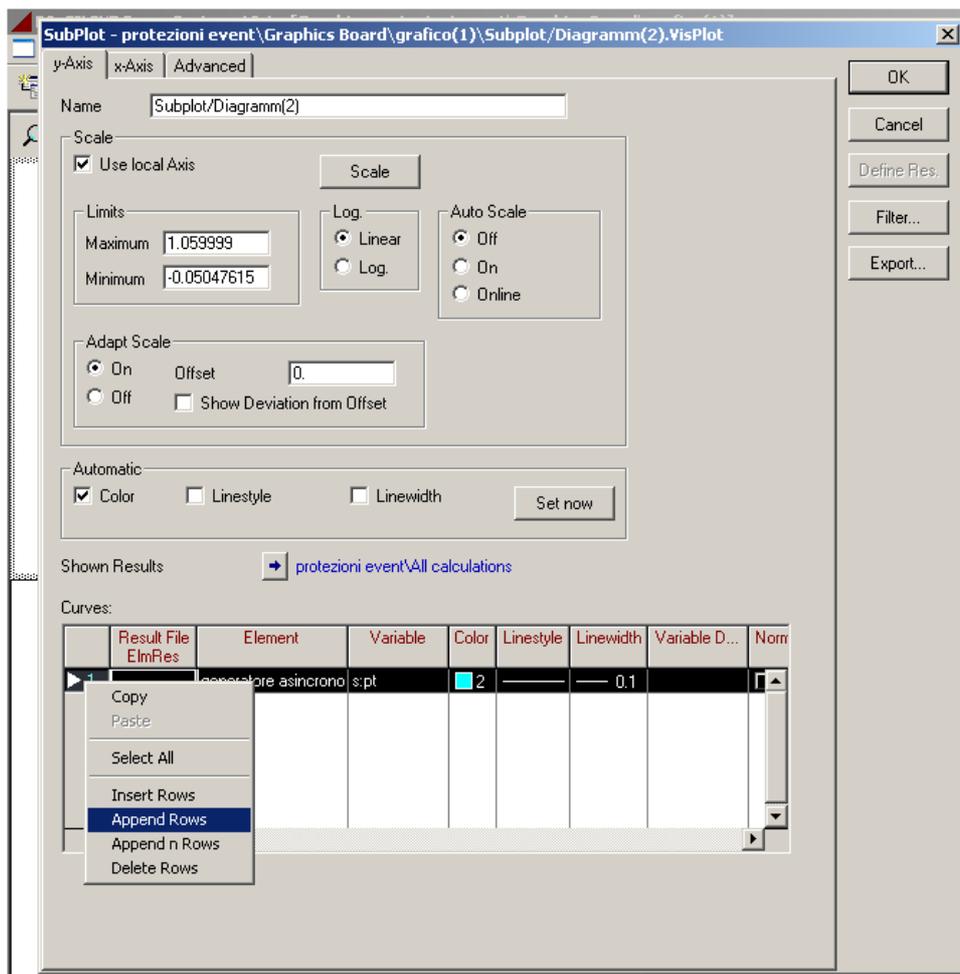


**Fig.37: Dettaglio scelta grandezza elettrica**

Selezionando OK la scheda del grafico scomparirà, mentre il grafico sul foglio di lavoro avrà in ordinata la grandezza selezionata ed in ascissa il tempo.

Nell' eventualità in cui si volessero rappresentare più grandezze nello stesso grafico, magari a scopo comparativo, bisognerà prestare attenzione agli ordini di grandezza delle due perché nel caso in cui fossero molto differenti allora solo una delle due grandezze si vedrebbe sul grafico e sarebbe quella di valore più elevato.

Comunque, si vedrà adesso come introdurre più grandezze nello stesso grafico. Si procede selezionando con un doppio click l'area del grafico entrando così nella scheda dello stesso. Successivamente andando direttamente nella sezione "Curves" si selezionerà con un singolo click del tasto destro del mouse la casella con il numero 1 facendo venir fuori una finestra di dialogo come in Fig.14.



**Fig. 38: Dettaglio selezione nuova riga**

Selezionando la voce “Append Row” comparirà una seconda linea nella sezione “Curves”, nella quale si potrà introdurre un nuovo componente nella colonna “Element” ed una nuova grandezza nella colonna “Variable”, dopo di che si potrà dare l’ OK.

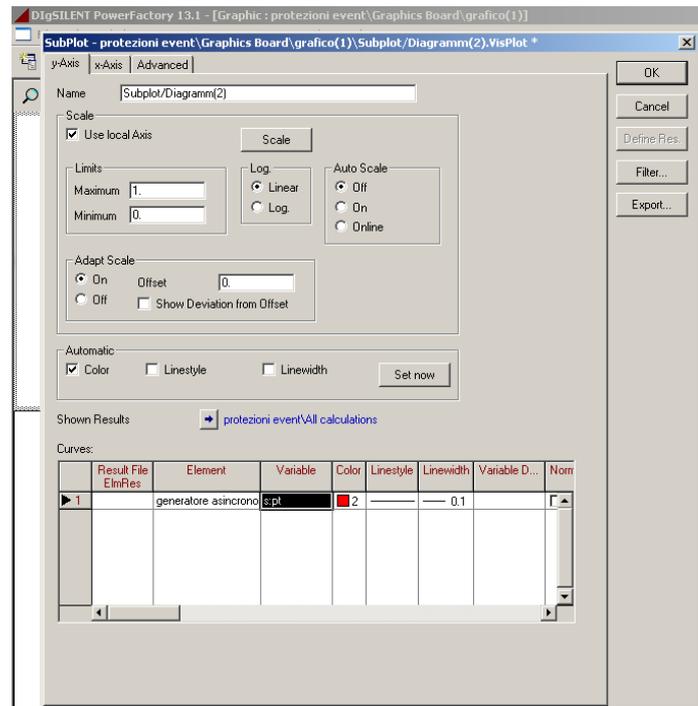
Il software provvederà a differenziare i due andamenti con diversi colori, ma nulla vieta all’utente una scelta propria dei colori, come anche dello stile della linea in tipo e spessore.

Se dalla finestra di dialogo di cui alla Fig.14 si fosse scelta la voce “Append n Rows” sarebbe venuta fuori una seconda finestra con la richiesta di un valore numerico per ‘n’ dopo di che premendo OK n righe sarebbero comparse nella sezione “Curves”.

Ritornando al foglio grafico, si potrà notare come ogni grafico abbia in ascissa il tempo espresso in secondi, impostato per default dal software.

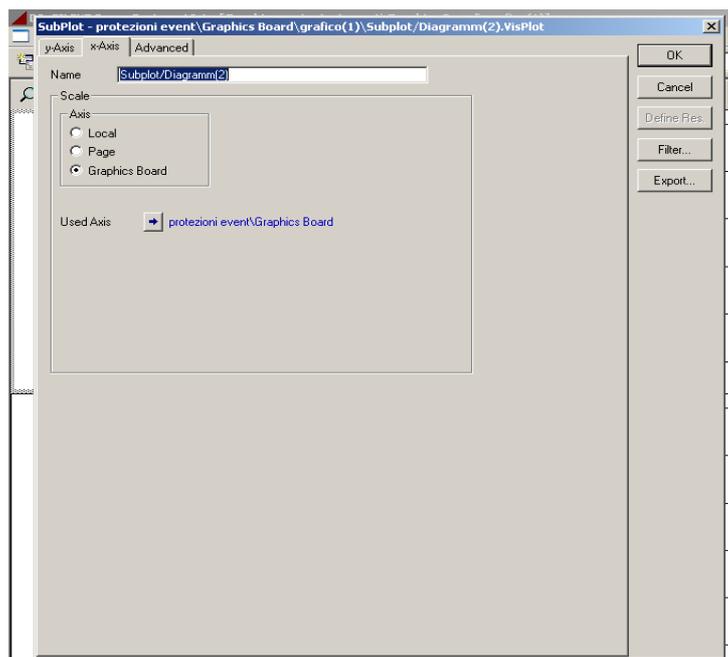
Reimpostare diversamente tale asse delle ascisse, si potrà procedere nel seguente modo.

Con il solito doppio click sul grafico si accederà alla scheda dello stesso come in Fig.15.



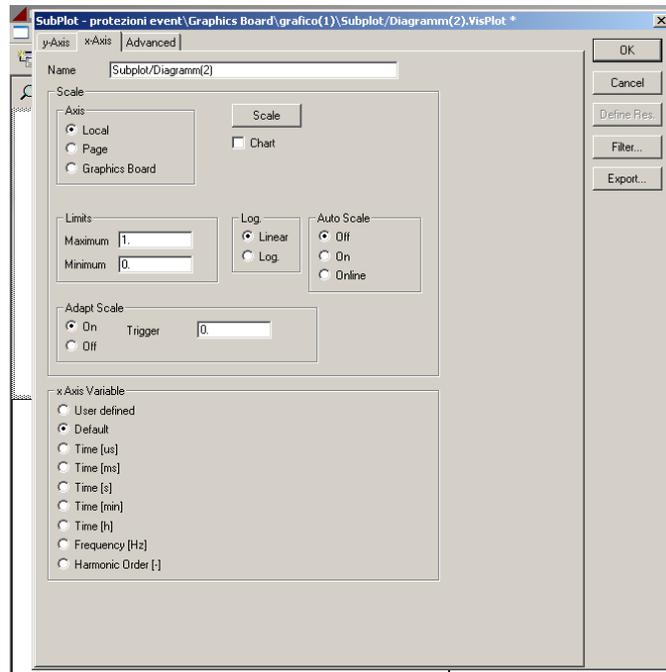
**Fig.39: Dettaglio scheda grafica**

Si può notare come tale scheda abbia tre sotto cartelle (nella parte superiore della scheda); ebbene, per effettuare la variazione bisognerà passare alla cartella “x-Axis” che si presenterà come in Fig.16.



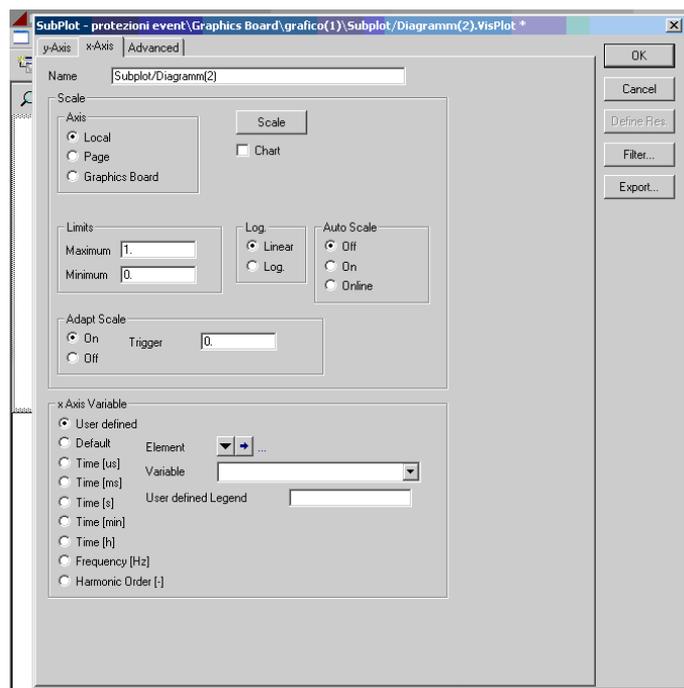
**Fig. 40: Dettaglio scheda grafica dell'asse X**

Nella sezione “Axis” bisognerà selezionare la voce “Local”, così comparirà una nuova finestra dove si dovrà descrivere il nuovo asse delle ascisse come in Fig.17.



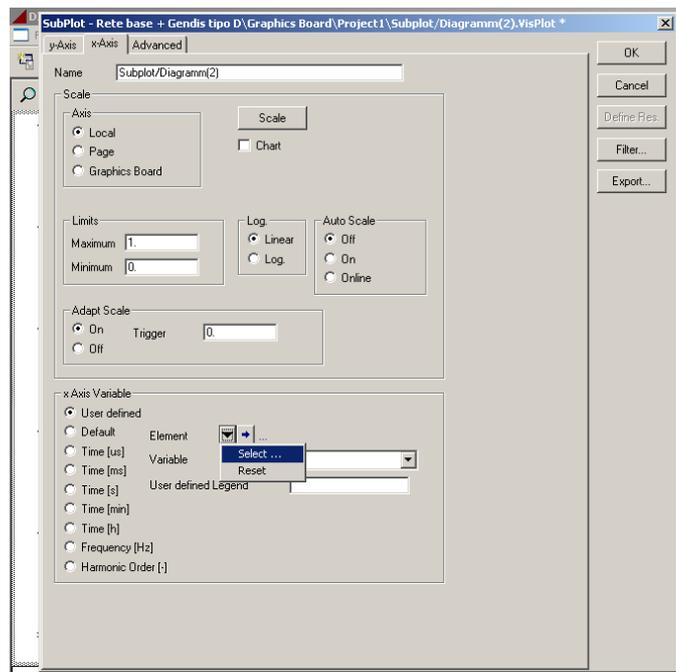
**Fig. 41: Dettaglio definizione asse X**

Si può andare adesso direttamente alla sezione “x-Axis Variable” e selezionare la voce “User Defined”, quindi la finestra si modificherà come nella Fig.18.



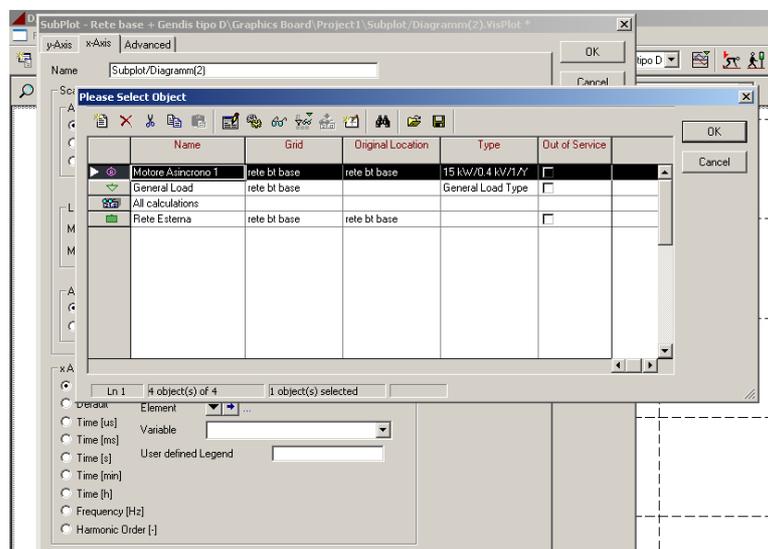
**Fig.42: Dettaglio definizione asse X**

A questo punto bisogna ricordarsi che in DIgSilent tutte le grandezze elettriche e non sono legate a dei componenti elettrici e non per cui per accedere ad una grandezza sarà necessario specificare prima il componente a cui essa appartiene. Detto ciò alla voce “Element” selezionando il pulsante  verrà fuori un menù attivo come in Fig.19 e dal quale bisognerà scegliere la voce “Select”.



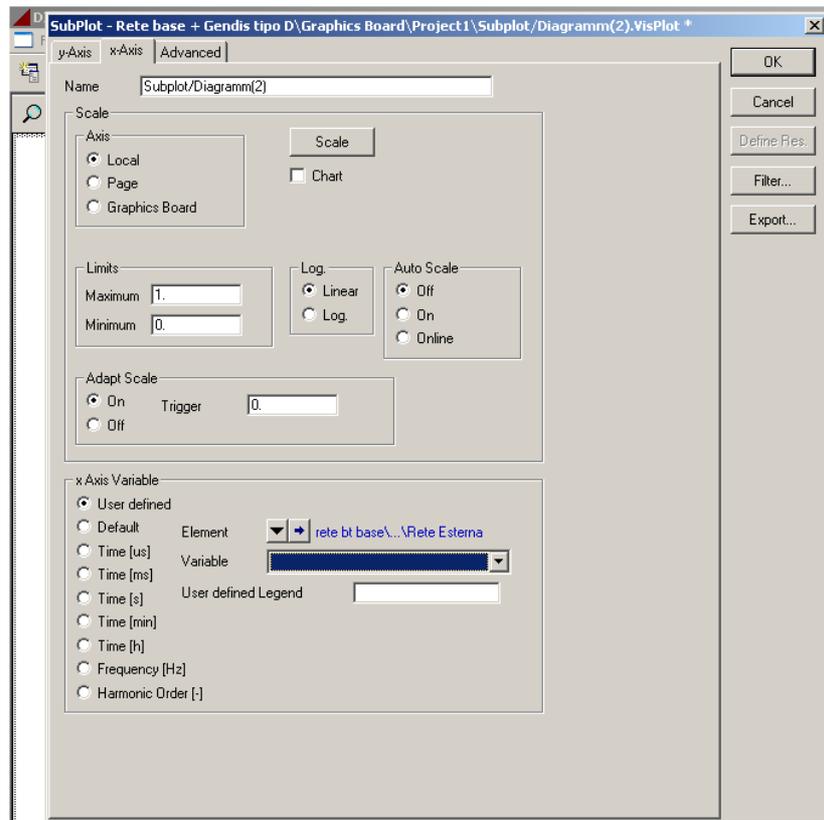
**Fig.43: Dettaglio selezione componente**

Come si può notare dalla Fig.20, la nuova finestra invita alla scelta di uno dei componenti, scelta che avviene selezionando il simbolo nella colonna di sinistra.



**Fig.44: Dettaglio elenco componenti**

Operata la scelta e dato l' OK si ritorna alla cartella iniziale, come si può vedere dalla Fig.21.



**Figura 45: Dettaglio selezione variabile per asse X**

A differenza di prima c'è il fatto che alla voce "Variable" saranno disponibili tutte le grandezze legate a quel componente scelto, che possono essere selezionate per configurare il nuovo asse delle ascisse.

Selezionando OK in questa cartella si ritornerà al foglio grafico, e si potrà notare come l'asse delle ordinate sia rimasto inalterato, mentre sarà cambiato l'asse delle ascisse del grafico.

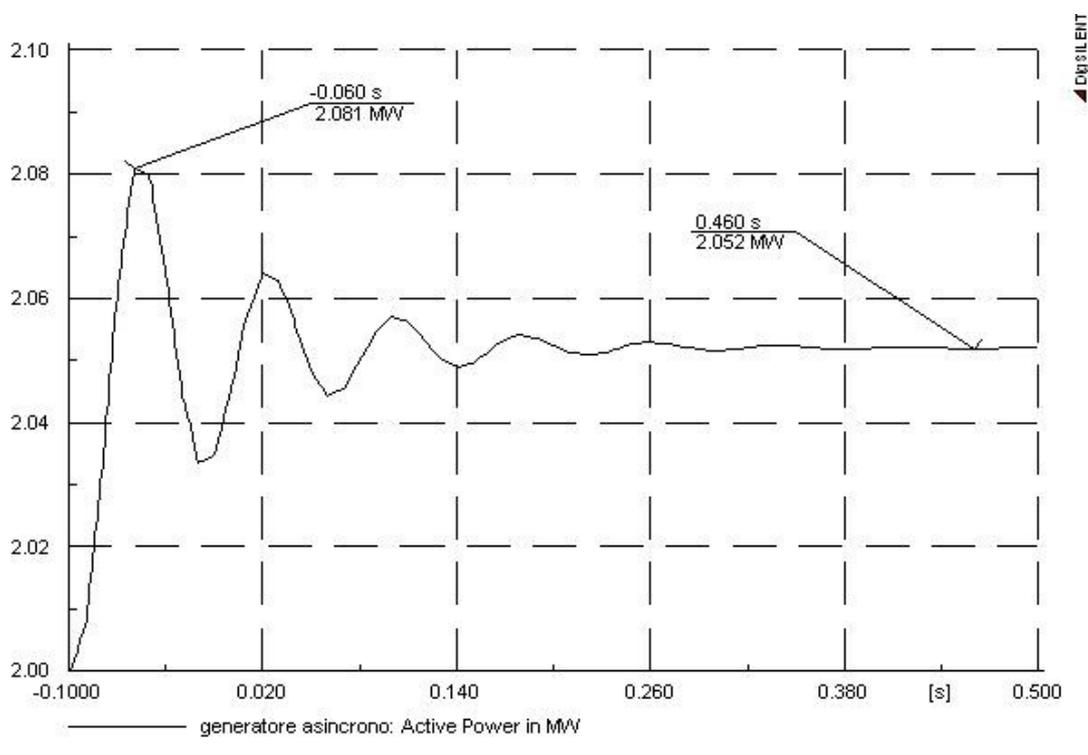
### **Paragrafo 2.7: Le simulazioni sul modello di base**

Creato così lo schema a blocchi del generatore eolico, lo si sottoporrà a simulazioni di stabilità. Nella sostanza, si applicherà un gradino di potenza meccanica all'albero del generatore asincrono con partenza da fermo.

Si analizzerà il comportamento del generatore in due finestre temporali. La prima è quella dei primissimi istanti successivi all'applicazione del gradino e che metterà in mostra la dinamica della macchina asincrona.

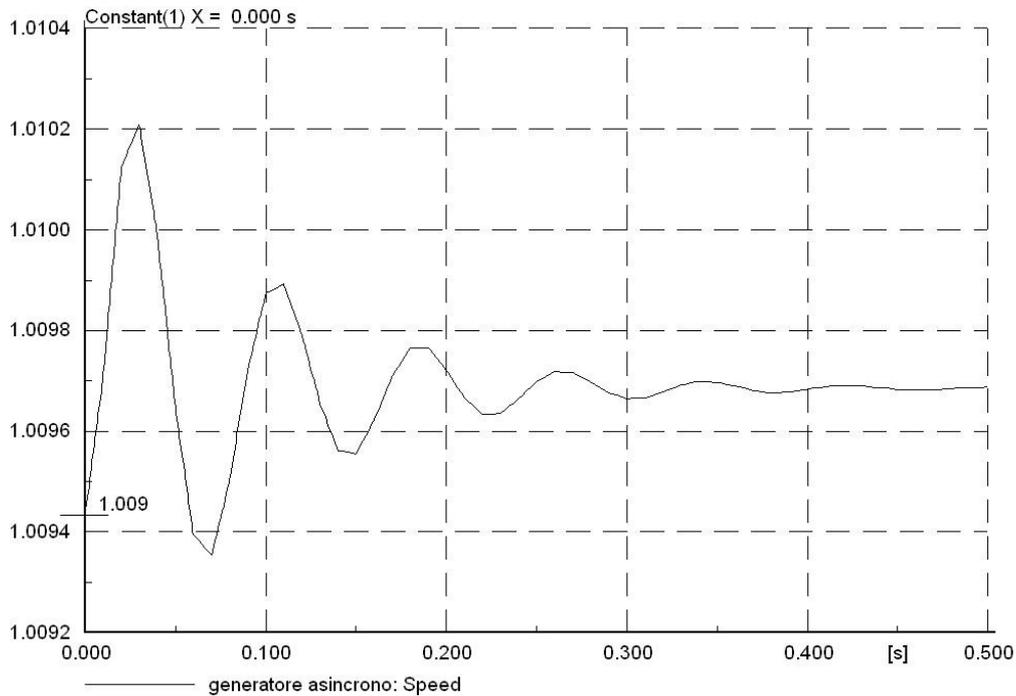
A seguire si riporteranno gli andamenti di alcune grandezze caratteristiche del sistema in studio.

Nella Fig.22 viene riportato il transitorio iniziale della potenza immessa al nodo da parte del generatore eolico. Il transitorio è presente poiché all'istante zero viene applicato un gradino di potenza meccanica all'albero del generatore asincrono (partenza da fermo).



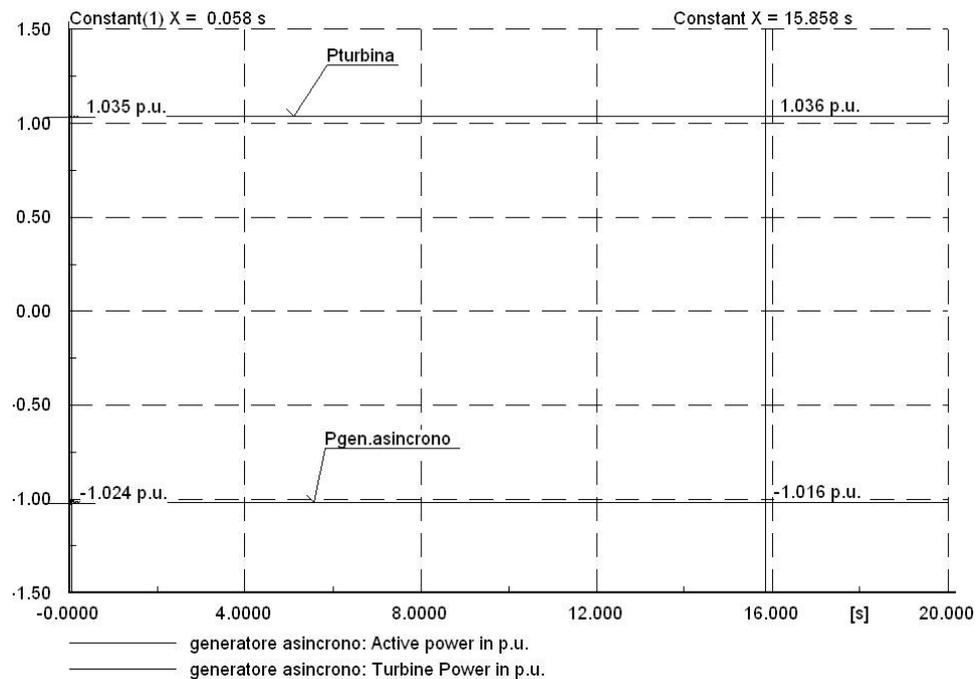
**Figura 46:potenza attiva immessa al nodo**

Nella Fig.23 si può notare come un transitorio sia presente anche nell'andamento della velocità angolare dell'albero del generatore asincrono.



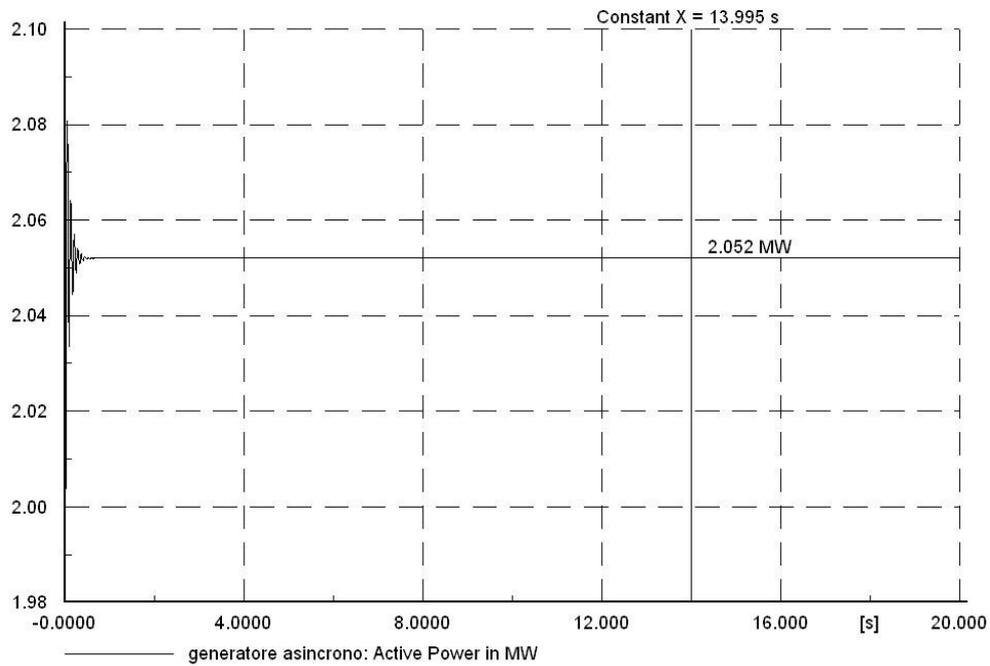
**Figura 47: velocità dell'albero motore**

La Fig.24 riporta una finestra temporale che si estende sino ai 20 s e dimostra come ogni tipo di transitorio si sia estinto.



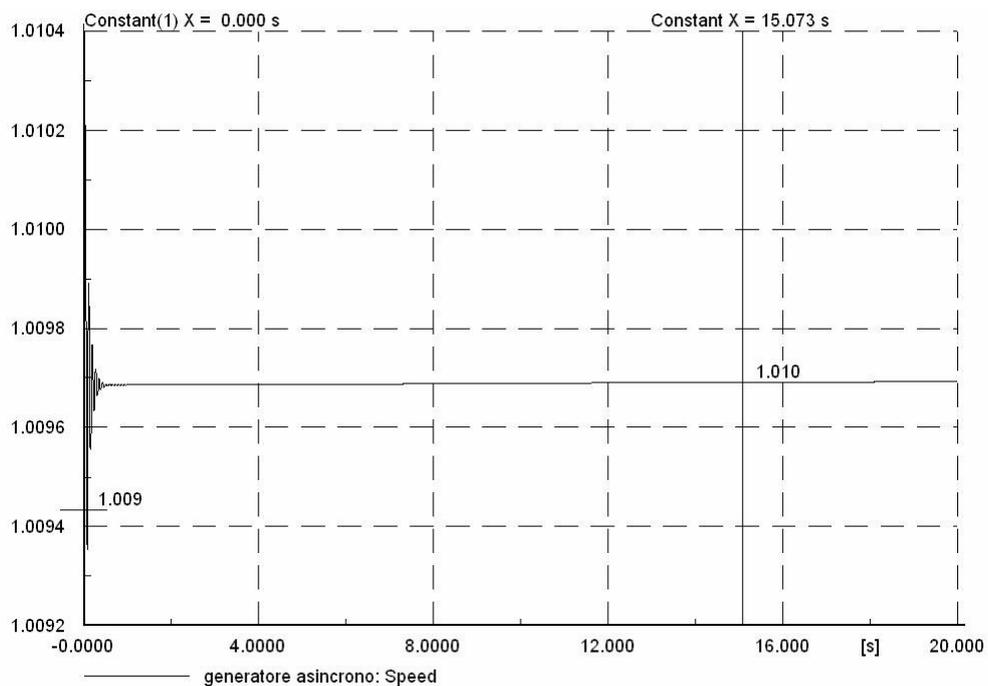
**Figura 48: potenze in ingresso ed in uscita**

Nella Fig.25 è rappresentata la potenza elettrica, con la sua u.d.m., con il suo transitorio iniziale e il suo comportamento a regime.



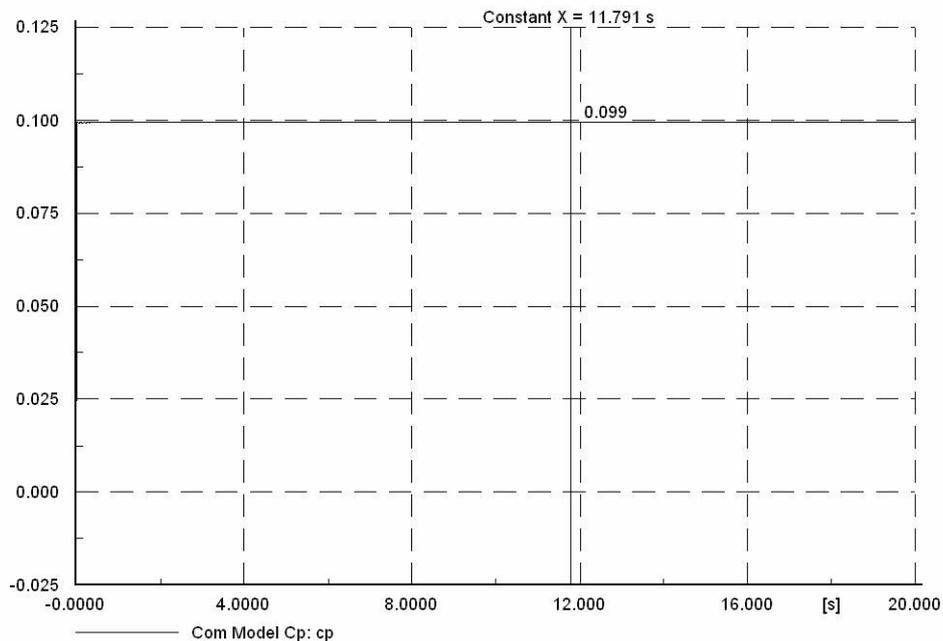
**Figura 49: potenza elettrica attiva immessa al nodo**

Analoga cosa è stata fatta per la velocità angolare in Fig.26, con la differenza che la stessa velocità è espressa in p.u..



**Figura 50: velocità all'albero della macchina asincrona**

Nella Fig.27 è rappresentato il  $c_p$  che come si vede ha valore costante poiché costanti sono le grandezze da cui dipende.



**Figura 51: coefficient of performance**

Dagli andamenti sopra riportati si possono delle informazioni importanti, come per esempio che la velocità di rotazione dell'albero a regime si mantiene costante attorno al valore nominale (il grafico presenta sulle ordinate valori in p.u. con base la velocità nominale della macchina).

Un'altra informazione è quella relativa alla potenza elettrica attiva immessa nella rete dal generatore eolico, che presenta un valore a regime di 2.05 MW, a giustificazione del fatto che il valore di vento di 15 m/s è quello che tira fuori dalla macchina la sua potenza nominale.

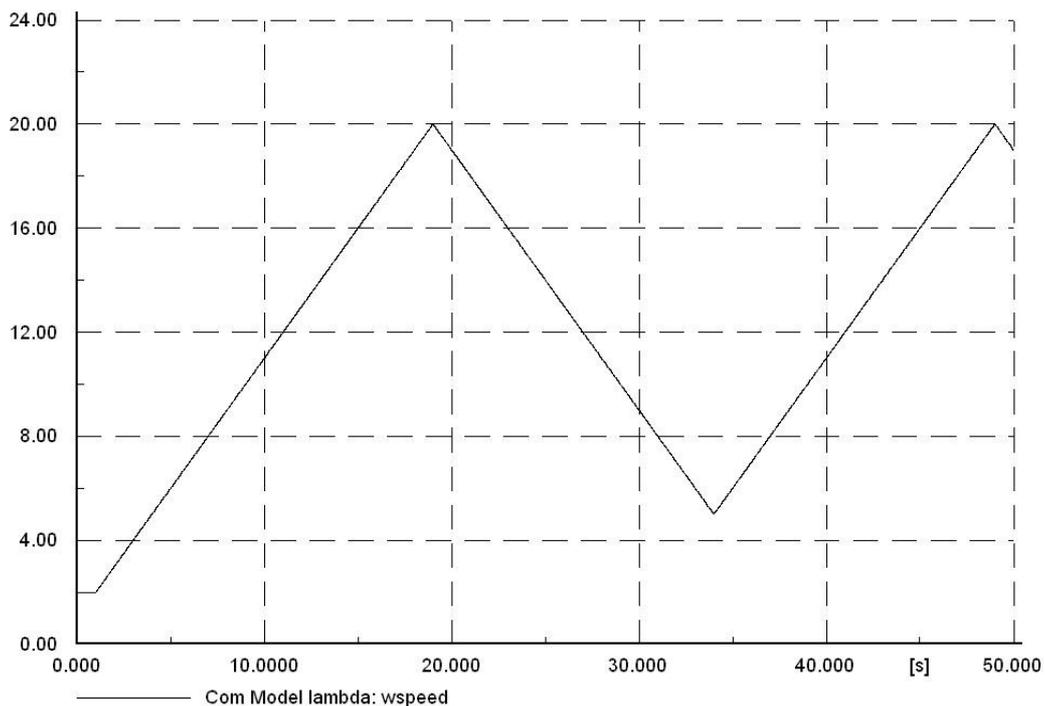
Se consideriamo adesso il grafico con le potenze  $P_t$  e  $P_{gt}$ , risulta per quest'ultima un valore negativo, probabilmente legato ad una convenzione di segno per i flussi di potenza in ingresso ed in uscita dai blocchi. Il coefficiente  $c_p$  è molto piccolo. Questa informazione la si trae dal confronto di tale valore con il valore massimo dello stesso coefficiente che è di 0.59 (detto limite di Betz) oppure con il valore ottimale pari a circa 0.43. Quest'ultima informazione è nella realtà poco significativa, in quanto si sta lavorando con un modello approssimato nel quale sono state ipotizzate costanti quelle grandezze che influiscono sullo stesso  $c_p$ .

**Paragrafo 2.8:** Modello base con vento variabile

In questo nuovo caso, lo schema a blocchi del generatore eolico rimane inalterato, solo che si andrà a riempire il blocco relativo al vento. Si prepara anzitempo un file di testo con un certo profilo di vento per un tempo di circa 50 s ( la durata non è vincolante ai fini della simulazione, motivo per cui si potrebbero introdurre profili di vento anche di ore ) dopo di che si fa in modo che il blocco vuoto attinga i suoi valori da tale file.

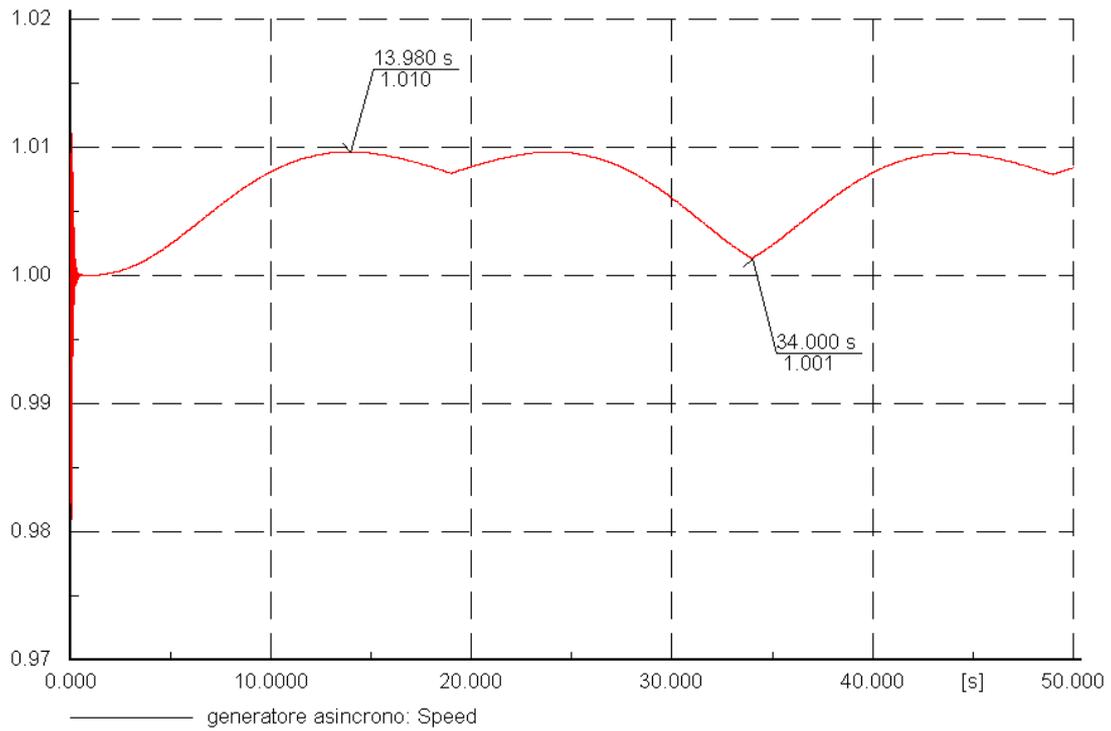
Questa volta, a differenza della precedente, ci interesseremo ad una sola finestra temporale, al fine di vedere come la velocità del vento influisce sulla produzione di potenza meccanica e quindi elettrica.

Nella Fig.28 si nota che per il profilo del vento si è scelta una variabilità abbastanza regolare nel tempo ma che ricopre comunque l'intero intervallo di funzionamento delle velocità della macchina.



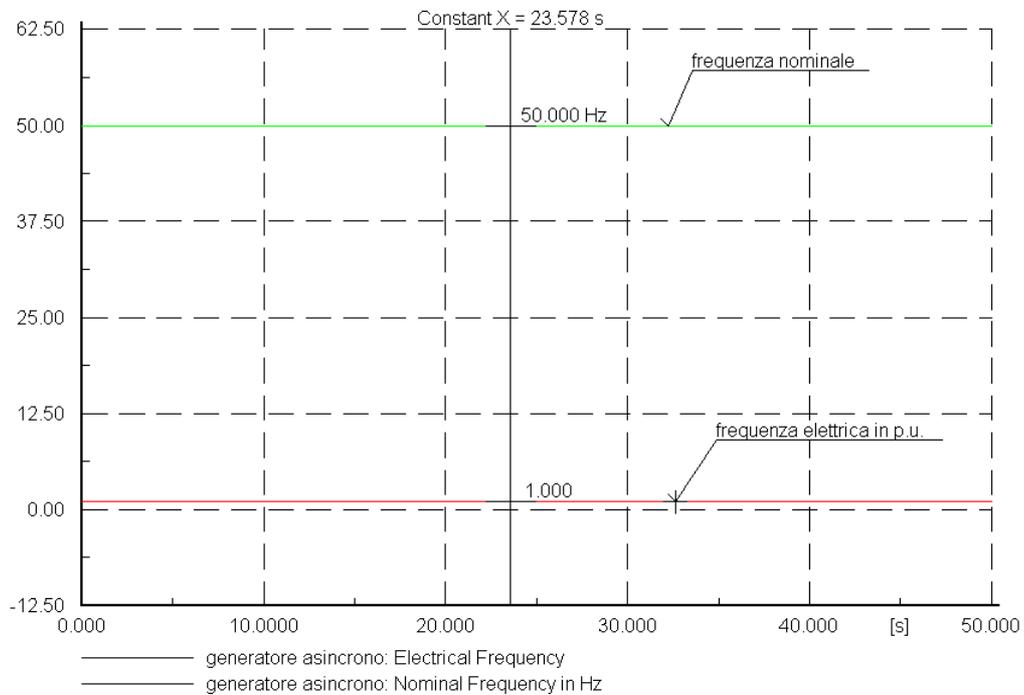
**Figura 52: andamento del vento**

Nella Fig.29 è riportata invece la velocità di rotazione dell'albero della macchina asincrona, e si può notare come essa vari in un intervallo di velocità ampio solo l'1% del valore nominale.



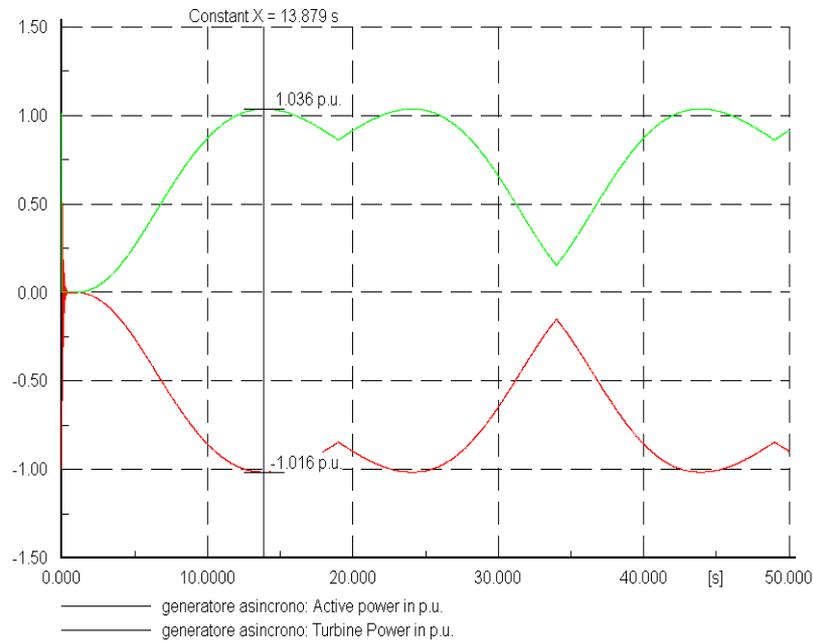
**Figura 53: velocità all'albero**

E' importante notare come la frequenza elettrica si mantenga costante ai 50 Hz (Fig.30).



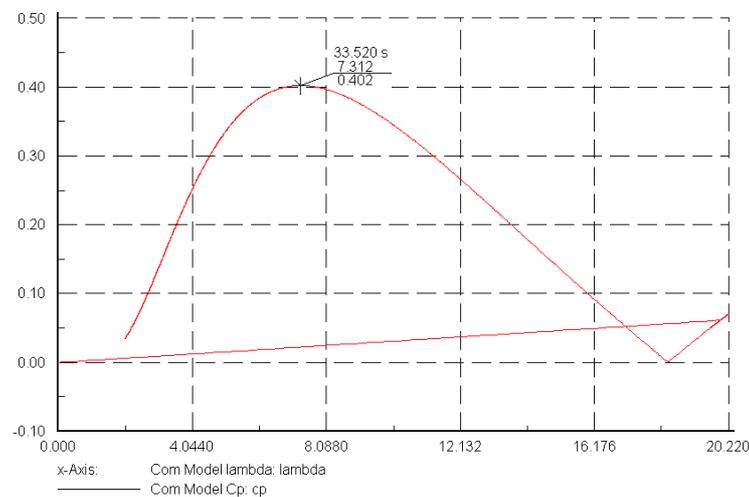
**Figura 54: Andamenti delle frequenze**

Nella Fig.31 sono riportati gli andamenti delle potenze  $P_t$  e  $P_{gt}$ , rispettivamente in ingresso ed in uscita dalla macchina asincrona.



**Figura 55: Potenze in ingresso ed in uscita**

Si può notare come il picco di produzione di potenza si attesti a 2.03 MW, ovvero circa uguale alla potenza nominale della macchina. L'ultimo grafico (Fig.32) che viene riportato è quello del coefficiente  $c_p$ , in funzione però del fattore  $\lambda$  e si può notare la sua dipendenza dalla velocità del vento. In questa curva manca ancora la dipendenza di  $c_p$  dall'angolo  $\vartheta$ , che non farà altro che agire sui picchi.



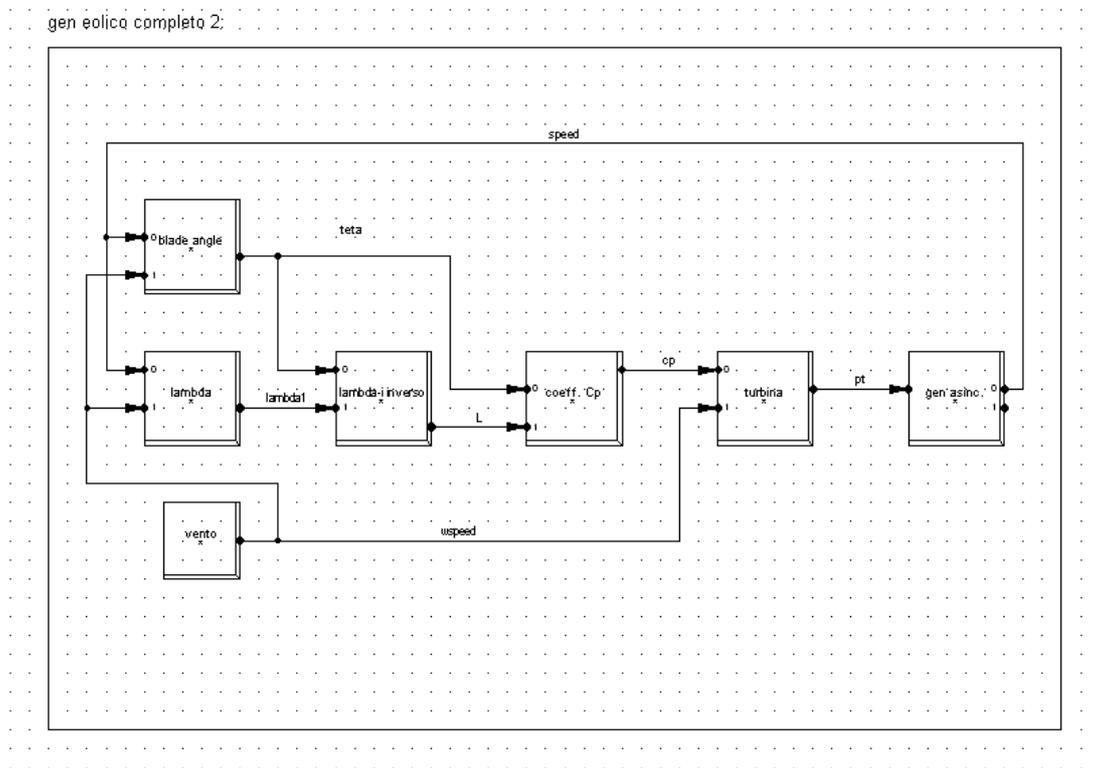
**Figura 56: Coefficient of performance**

**Paragrafo 2.9:** Modello base, Vento variabile, Pitch control

L'ultimo passo di modifica dello schema a blocchi del generatore eolico sarà quello di introdurre un blocco per il calcolo del blade angle per ogni singolo valore della velocità del vento. Inoltre, sarà modificata la funzione di trasferimento che calcola il coefficiente  $c_p$ . Tale ultima modifica consentirà al blocco turbina eolica di lavorare sempre con il valore ottimale di  $c_p$  per qualsiasi valore della velocità del vento.

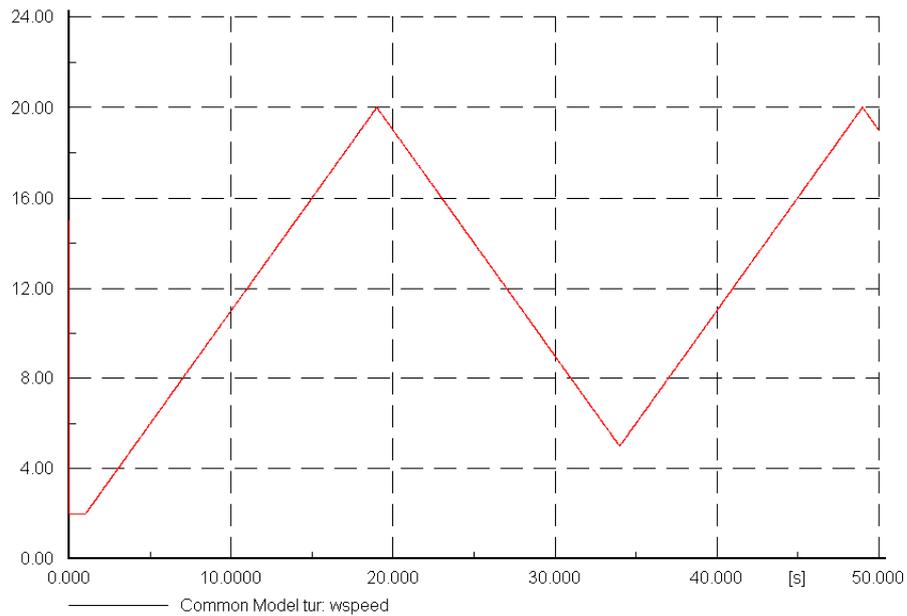
Queste due modifiche conducono, nella realtà, ad una variazione della incidenza delle pale della turbina, rispetto alla direzione del vento al fine di aumentarne l'efficienza.

A seguire si riporta lo schema a blocchi nella sua forma finale (Fig.33)



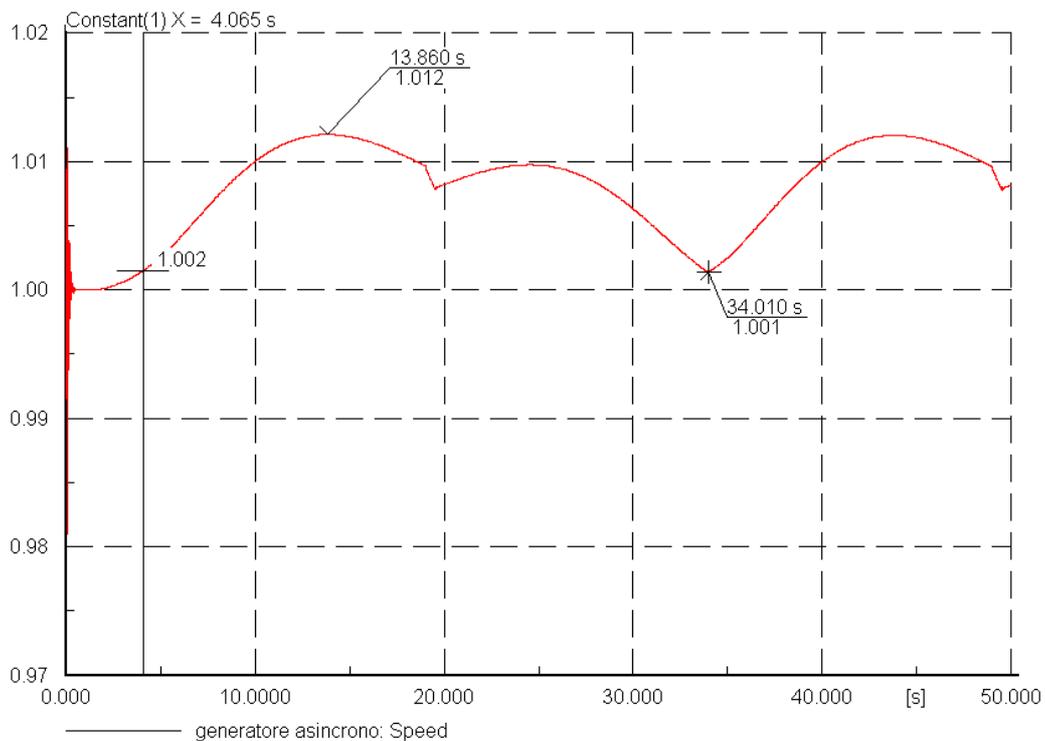
**Figura 57: Schema a blocchi finale del generatore eolico**

Come nei due casi precedenti si riportano di seguito gli andamenti di alcune grandezze caratterizzanti l'intero schema a blocchi. Nella Fig.34 è raffigurato l'andamento della velocità del vento.



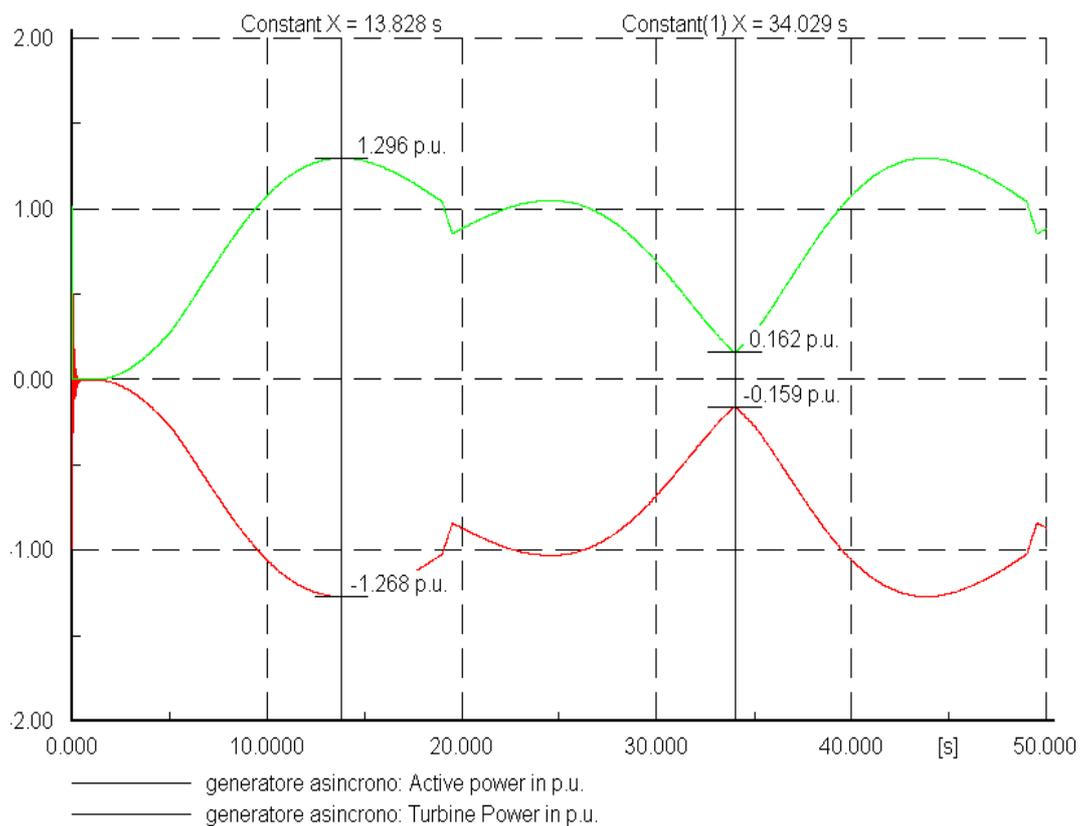
**Figura 58: profilo del vento**

Nella Fig.35 viene riportata la velocità angolare dell'albero della macchina asincrona, esprimendola in p.u.. Non è possibile scegliere le u.d.m. per le grandezze interne ai singoli componenti elettrici; è possibile, stabilita una base, sceglierle per le grandezze interne ai blocchi DSL.



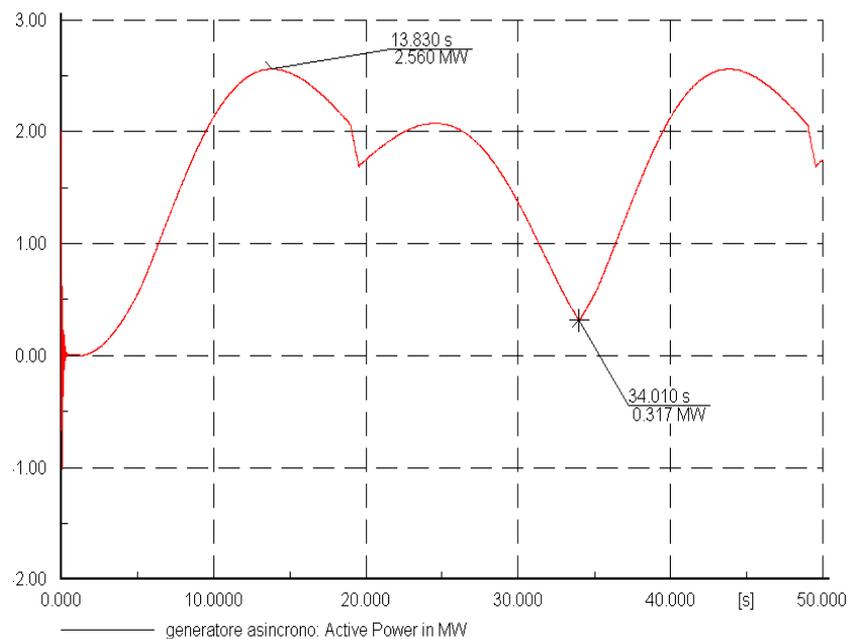
**Figura 59: velocità all'albero**

Nella Fig.36 vengono riportate la potenza attiva immessa al nodo dal generatore e la potenza della turbina eolica, entrambe espresse in p.u.. Confrontando tale grafico con quello riportato in Fig.31 si potrà notare una prima differenza negli andamenti di entrambe le potenze attorno ai 20 s. Una seconda differenza la si può trovare confrontando i valori di picco. La ragione della prima differenza sta nel fatto che il  $c_p$  ha un intervallo di valori di velocità del vento in cui si mantiene sui suoi valori massimi, una volta fuori da tale intervallo lo stesso coefficiente si degrada con ripercussioni sul rendimento della conversione energia eolica-energia meccanica. Con il “Pitch Control” si riesce a fare in modo che il  $c_p$  abbia sempre valori elevati, al variare della velocità del vento, controllando l’angolo con cui la pala della turbina incide il vento. La seconda differenza trova spiegazione appunto con l’ottimizzazione del processo di conversione di cui sopra.



**Figura 60: potenze alla macchina**

Nella Fig.37 è riportata invece la potenza immessa in rete dal generatore espressa in MW.

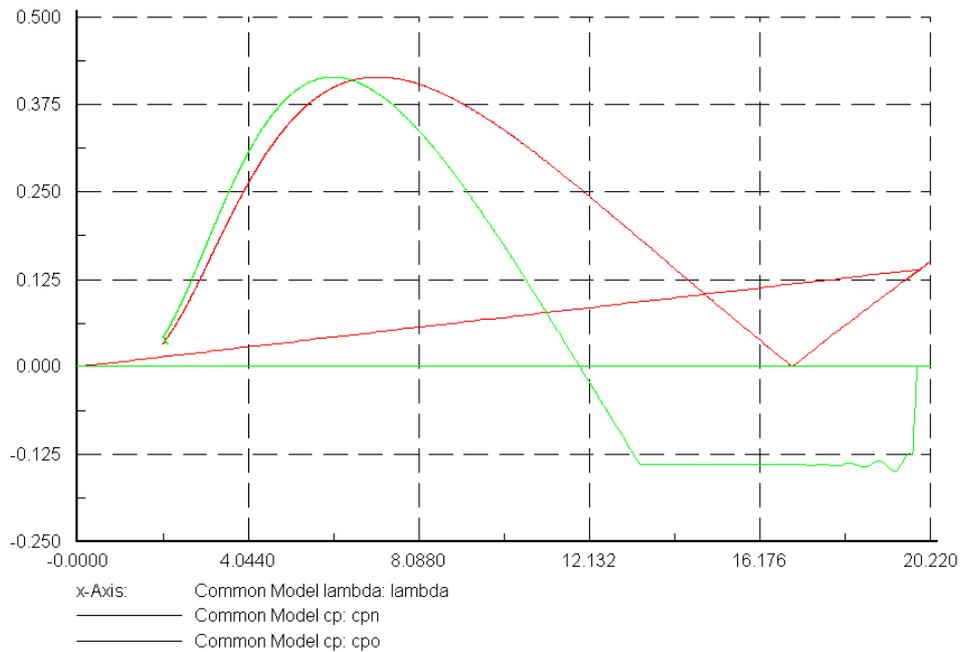


**Figura 61: potenza immessa al nodo espressa MW**

Il grafico di Fig.38 mostra due andamenti, identificati con  $c_{po}$  e  $c_{pn}$ , i quali vengono prodotti dal blocco  $c_p$ . Nel normale funzionamento dello schema a blocchi ad ogni determinato istante arriva nel blocco  $c_p$  un nuovo valore di  $\theta$  che porta ad un nuovo valore di  $c_p$ . Questo valore di  $c_p$  verrà immagazzinato in una variabile temporanea chiamata  $c_{pn}$  ( $c_p$  new). Si confronterà tale valore  $c_{pn}$  (per mezzo della funzione “SELECT” di DIgSILENT) con il valore precedente di  $c_p$  immagazzinato in un'altra variabile temporanea chiamata  $c_{po}$  ( $c_p$  old). Tale valore di  $c_{po}$  è ricavato tramite l'uso della funzione “DELAY” di DIgSILENT.

Dal confronto dei due valori di  $c_p$  si sceglierà il più grande al fine di ottenere il massimo valore di potenza meccanica all'albero per quella determinata velocità del vento.

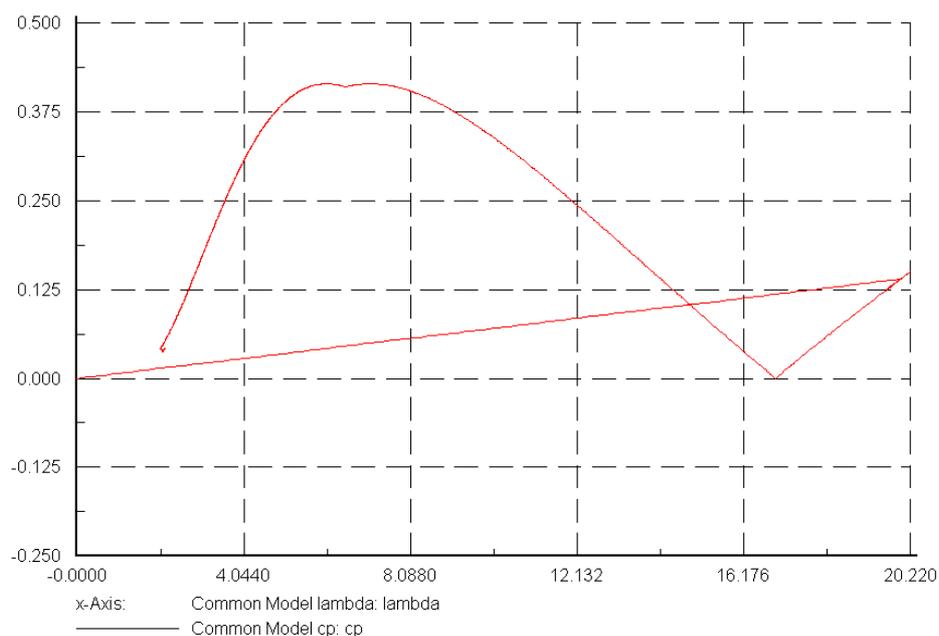
Nella realtà del generatore eolico alla scelta del  $c_p$  massimo segue un comando che ordina ad un servomotore la rotazione della pala fino al nuovo angolo  $\theta$ .



**Figura 62: Andamenti di Cpo e Cpn**

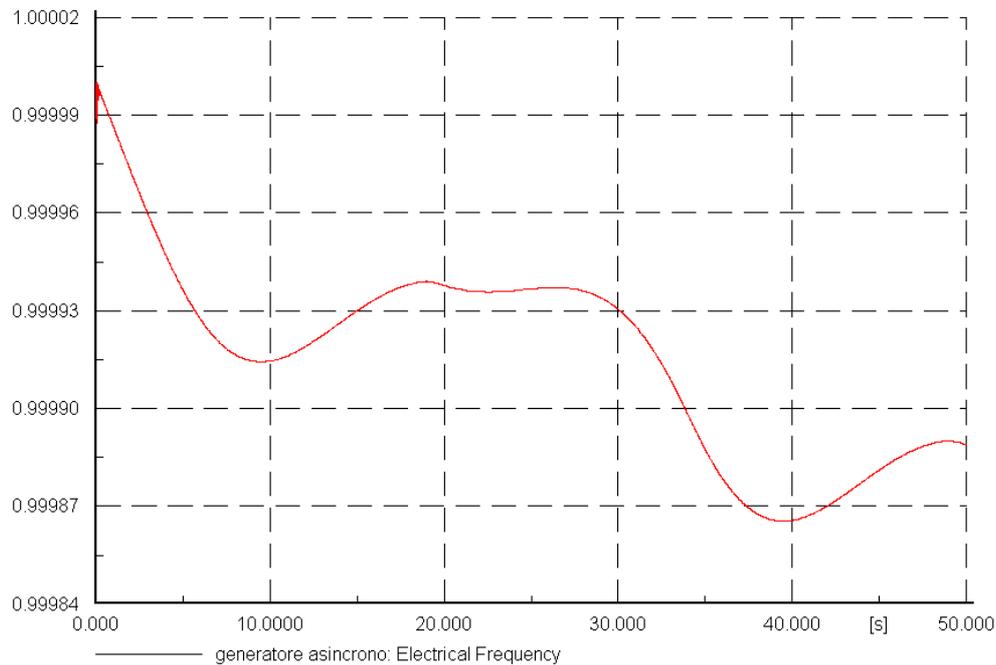
Dal grafico di Fig.39 si nota che l'andamento di  $c_p$  risultante segue la curva di  $c_{po}$  fintanto che  $c_{po}$  risulta maggiore di  $c_{pn}$  dopodichè salta sulla curva di  $c_{pn}$ .

Nonostante l'applicazione di tale processo di ottimizzazione il  $c_p$  rimane ben al di sotto del Limite di Betz di 0.59, raggiungendo il valore di 0.414. Nella letteratura dedicata a questi tipi di turbina viene considerato come valore ottimale di progetto  $c_p=0.43$ .



**Figura 63: Andamento del Cp risultante**

Si può vedere dalla Fig.40 come la frequenza delle grandezze elettriche abbia un range di variazione di circa 0.14 % rispetto al valore nominale della frequenza.



**Figura 64: Andamento della frequenza elettrica**

### **Paragrafo 2.10:** Conclusioni

In tale progetto sono stati presi in considerazione solo alcuni dei fenomeni fisici interessanti il generatore eolico e questo per un più facile approccio al problema. Molti dei fenomeni come per esempio le turbolenze del vento vicino alla turbina, la direzionalità del vento ed infine tutte le perdite per attrito tra parti in movimento sono state trascurate anche perché più difficili da trattare. Non sono state descritte inoltre le dinamiche legate agli organi meccanici del gruppo turbine eolica che altro non fanno che ritardare le risposte degli organi stessi. Sono da ricordare effetti come la torsione dell'albero, la risposta dei servomotori che ruotano le pale( se ne dispone uno per ogni pala) etc. Nonostante tutto si è ottenuto quello che potrebbe essere un comportamento di base dello stesso generatore eolico.

Dalle simulazioni si è potuto osservare che qualunque valore di potenza attiva prodotta da quest'ultimo è una potenza che non viene prelevata dalla rete. La rete esterna deve dal canto suo sopperire sia alla richiesta di potenza reattiva del carico sia alla medesima richiesta da parte del generatore asincrono.

## **CAPITOLO 3**

### **L'INFLUENZA DELLA GENERAZIONE DISTRIBUITA SULLE RETI BT**

#### **Paragrafo 3.1:** Definizione della rete BT

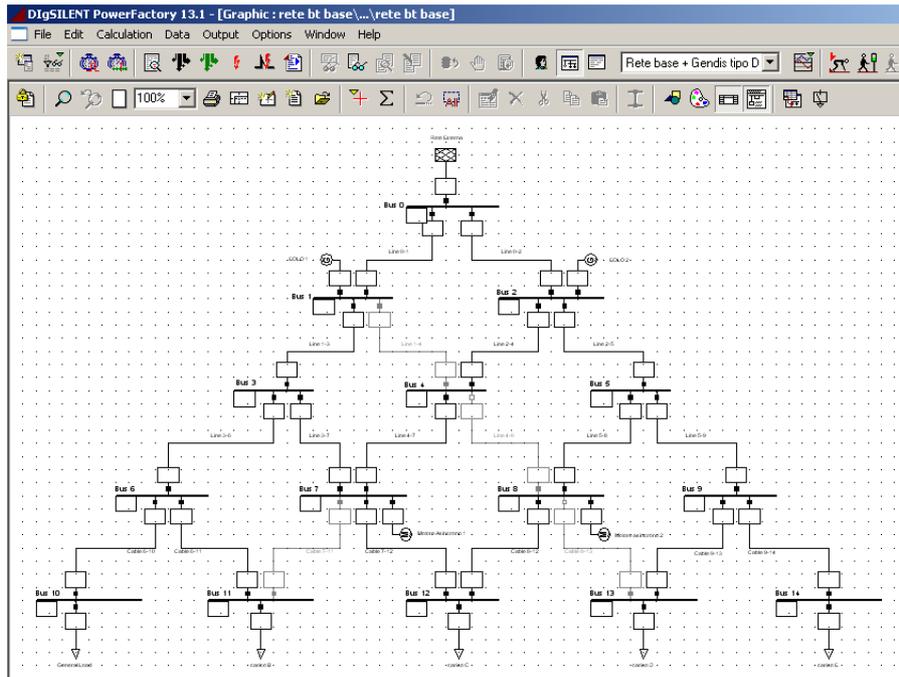
La generazione distribuita può essere classificata in base alla potenza che si vuole immettere in rete nel seguente modo:

- 1) micro per potenze inferiori a 5 kW;
- 2) mini per potenze nell' intervallo (5-50) kW;
- 3) media per potenze nell'intervallo (50-1000) kW;
- 4) grande per potenze superiori ad 1 MW e limite superiore indicativo di 10 MW.

La tipologia di rete che si vuole trattare in questo capitolo è una rete in BT di tipo rurale (e ciò per rendere più verosimile lo scenario di allacciamento della generazione eolica e di quella fotovoltaica).

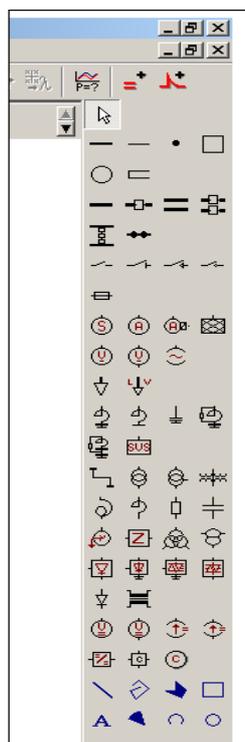
Prima ancora di iniziare bisogna precisare che nella fase di definizione della rete in studio si procederà con l'introduzione di tutti i componenti elettrici successivamente si procederà con la definizione delle grandezze elettriche che caratterizzano ogni singolo componente ed infine si passerà al dimensionamento della rete globale per verificare il rispetto di alcuni vincoli come la caduta di tensione relativa percentuale nonché la convergenza della stessa rete in una simulazione di load flow.

Il primo passo sarà quello di disegnare sul foglio di lavoro di DIgSilent lo schema unifilare della rete che si vuole studiare come appare in Fig.1.



**Fig. 65: Rete radiale BT**

I componenti elettrici saranno tutti disponibili in colonna alla destra del monitor (vedi Fig.2). Bisogna fare attenzione al fatto che mentre alcuni componenti, come i nodi, possono essere trascinati semplicemente sul foglio di lavoro altri, come linee o trasformatori, richiedono di essere allacciati ai rispettivi nodi.



**Fig. 66: Dettaglio componenti elettrici**

Disegnato lo schema unifilare, sarà possibile procedere con la fase di allacciamento dei carichi. Il problema da risolvere è quello di capire quanti e quali carichi si vogliono collegare ai vari nodi della rete BT.

In linea generale, il limite di potenza per il quale risulta conveniente considerare la fornitura di energia elettrica in MT piuttosto che in BT è pari a circa 100 kW.

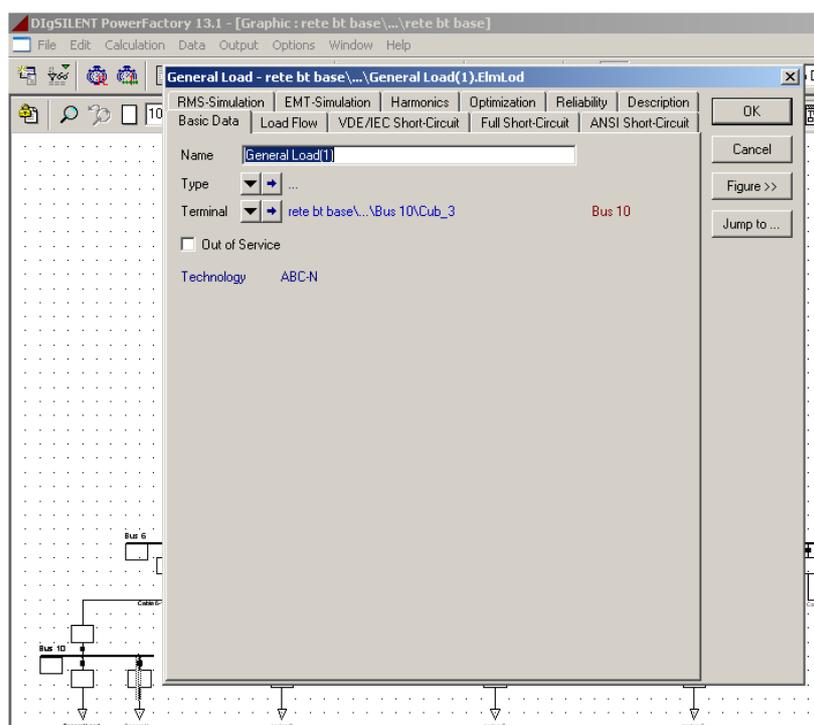
In uno scenario rurale, le tipologie di carico che è possibile trovare sono carichi di piccola taglia che assorbono solo potenza attiva (considerando trascurabile la potenza reattiva) come per esempio avviene nell'ambiente domestico, oppure ancora carichi che assorbono entrambe le potenze attiva e reattiva e che possono richiedere eventualmente un rifasamento come avviene per esempio nelle piccole officine.

Ai nodi dal 10 al 14 sono stati allacciati carichi monofase (uno per ogni nodo) con potenza di 9 kW che stanno a rappresentare agglomerati di abitazioni. Questi carichi verranno posizionati ai margini inferiori dello schema unifilare.

Ai nodi 7 ed 8 vengono inseriti due carichi che assorbono potenza attiva e reattiva come i motori asincroni e che vogliono simulare dei carichi industriali.

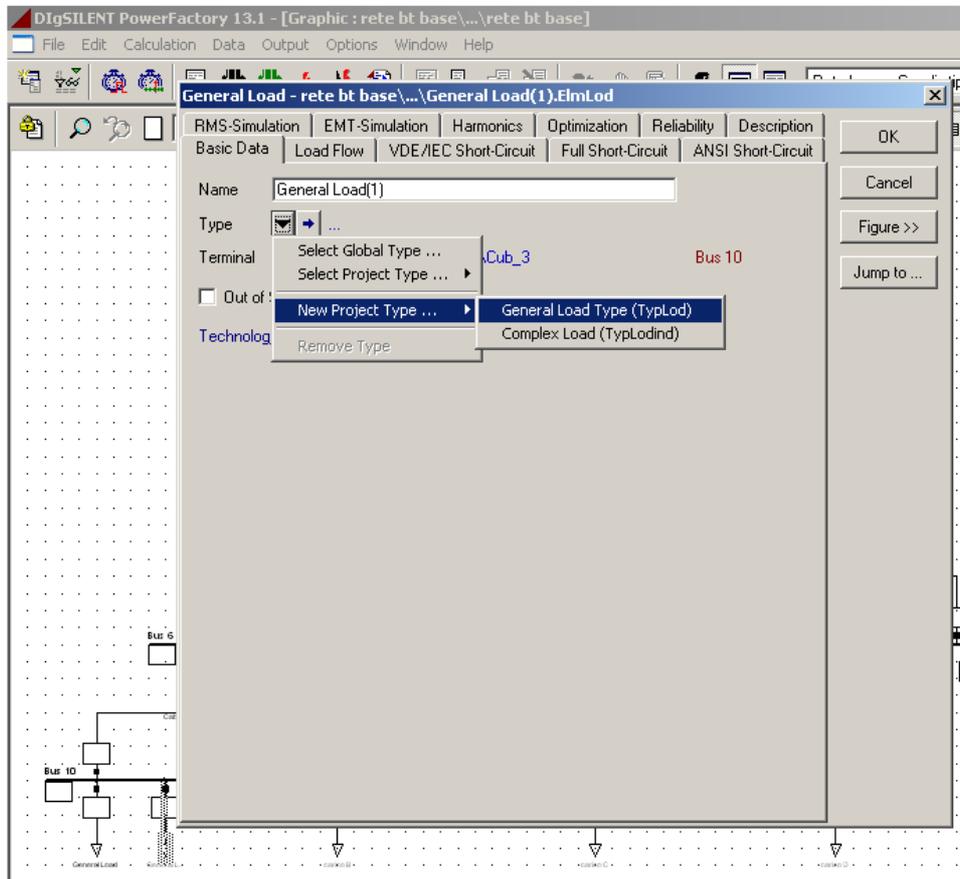
Per definire questi carichi si sceglieranno due strade diverse come verrà mostrato di seguito.

Per definire i carichi domestici bisognerà dare un doppio click sul simbolo del carico a seguito del quale comparirà una finestra di dialogo come in Fig.3.



**Fig. 67: Dettaglio scheda carico**

A questo punto selezionando il tasto  in corrispondenza della voce “Type” comparirà un primo menù attivo nel quale sono presenti tre voci come nella fig.4.

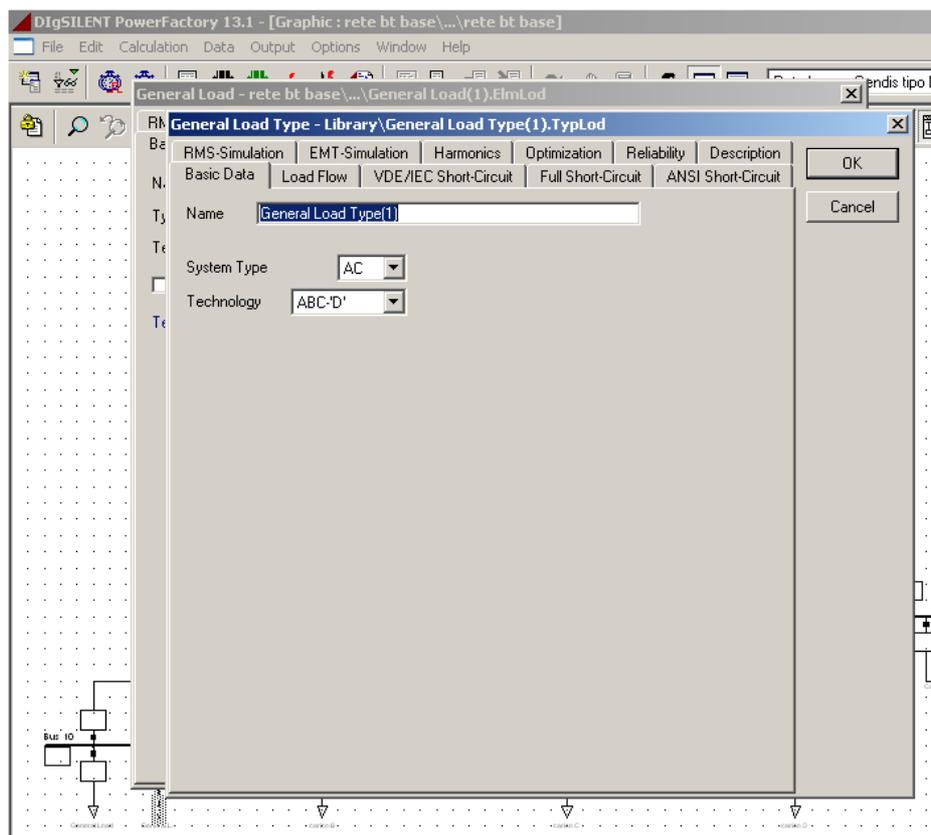


**Fig.68: Dettaglio selezione tipo per il carico**

La prima voce dall’alto è quella che permette di scegliere il tipo di carico tra quelli presenti nella libreria globale di DIgSilent, la seconda voce è quella che permette di effettuare la stessa scelta dalla libreria del progetto in studio, mentre la terza voce è quella che permette di introdurre nel progetto una tipologia di carico del tutto nuova.

Per i carichi domestici si sceglierà la terza strada, semplicemente spostando il cursore sulla voce “New Project Type” e facendo così apparire un secondo menù attivo come si è visto nella precedente figura.

Da quest’ ultimo menù bisognerà scegliere la prima voce “General Load Type” con un singolo click del mouse ed avendo così l’accesso alla scheda del carico come è mostrato in Fig.5.



**Fig.69: Dettaglio scheda definizione del carico**

In questa scheda come in quella precedente sono importanti, per i nostri scopi, solo due cartelle, ovvero quelle denominate “ Basic Data “ e “ Load-Flow “.

Nella prima cartella due sono i campi più importanti da compilare, quello che definisce il carico come alternato o continuo, e quello in cui scegliere tra la configurazione di carico trifase oppure monofase.

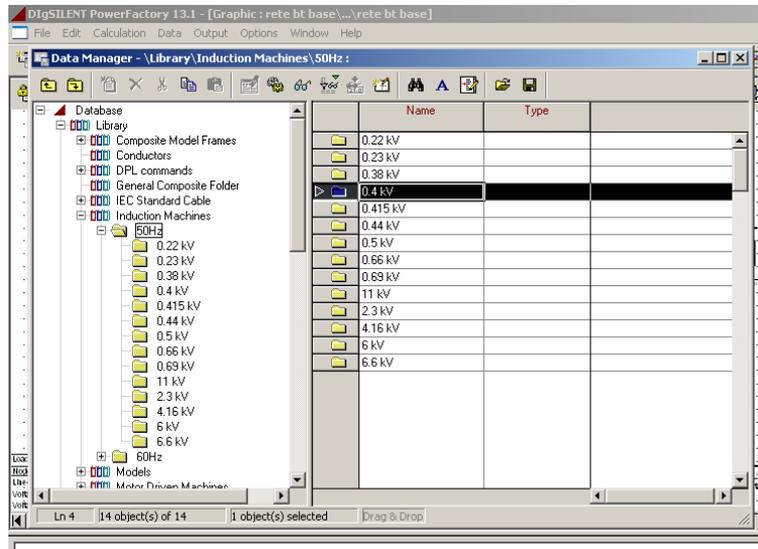
Bisognerà prestare molta attenzione nel caso in cui si dovesse scegliere un carico monofase, perché bisognerà anche specificare quale dei quattro morsetti del carico si intenderà allacciare al bus.

Questo punto risulterà delicato solo nel caso in cui la linea che serve quel determinato bus sia monofase perché se la fase in arrivo al nodo (dalla parte della linea) e la fase selezionata per il carico avranno nomi diversi allora il carico non verrà alimentato, senza nessun messaggio di errore in quanto i due elementi sono stati costruiti correttamente.

A questo punto si può dare l’ OK alla seconda scheda, ritornando alla prima.

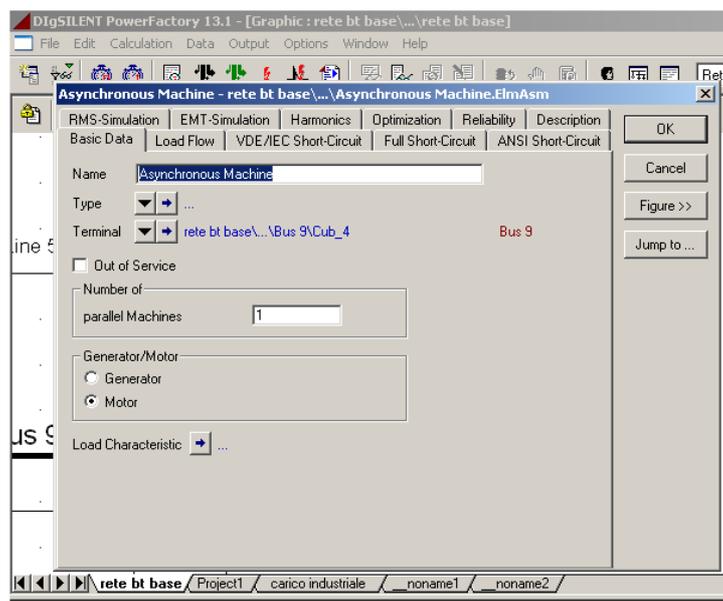
Per definire invece i carichi industriali si ricorrerà alla libreria di DIgSilent la quale racchiude tutta una serie di componenti elettrici tra i quali i motori come mostrato nella Fig.6.

Nella sezione “Induction Machine” sono presenti le macchine asincrone a 50 ed a 60 Hz elencate in base alla loro tensione nominale. Per l’applicazione nella rete in studio si è scelta la categoria con tensione nominale di 400 V.



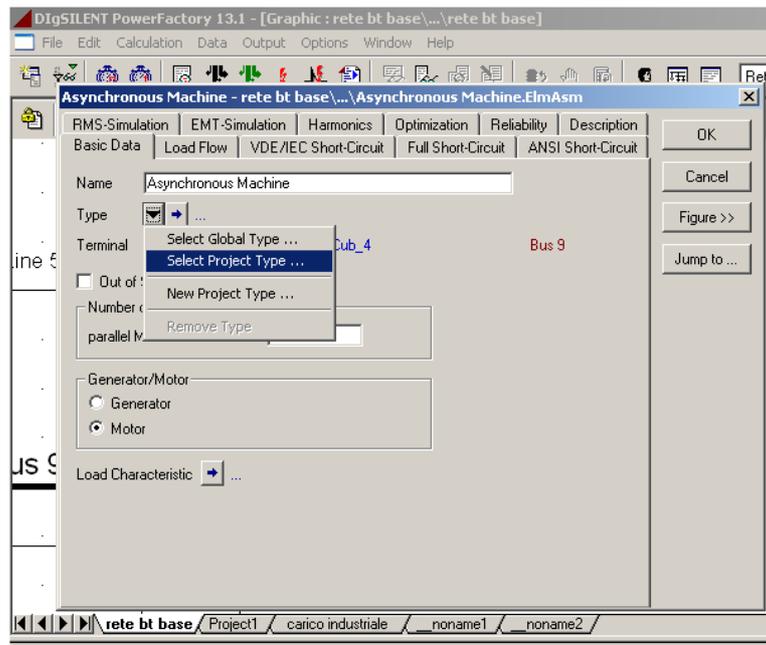
**Fig.70: Dettaglio elenco macchine ad induzione**

Da questa lista si sceglierà un tipo di motore asincrono e lo si copierà nella libreria di progetto usando i tasti di “Copy Object” e “Paste Object”, i cui simboli sono rispettivamente  e  presenti nella barra degli strumenti dello stesso Data Manager. Ritornando allo schema unifilare si selezionerà con un doppio click il simbolo del motore asincrono e comparirà una finestra di dialogo riportata in Fig.7



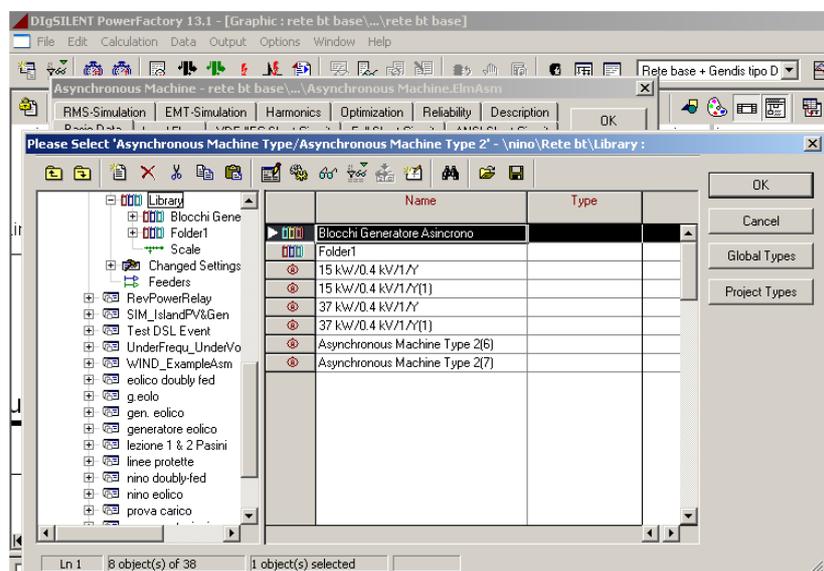
**Fig.71: Dettaglio scheda carico**

Per prima cosa, è possibile dare un nome all'oggetto che si sta per creare nell'apposito campo, successivamente alla voce "Type" si dovrà scegliere il tipo a cui puntare ed in questo caso tale tipo è residente nella libreria di progetto per cui selezionando il pulsante  verrà fuori un menù attivo come nella fig.8 dal quale bisognerà scegliere la seconda voce con un click.



**Fig. 72: Dettaglio scelta del tipo per il carico**

Comparirà una nuova finestra (Fig.9) nella quale si deve scegliere il tipo di carico che nel nostro caso è il motore asincrono.



**Fig.73: Dettaglio lista componenti elettrici nella libreria**

**Paragrafo 3.2:** La progettazione della rete BT

Avendo definito tutti i carichi della rete in tutte le loro parti è possibile procedere oltre con il dimensionamento di tutte le linee della rete partendo dal basso e procedendo verso l'alto.

Bisogna fare a questo una precisazione, perché nella rete sono presenti delle linee che vogliono ricoprire il ruolo di rami ridondanti, che si riconoscono principalmente per il loro colore grigio, le altre linee sono nere, e secondariamente perché hanno uno degli interruttori estremali aperto. Questi rami vengono lasciati aperti ad un estremo (solitamente telecomandato) al fine di assicurare la radialità della rete ma che vengono chiuse al momento di un guasto sopraggiunto su una o più linee adiacenti permettendo così la continuità di alimentazione per il carico attraverso un nuovo percorso.

Per dimensionare le linee si procederà calcolando la corrente di impiego  $I_b$  assorbita da ciascun carico (di cui è nota la potenza assorbita).

Per la scelta delle sezioni delle linee si è fatto riferimento alla tabella UNEL 35023-70 riportata nella Tab.1, per cavi con conduttore in rame, isolamento in gomma o materiale termoplastico e con temperatura caratteristica fino ad 80 °C .

**Tab. 1: Resistenze e reattanze per unità di lunghezza dei cavi elettrici per BT**

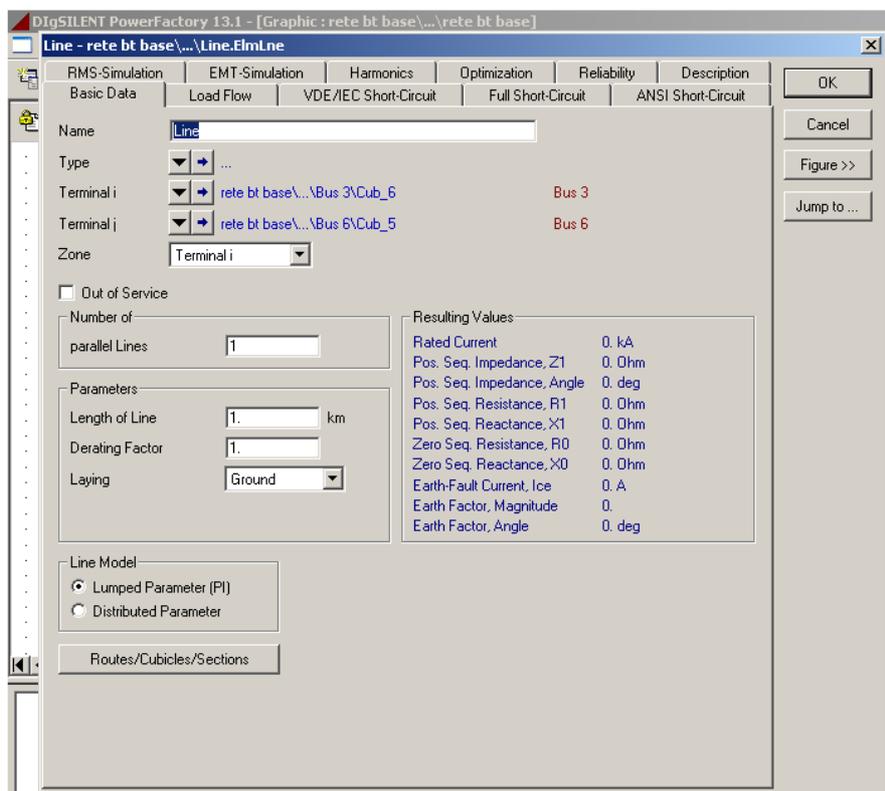
Sezione Nominale [mm <sup>2</sup> ]	Cavi Unipolari		Cavi bipolari e tripolari	
	Resistenza [mOhm/m]	Reattanza [mOhm/m]	Resistenza [mOhm/m]	Reattanza [mOhm/m]
1,5	14,8	0,168	15,1	0,118
2,5	8,91	0,155	9,08	0,109
4	5,57	0,143	5,68	0,101
6	3,71	0,135	3,78	0,0955
10	2,24	0,119	2,27	0,0861
16	1,41	0,112	1,43	0,0817
25	0,889	0,106	0,907	0,0813
35	0,641	0,101	0,654	0,0783
50	0,473	0,0965	0,483	0,0779
70	0,328	0,0975	0,334	0,0762
95	0,236	0,0939	0,241	0,0751
120	0,188	0,0928	0,191	0,074
150	0,153	0,0908	0,157	0,0745
185	0,123	0,0902	0,125	0,0742
240	0,0943	0,0895	0,0966	0,0752

Nella Tab. 2 vengono riportate le sezioni di tutte le linee della rete BT.

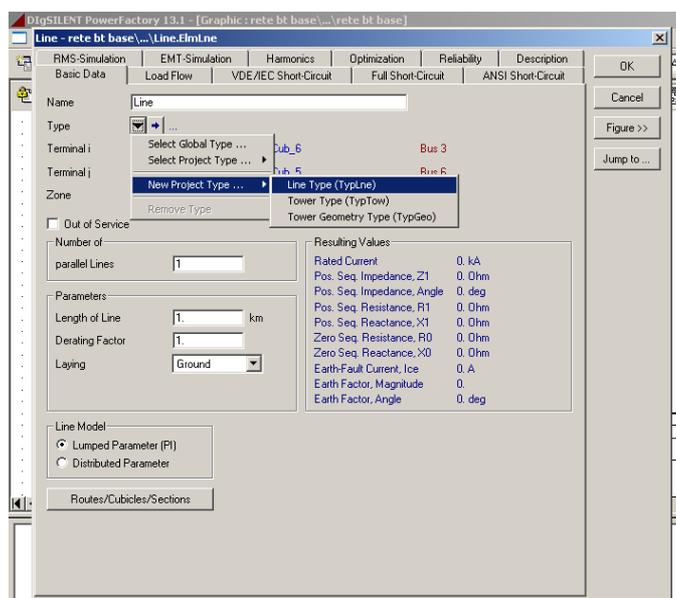
**Tab. 2: Caratteristica delle linee**

	corrente di linea [A]	portata [A]	sezione [mm <sup>2</sup> ]	resistenza [mOhm/m]	reattanza [mOhm/m]
linea 0-1	90	101	25	0,907	0,0813
linea 0-2	75	101	25	0,907	0,0813
linea 1-3	38	57	10	2,27	0,0861
linea 1-4	51	57	10	2,27	0,0861
linea 2-4					
linea 2-5	63	76	16	1,43	0,0817
linea 3-6	13	32	4	5,68	0,101
linea 3-7	26	57	10	2,27	0,0861
linea 4-7					
linea 4-8					
linea 5-8					
linea 5-9	13	25	1,5	15,1	0,118
linea 6-10					
linea 6-11					
linea 7-11					
linea 7-12					
linea 8-12					
linea 8-13					
linea 9-13					
linea 9-14					

Con tali valori si potranno definire adesso tutte le linee della rete BT. Per tale definizione bisogna prima di tutto selezionare il componente linea nello schema unifilare con un doppio click, in maniera tale da accedere alla sua scheda, Fig. 10.

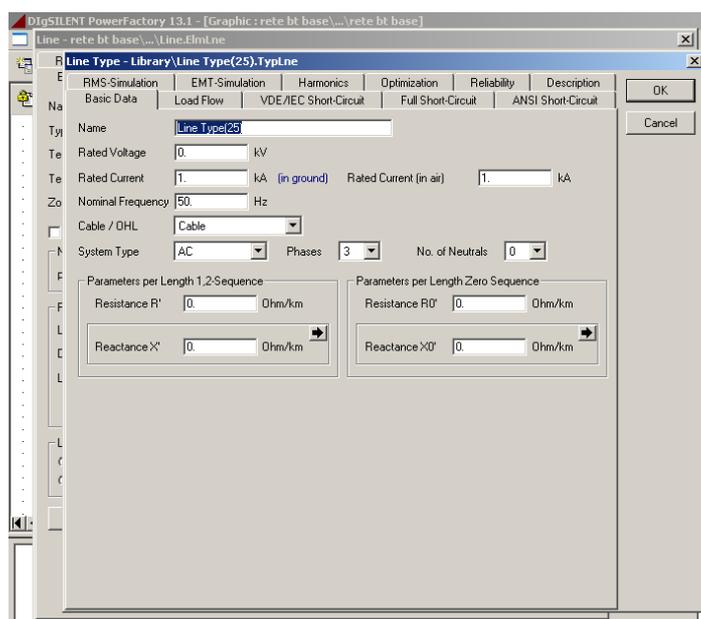
**Fig. 74: Dettaglio scheda linea elettrica**

In tale cartella bisognerà riempire per primo il campo “Name”, successivamente si dovrà definire il tipo per la linea selezionando il tasto  alla voce “Type”; dal menù attivo che verrà fuori si dovrà scegliere la voce “New Project Type” e successivamente “Line Type” come in fig.11.



**Fig.75: Dettaglio selezione del tipo per la linea**

In Fig.12 sono importanti i campi dove si definisce la tensione nominale, la frequenza di funzionamento, la tipologia di linea (cavo, cavo non armato oppure linea aerea) ed infine nella parte inferiore si trovano i campi per i parametri elettrici.



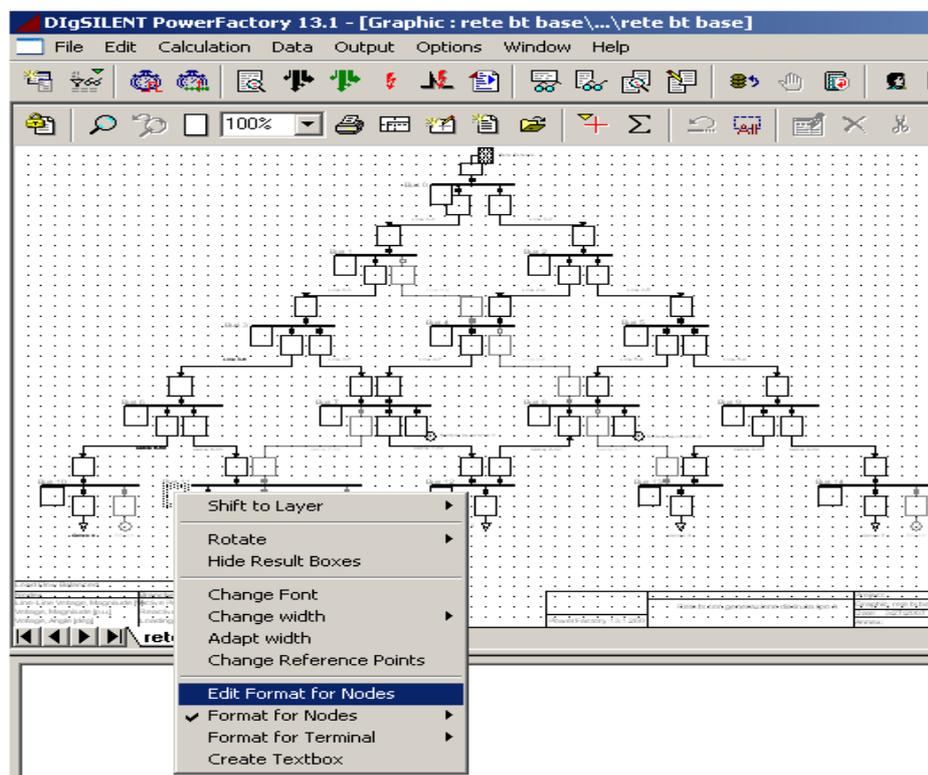
**Fig.76: Dettaglio scheda di definizione della linea**

Riempiti tutti i campi, si può dare l'OK e ritornare alla precedente scheda, dove si dovrà dire quanto è lunga la linea, quante linee dello stesso tipo si intende mettere in parallelo ed infine si potrà dare l'OK anche a questa scheda avendo definito completamente il componente.

### **Paragrafo 3.3:** Il dimensionamento della rete BT

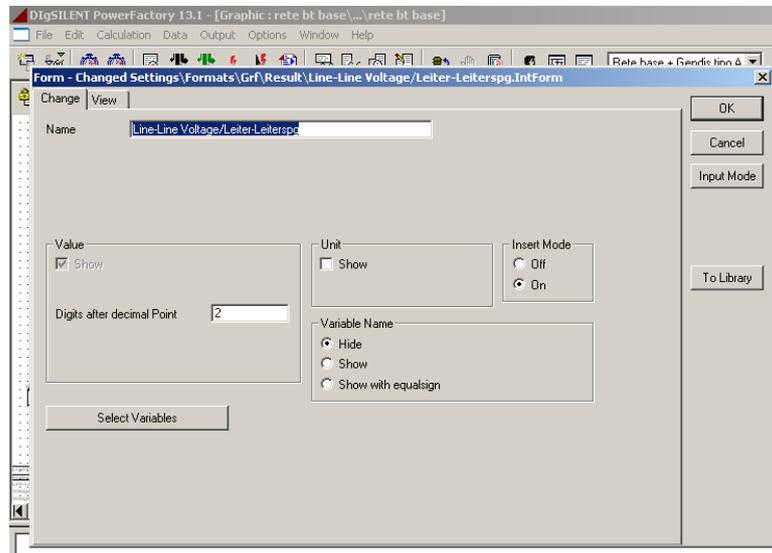
Eseguendo una simulazione di Load Flow, con la rete nella configurazione ottenuta al paragrafo precedente, si nota che la caduta di tensione relativa percentuale tra il bus 0 (corrispondente all'uscita della stazione MT/BT) ed i bus di carico assume un valore troppo elevato rispetto al 4% richiesto dalla norma.

I dati numerici sono visibili sullo stesso foglio di lavoro dello schema unifilare nei box immediatamente a ridosso dei singoli componenti elettrici. Le grandezze che si vuole siano disponibili in tali box possono essere scelte arbitrariamente da un elenco a cui si può accedere dando un click con il tasto destro del mouse sul box interessato, facendo così comparire un menù attivo come in Fig.13.



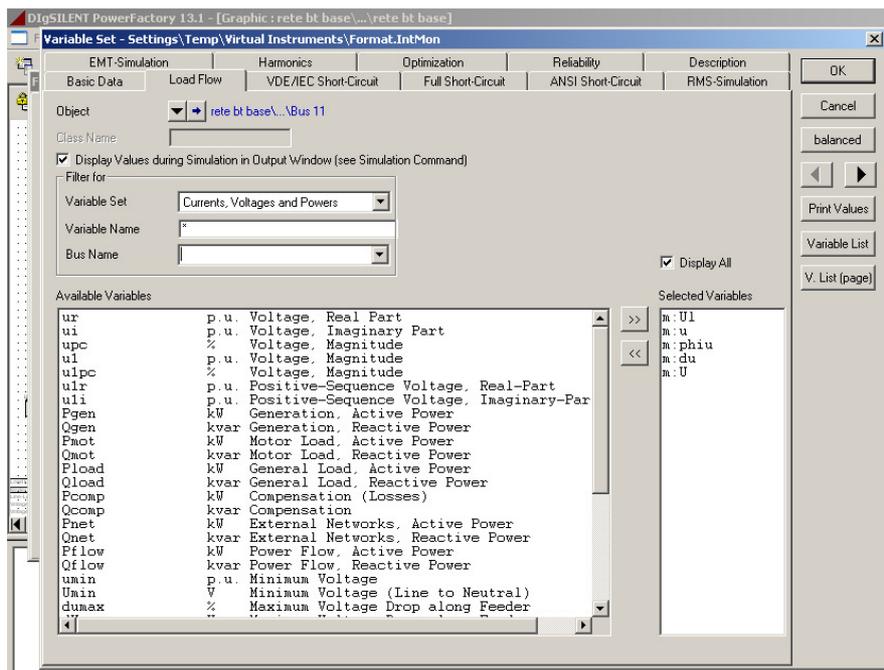
**Fig.77: Dettaglio menù attivo dei box**

Da questo menù bisognerà scegliere la voce “Edit Format for Nodes”. Comparirà una nuova finestra di dialogo come a seguire. In tale finestra si dovrà selezionare la voce “Select Variables”, avendo così accesso all’ intero elenco di grandezze disponibili per il dato componente, come si potrà vedere in Fig.14.



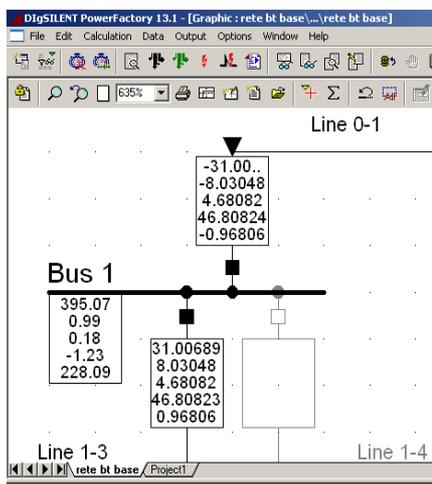
**Fig.78: Dettaglio scheda descrittiva del box**

Dalla finestra denominata “Available Variables” in Fig.15 si possono scegliere le grandezze (semplicemente con un doppio click) che man mano appariranno nella colonna di sinistra denominata “Selected Variables”.

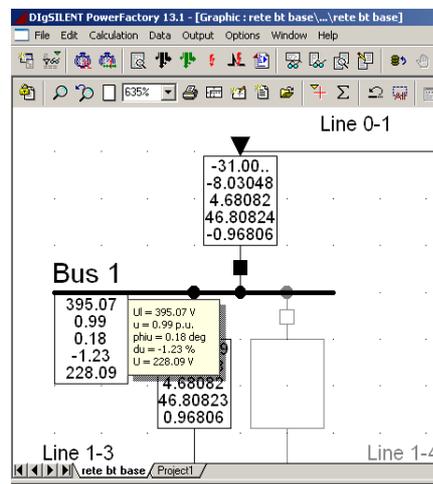


**Fig.79: Dettaglio lista delle grandezze elettriche**

Premendo OK si ritornerà allo schema unifilare e lanciando una simulazione di load-flow i dati numerici compariranno nei rispettivi box (Fig.16). Inoltre, trascinando il cursore del mouse sul box comparirà una finestra che riporterà sia il nome di tutte le grandezze e sia il loro valore numerico per una più veloce lettura (Fig.17).



**Fig.80: Dettaglio box**



**Fig.81: Dettaglio box menù a scomparsa**

Ritornando al problema iniziale del dimensionamento della rete, per aggiustare le cose si possono seguire due strade:

- 1) agire sulla sezione dei conduttori;
- 2) costruire delle linee in parallelo.

Lo scopo comune dei summenzionati metodi è quello di agire sulla impedenza di linea e nel nostro caso specifico si agirà per diminuirla.

Con le dovute trasformazioni la rete BT, nella sua configurazione rimane la stessa come raggio di azione (circa 1 km) ma le sezioni dei vari tratti di linea sono state modificate ( semplicemente passando a sezioni superiori ) ottenendo per ciascuna linea la caduta di tensione relativa percentuale come riportato nella Tab.3.

**Tab. 3: Tabella delle nuove sezioni**

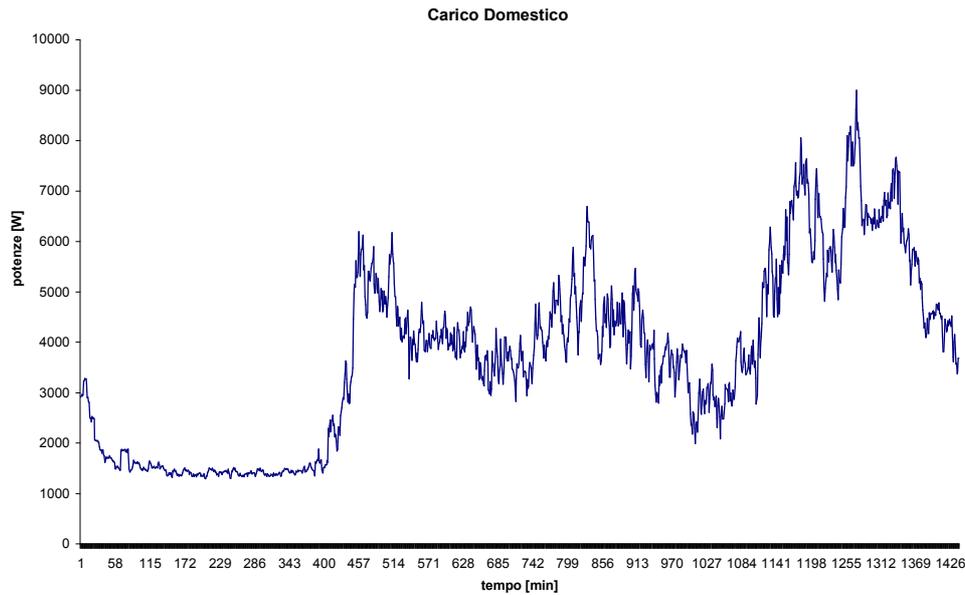
	sezione iniziale [mm <sup>2</sup> ]	sezione finale [mm <sup>2</sup> ]	
linea 0-1	25	150	
linea 0-2			
linea 1-3	10	120	
linea 1-4			
linea 2-4			
linea 2-5	16	120	
linea 3-6	4	70	
linea 3-7	10	70	
linea 4-7			
linea 4-8			
linea 5-8			
linea 5-9			95
linea 6-10	1,5	25	
linea 6-11			
linea 7-11			
linea 7-12			
linea 8-12			
linea 8-13			
linea 9-13			50
linea 9-14			

Con tali interventi su tutti i tratti di linea si è reso possibile contenere, nei punti più lontani dalla stazione MT/bt, una caduta di tensione relativa percentuale entro la soglia limite ammissibile del  $\pm 4\%$ .

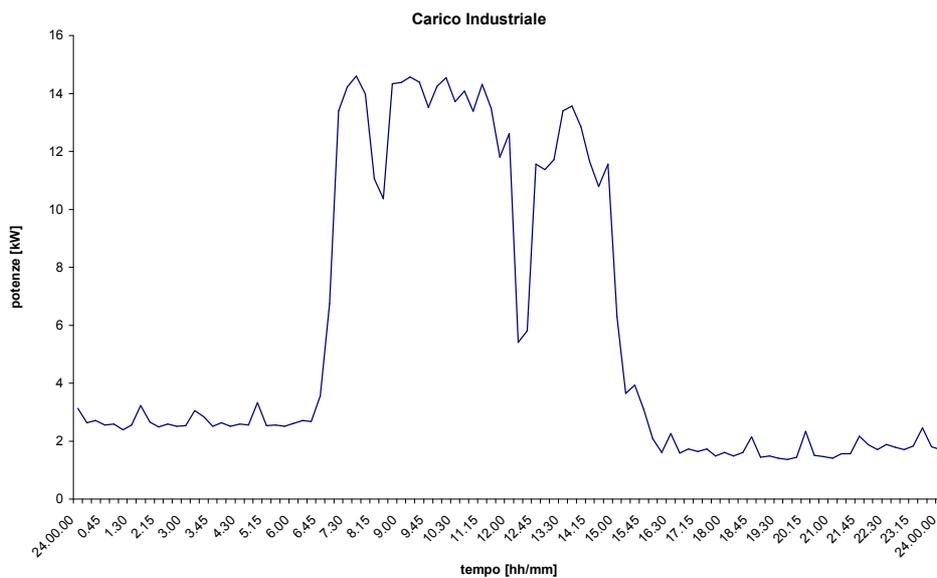
Le verifiche vengono quando si lancia una simulazione di Load-Flow che fornisce tra l'altro una convergenza entro le prime tre iterazioni.

#### **Paragrafo 3.4:** I diagrammi di carico

I carichi che sono stati introdotti nella rete BT in studio assorbono, per come sono stati definiti, una potenza costante, ma questa non è una condizione corrispondente alla realtà. Si è preferito, per tale motivo, far sì che gli stessi carichi assorbano potenza seguendo gli andamenti descritti nei diagrammi di carico. I diagrammi di carico che sono stati utilizzati forniscono le potenze assorbite dai carichi domestici ed industriali nell'arco di una giornata come mostrato rispettivamente in Fig.18 ed in Fig.19.



**Fig.82: Andamento del carico domestico giornaliero**



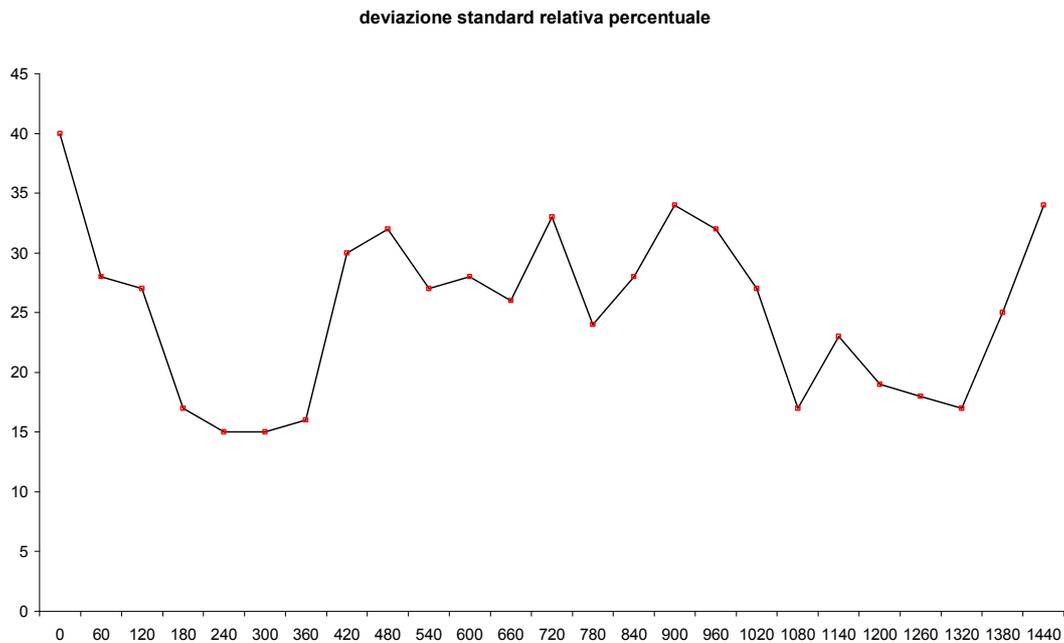
**Fig.83: Andamento del carico industriale giornaliero**

Per poter fruire di tali andamenti nelle simulazioni con il software DiGSilent, c'è la necessità di una loro campionatura al secondo questo perché il secondo costituisce il passo della RMS Simulation che si intenderà eseguire per lo studio della rete.

Al fine di poter passare ad un campionamento per secondo per entrambi i grafici, si è utilizzato il metodo della retta di regressione. In tale metodo è stata introdotta una modifica riguardante la deviazione standard; infatti, mentre nel metodo originale il calcolo della deviazione standard viene effettuato ad ogni nuovo ciclo, nel caso in esame si è partiti invece da uno studio condotto sull'assorbimento di potenza di varie

tipologie di carico, il quale contemplava anche la conoscenza della distribuzione giornaliera della deviazione standard relativa percentuale.

Partendo da tale studio, si è ricavato l'andamento della deviazione standard con un campionamento al minuto come in Fig.20.

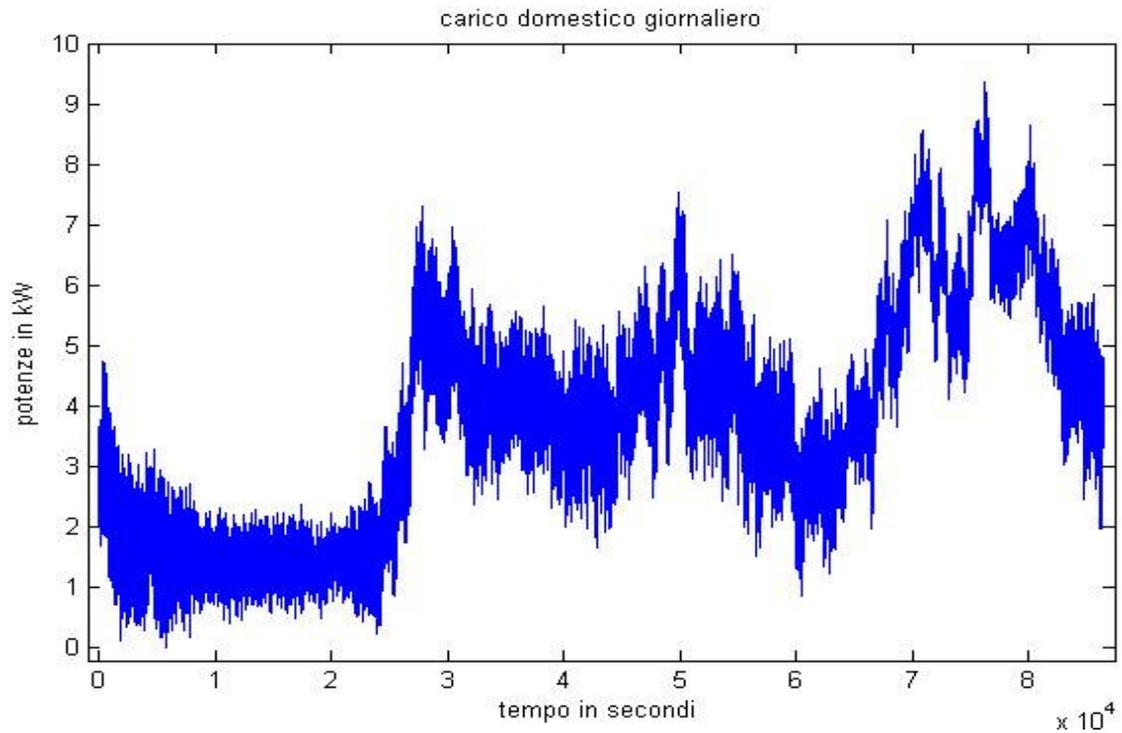
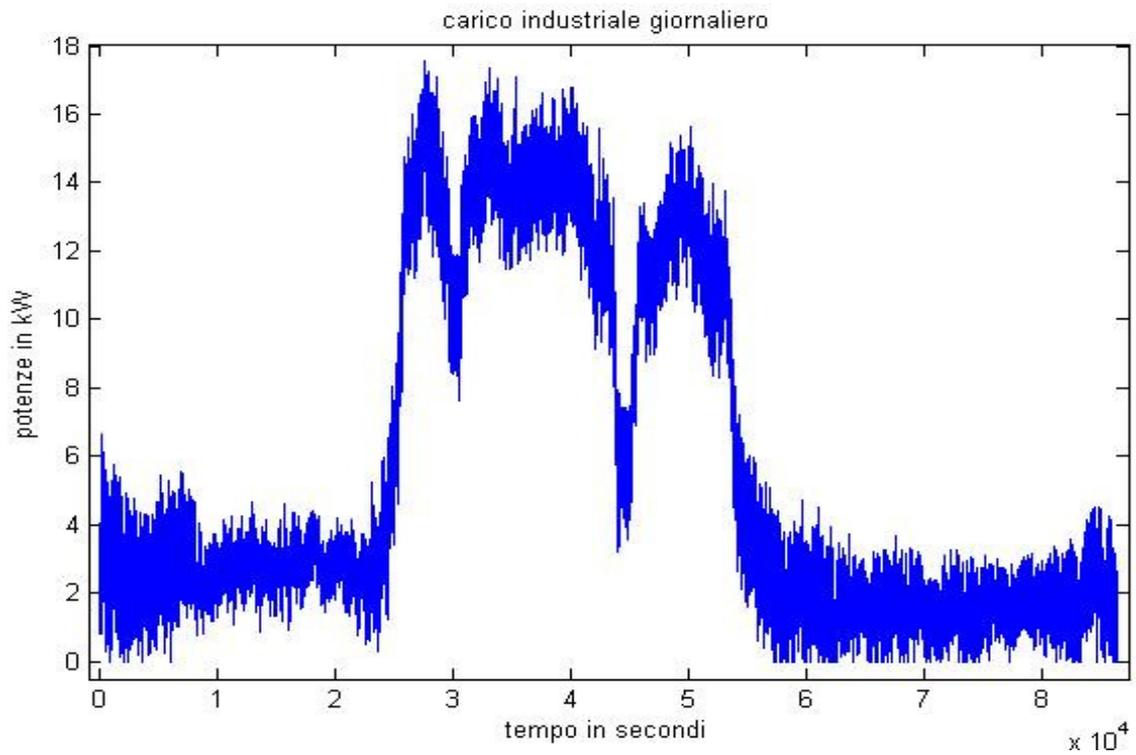


**Fig.84: Andamento della deviazione standard**

A tale andamento è stato applicato il metodo della interpolazione lineare, arrivando così ad un campionamento per secondo come desiderato.

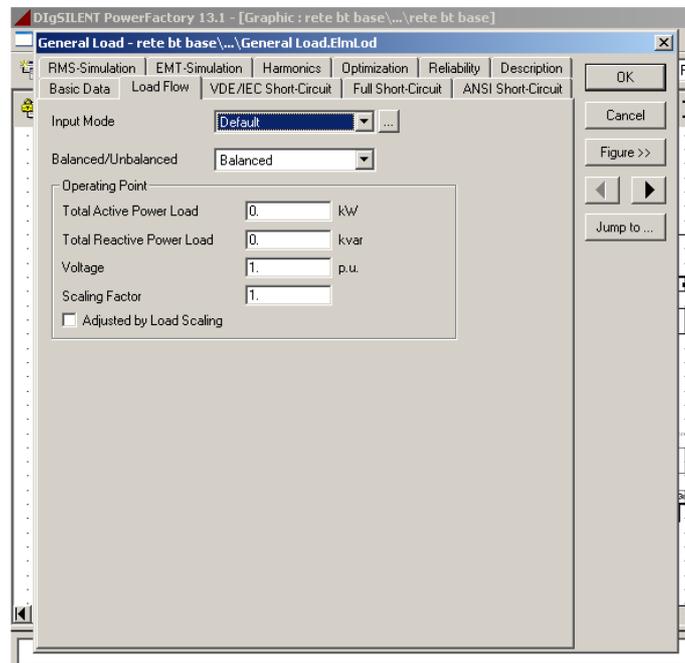
L'applicazione del metodo della regressione è stata effettuata con l'ausilio del software Matlab al quale si fornivano in ingresso due vettori, uno costituito dai valori delle potenze, il secondo costituito dai valori della deviazione standard.

Gli andamenti che si sono ottenuti in uscita vengono rispettivamente mostrati in Fig.21 ed in Fig.22.

**Fig.85****Fig. 86**

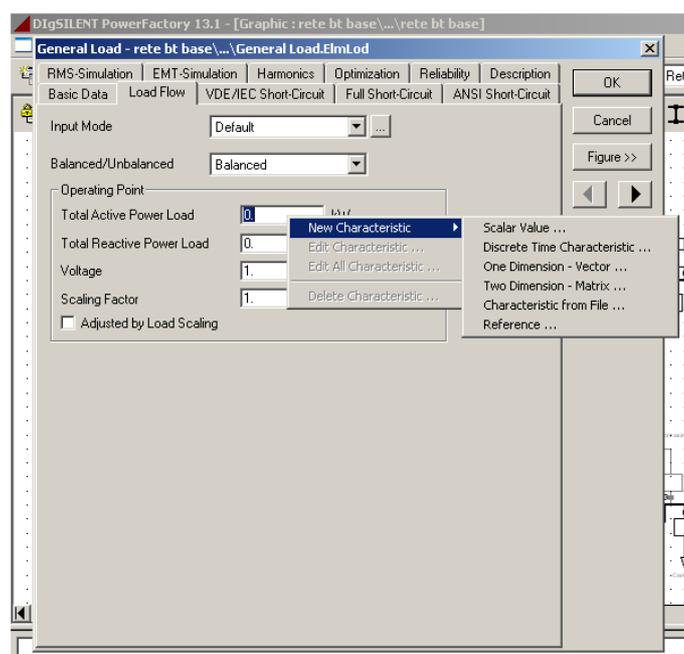
Saranno questi gli andamenti delle potenze che verranno usati durante le simulazioni con il software DIgSilent, anche se non in questa forma. Il software DIgSilent consente l'introduzione di caratteristiche nella modalità seguente; introdotto un carico nello

schema unifilare lo si seleziona con un doppio click accedendo così alla sua scheda descrittiva come in Fig.23.



**Fig. 87: Dettaglio scheda descrittiva del carico**

Andando direttamente alla sezione “Operating Point” portando il cursore nel primo campo bianco, quello della potenza attiva, e selezionandolo con un singolo click del tasto destro appariranno due menù attivi in sequenza come in Fig.24.

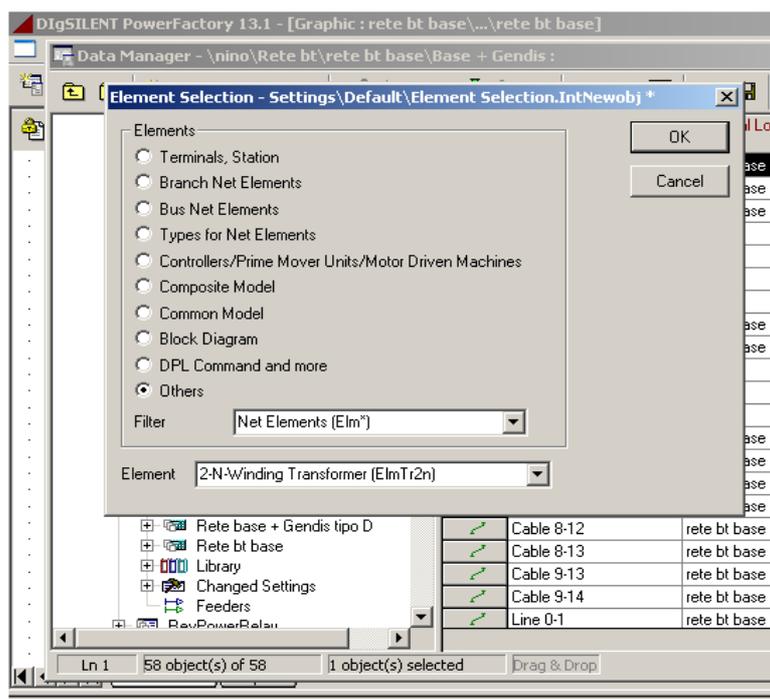


**Fig.88: Dettaglio menù caratteristica di carico**

Ognuna delle voci presenti nel secondo menù attivo serve per l'introduzione di caratteristiche di diverse tipologie ma la cosa che hanno in comune è la necessità di introdurre una scala. La stessa cosa può essere fatta anche per la potenza reattiva.

Nel caso in esame tale scala è rappresentata da una scala tempi per cui adesso vedremo come costruirla e scoprire il perché, sempre nel caso in esame della rete BT, non è stato possibile usare nessuna delle precedenti strade per introdurre i diagrammi di carico.

Per introdurre una scala tempi bisogna prima aprire il Data Manager e selezionare la griglia attualmente attiva nel progetto con un singolo click, dopo di che bisogna selezionare il tasto  presente nella barra degli strumenti dello stesso Data Manager e ciò farà apparire una finestra di dialogo come in Fig.25. In questa finestra si trova una lista di oggetti dalla quale bisognerà selezionare "Others", dopo di che nel campo "Filter" bisognerà selezionare il tasto  e dalla lista si dovrà scegliere la voce "Scale and Trigger".

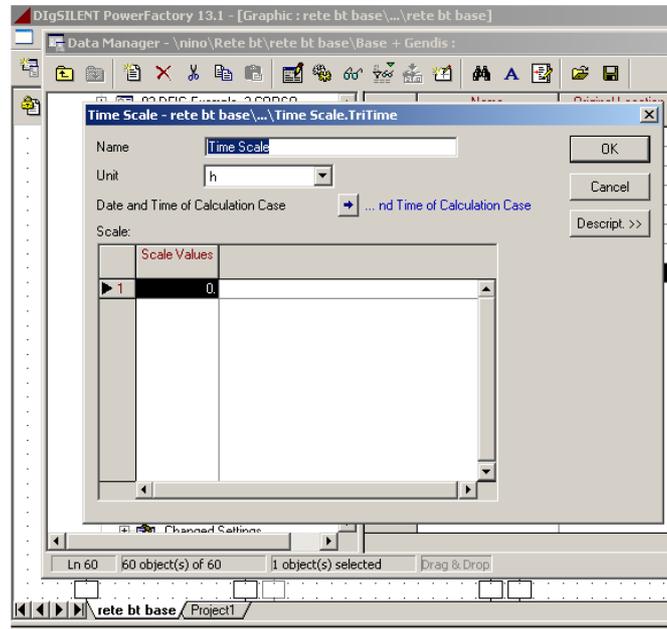


**Fig.89: Dettaglio elenco oggetti di DIgSilent**

A questo punto, che nel campo "Element" si dovrà scegliere la voce "Time Scale" e dare successivamente OK per potere entrare nella scheda descrittiva la scala tempi come in Fig.26.

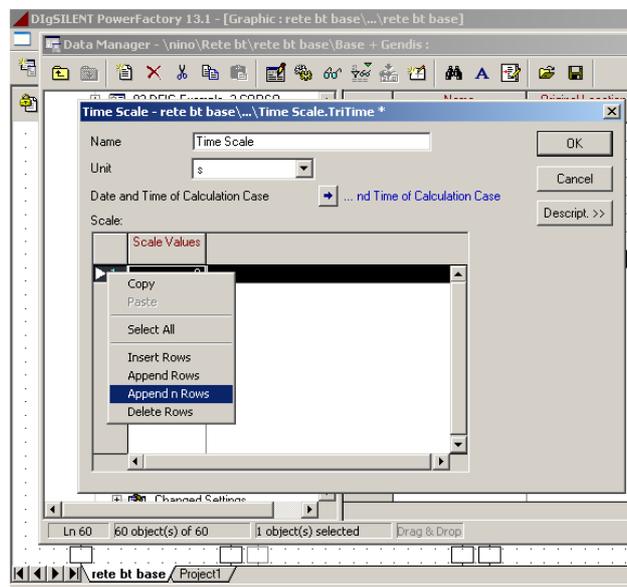
Come si può vedere dalla Fig.26 la scala tempi può essere denominata, si può introdurre l'u.d.m. per il tempo selezionando il tasto  alla voce "Unit" e scegliendo i secondi (c'è

la possibilità di scegliere dal secondo all'anno), si può introdurre il numero di secondi che si vuole costituisca tale scala, che in tale caso sarà 86400.



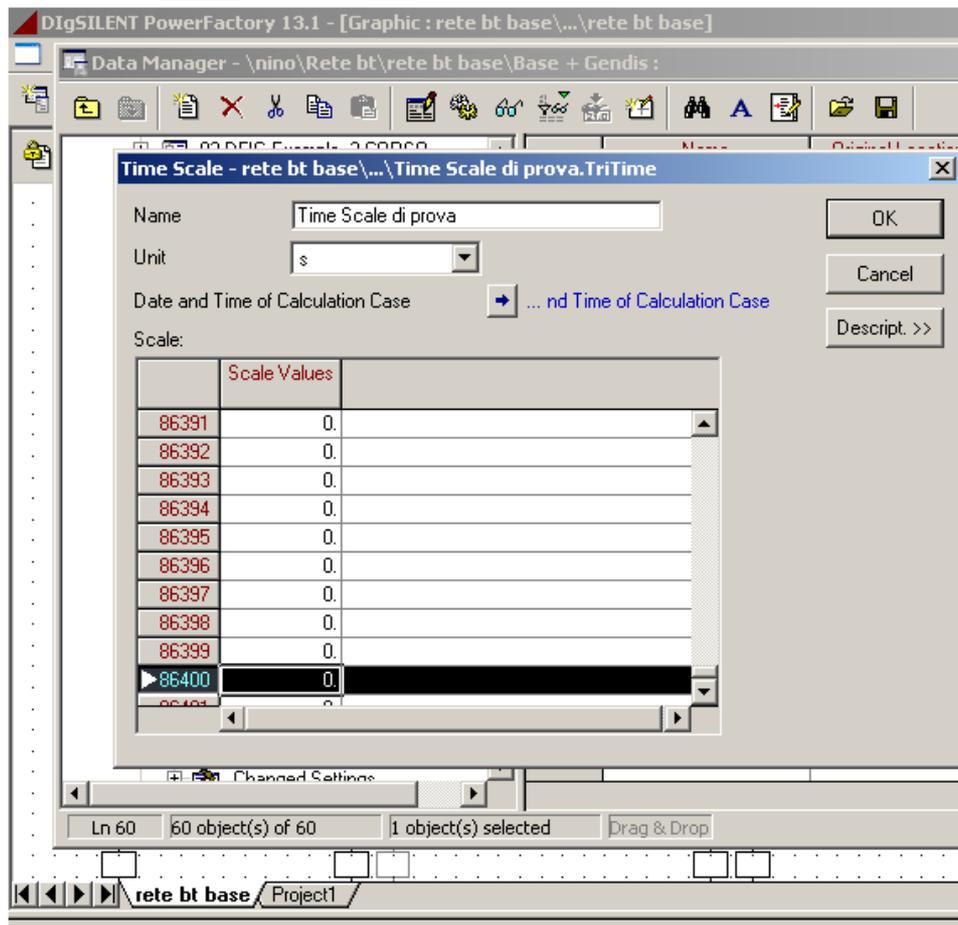
**Fig.90: Dettaglio definizione scala tempi**

Per introdurre questi valori bisognerà selezionare il tasto  presente nella sezione “Scale” con un singolo click del tasto destro del mouse a seguito del quale verrà fuori un menù attivo come nella Fig.27 dal quale si dovrà scegliere la voce “Append n Rows” che porterà ad una nuova finestra che chiederà il numero di righe che si intende introdurre nella colonna.



**Fig. 91: Dettaglio definizione numero righe**

Avendo dato l'Ok alla precedente finestra si potrà notare, adesso, che la colonna "Scale Values" conterrà 86400 righe come si vede in Fig.28. Qui sorge il primo grosso problema costituito dal fatto che bisogna riempire le caselle vuote manualmente.

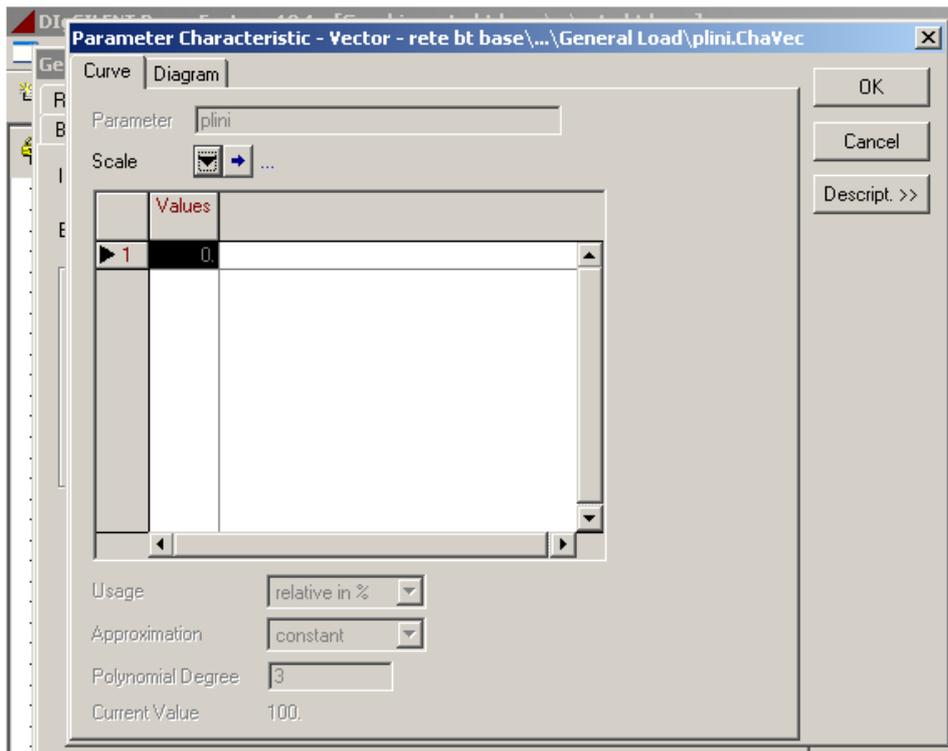


**Fig. 92: Dettaglio colonna dei tempi**

Supponendo di aver inserito i valori numerici nelle caselle vuote si potrà andare avanti dando l'OK. A questo punto bisogna introdurre la caratteristica di carico, per cui si selezionerà con un doppio click, nello schema unifilare, il carico interessato.

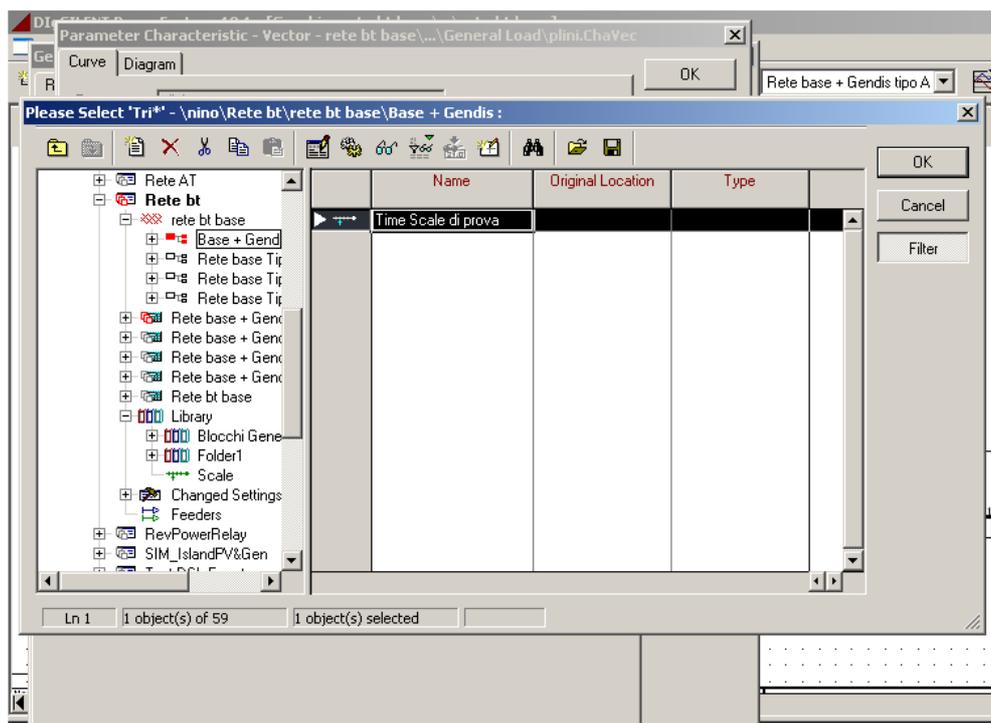
Nella scheda del carico si andrà nella cartella "Load Flow" e nella sezione "Operating Point" si selezionerà con il tasto destro il campo bianco in corrispondenza della potenza attiva, accedendo così al menù attivo come è già stato fatto precedentemente .

Da questo menù si dovrà scegliere la voce "One Dimension – Vector" facendo così apparire una finestra come in Fig.29. In questa nuova finestra bisogna selezionare il pulsante  alla voce "Scale" in modo tale da introdurre la scala tempi precedentemente costruita.



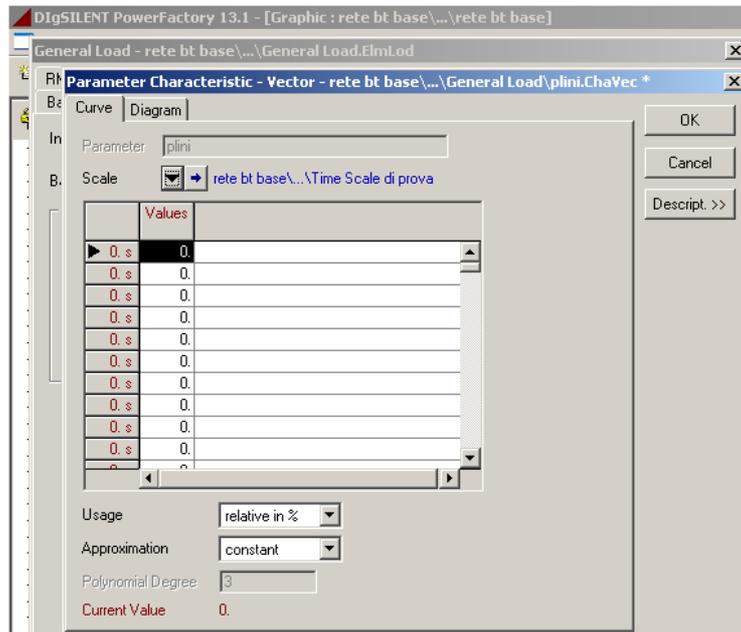
**Fig.93: Dettaglio introduzione caratteristica di carico**

Verrà fuori un primo menù attivo dal quale scegliere la voce “Select”, successivamente verrà fuori una finestra di dialogo che invita appunto alla scelta di una scala tempi come in Fig.30. La scala va selezionata con un click sul simbolo .



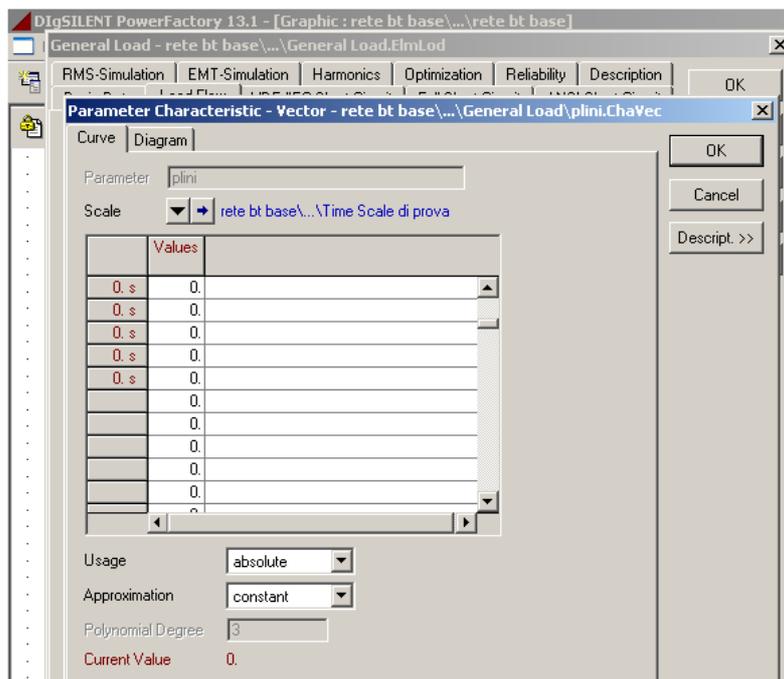
**Fig. 94: Dettaglio elenco scale tempi disponibili**

Avendo dato l'OK si otterrà il risultato come in Fig.31.



**Fig.95: Dettaglio scheda caratteristica di carico**

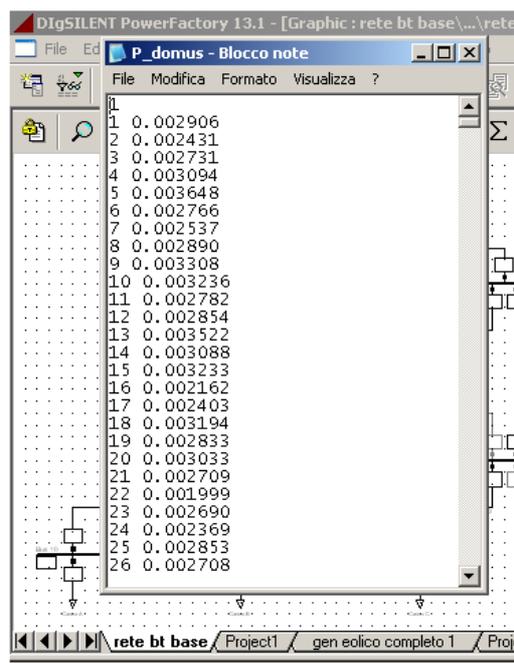
A questo punto si incontra il secondo grosso problema, ovvero bisognerà introdurre tutti i valori della potenza uno ad uno. Un terzo problema è costituito dal fatto che la colonna che riporta la numerazione dei secondi (quella sulla sinistra) perde in alcuni tratti tale numerazione, come è possibile vedere in Fig.32.



**Fig. 96: Dettaglio errore nella caratteristica di carico**

Nel caso in cui però si intenda utilizzare tale strada per introdurre una caratteristica, occorrerà prestare attenzione agli altri due campi nella parte inferiore. Nel campo chiamato “Usage” bisogna selezionare la modalità secondo cui si vogliono introdurre le ordinate del grafico, nel senso che è possibile introdurre i valori in maniera assoluta, relativa oppure relativa percentuale, in questi ultimi due casi si fa riferimento al valore base introdotto nella sezione “Operating Point”. Nel campo chiamato “Approximation” si deve invece scegliere il modo in cui si vuole effettuare l’interpolazione tra due punti consecutivi con la possibilità di interpolazione costante, lineare, polinomiale, spline ed infine hermitiana. Eseguita anche quest’ultima scelta, andando nella cartella “Diagram” della stessa finestra sarà possibile vedere l’ andamento della grandezza in questione. Abbandonata questa strada per via dei problemi incontrati si è deciso di associare i diagrammi di carico alle relative utenze usando la programmazione DSL. Il software DigSilent permette la lettura di file di testo usando un oggetto chiamato “Measurement File” che non possiede nessun ingresso ma che può fornire fino a 10 segnali diversi in uscita.

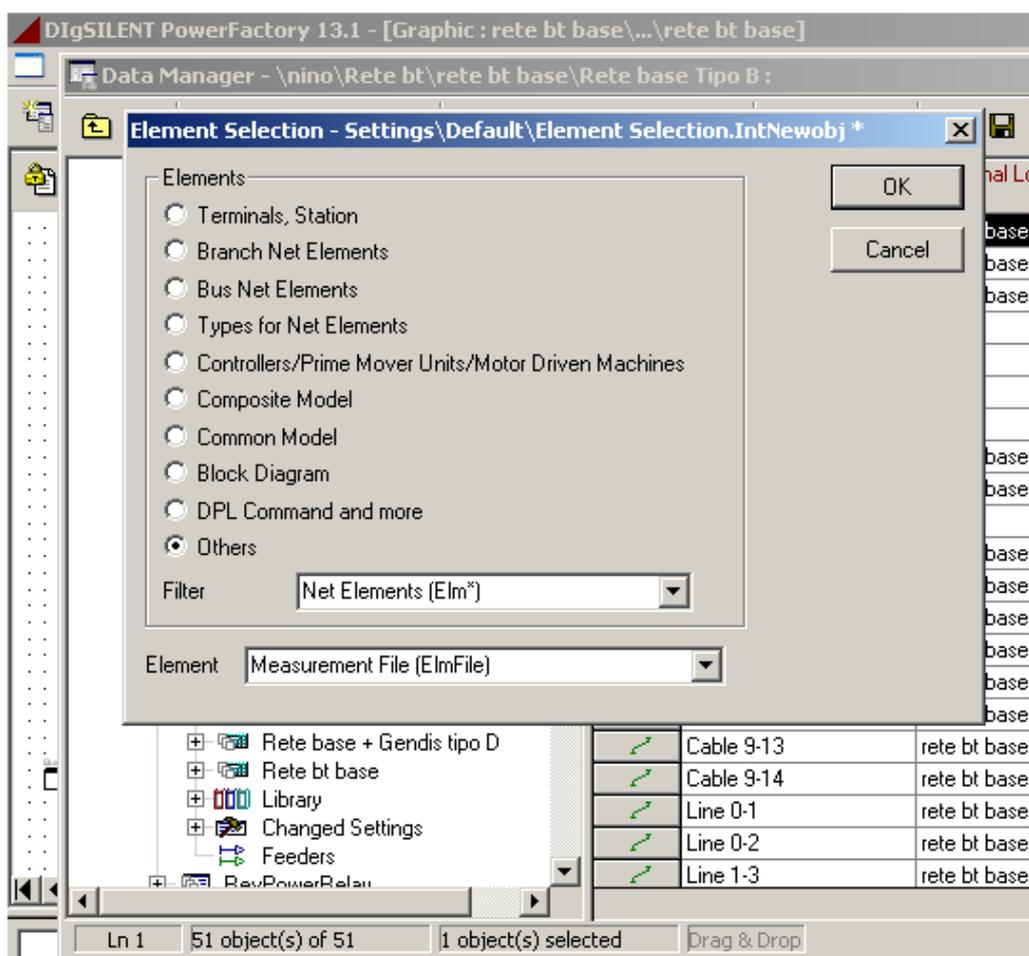
Il primo passo da eseguire è quello della preparazione del file di testo, il quale deve avere una intestazione particolare e deve contenere due colonne, di cui la prima contenente il tempo mentre la seconda i corrispondenti valori della grandezza da rappresentare. E’importante che ciascun valore della seconda colonna sia distanziato di un solo intervallo di “backspace”. Detto ciò, il file di testo dovrà comparire come in Fig.33.



**Fig.97: Dettaglio file testo**

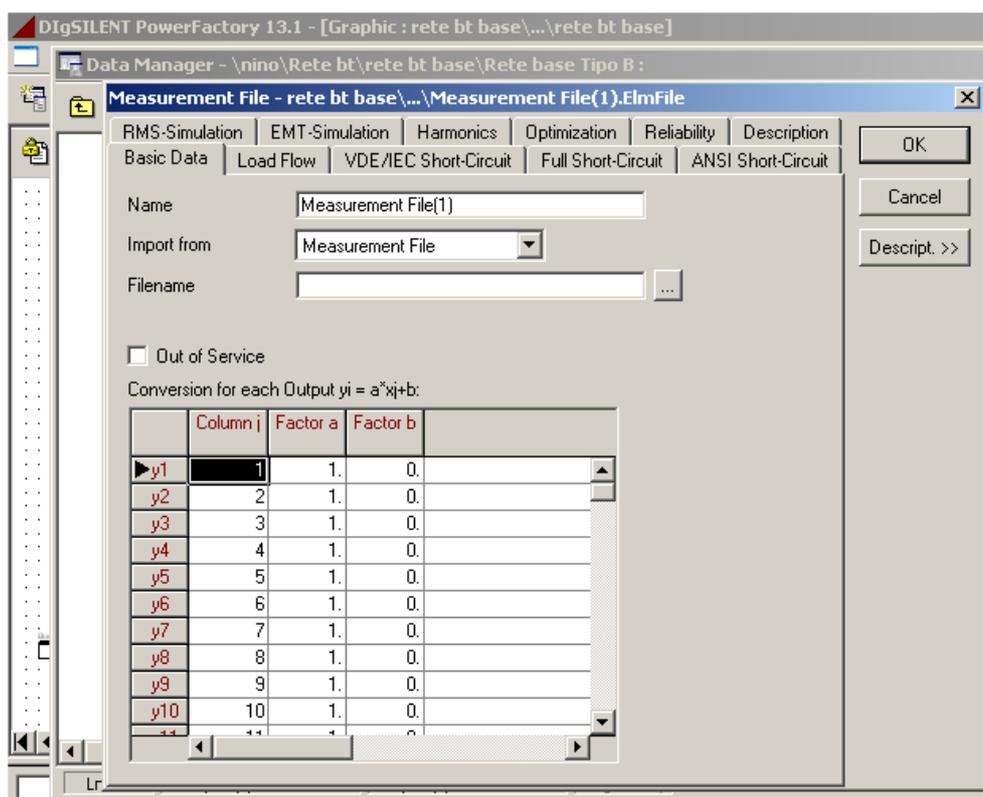
A questo punto sarà possibile definire il Measurement File, selezionando nella finestra del Data Manager la griglia attualmente attiva con un singolo click del tasto sinistro del mouse. Successivamente si selezionerà, dalla barra di stato dello stesso Data Manager, il pulsante  aprendo così la finestra di dialogo “Element Selection” come in Fig.34.

In questa finestra bisognerà scegliere prima la categoria di elementi “Others”, successivamente nel campo “Filter” bisognerà selezionare la voce “Net Elements” ed infine nel campo “Element” bisognerà scegliere l’ oggetto “Measurement File” dopo di che si potrà dare l’ OK.



**Fig.98: Dettaglio definizione Measurement File**

Si è arrivati adesso nella finestra descrittiva del Measurement File, che si presenterà come in Fig.35 .



**Fig.99: Dettaglio finestra di definizione Measurement File**

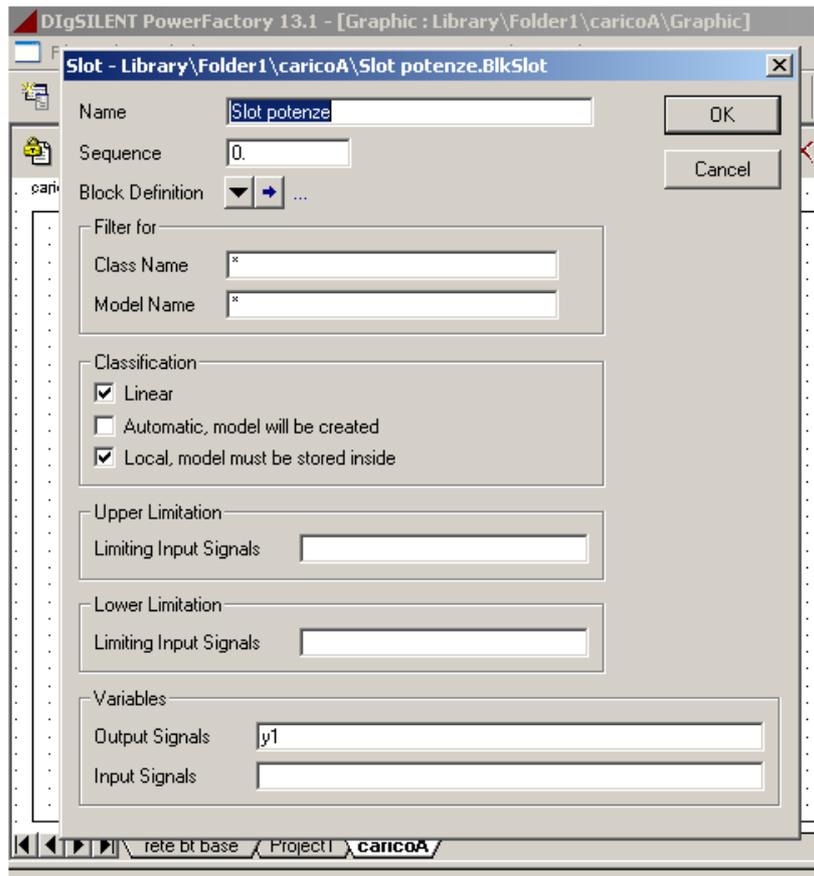
In tale scheda bisognerà focalizzare l'attenzione solo su due campi. Il primo sarà quello detto "Import From", nel quale si dovrà selezionare la voce "Measurement File", mentre il secondo campo sarà "Filename", nel quale si dovrà introdurre il percorso che permetterà a DigSilent di trovare il file testo dal quale attingere i dati numerici per la simulazione. Si potrà notare adesso che l'oggetto Measurement File compare nella lista degli oggetti pertinenti alla griglia attiva con il suo simbolo . Un vantaggio di tale metodo è quello che uno stesso Measurement File può essere tranquillamente condiviso da più componenti dello stesso progetto senza dar luogo ad errore alcuno.

Adesso si ricorrerà alla programmazione DSL, al fine di collegare i diagrammi di carico alle singole utenze. Sorge subito un problema: come si caratterizza il carico negli schemi a blocchi? Quali sono e come si chiamano i segnali con cui lo stesso carico interagisce con l'esterno?

Le risposte a queste domande si troveranno nella libreria generale del software. Infatti cercando nella cartella chiamata "Build In" si troveranno le schede dei blocchi di tutti i componenti elettrici presenti in DigSilent come è mostrato nella Fig.36. Dall'elenco bisognerà selezionare con un singolo click del tasto sinistro del mouse la voce "ElmLod". Successivamente, con un click del tasto destro comparirà un menù attivo dal quale si dovrà selezionare la prima voce "Edit", avendo così l'accesso alla scheda



Il primo blocco avrà una scheda come in Fig.38, dove si può notare che nella sezione “Variables” soltanto la sezione “Outputs” è stata riempita con un solo segnale. Il nome che è stato dato a questo segnale, ”y1”, non è casuale, ma è tale per cui il software capisce che quel blocco non ha bisogno di un ingresso pur avendo una sola uscita.



**Fig.102: Dettaglio scheda del blocco Measurement File**

Una precisazione va ancora fatta su questo blocco, in quanto esso può arrivare a fornire fino a dieci uscite. Naturalmente, in tale caso il file di testo dal quale attingere i dati dovrà contenere undici colonne (una per l’ascissa e dieci per le dieci grandezze in ordinata). In quest’ultimo caso, nel campo “Output” saranno presenti dieci segnali, denominati  $y_1, y_2, \dots, y_{10}$ .

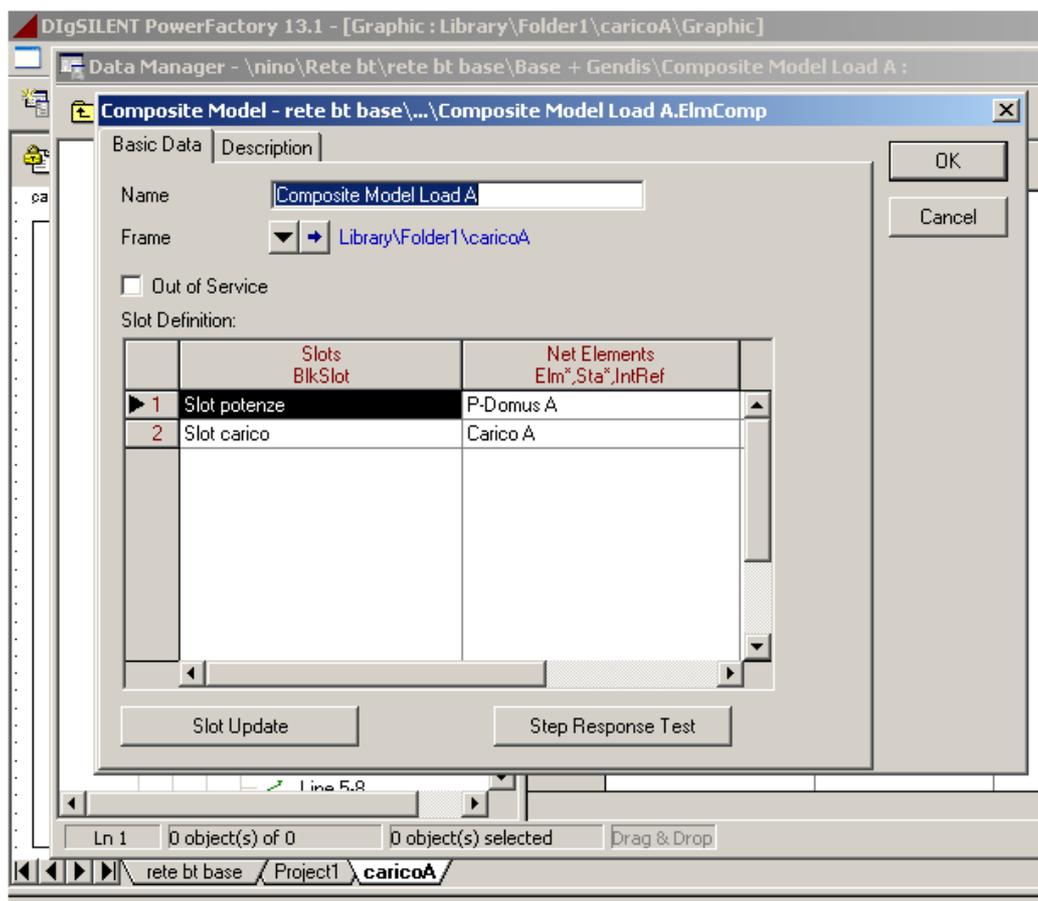
Il secondo frame avrà una scheda simile alla precedente, solo che il campo “Output” sarà questa volta vuoto, mentre nel campo “Input” sarà presente il segnale Pext.

La descrizione dello schema a blocchi è finita qui, non c’è di bisogno di introdurre alcuna funzione di trasferimento e sarà possibile passare alla creazione e definizione del Composite Model. Anche in questo frangente viene fuori una differenza rispetto alla programmazione DSL esposta nell’apposito capitolo in quanto la definizione del

Composite Model non richiede la definizione del Common Model proprio perché mancano i blocchi elementari con le loro funzioni di trasferimento.

Creato il Composite Model, bisognerà precisare quale sia il frame a cui puntare nell'apposito campo (vedi Fig.39).

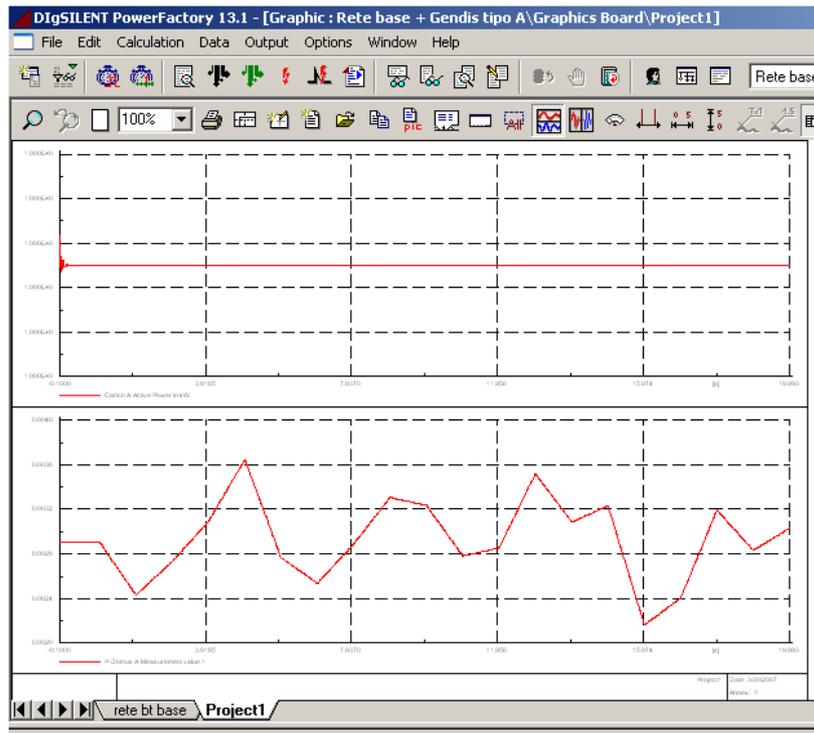
Nel campo sottostante, "Slot Definition" comparirà l'elenco degli slot presenti nel frame selezionato (due per l'appunto) a cui si dovranno associare degli oggetti.



**Fig.103: Dettaglio scheda del Composite Model**

Ad uno slot verrà associato il Measurement File creato precedentemente e presente nella griglia attiva, mentre al rimanente slot verrà associato un carico. Si è conclusa così la fase di definizione del Composite Model per cui si potrà dare l'OK.

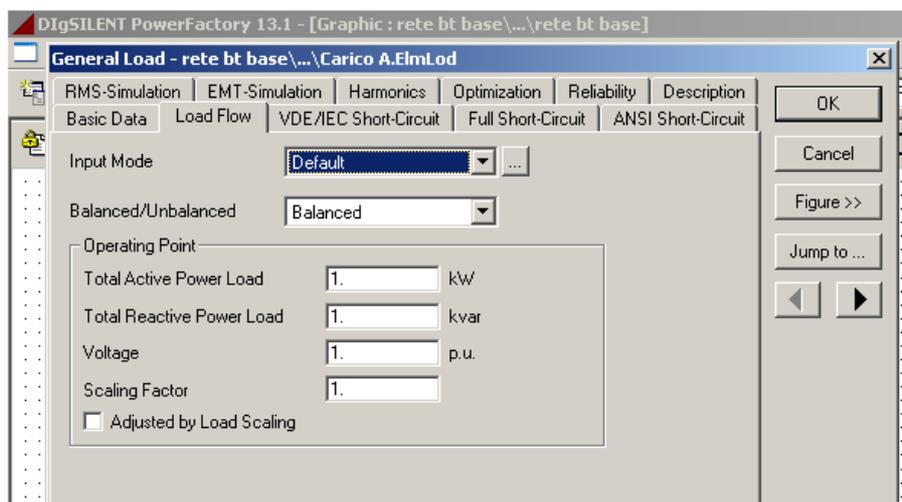
Se si dovesse provare adesso a lanciare una RMS Simulation si otterrebbe un risultato poco soddisfacente, come in Fig.40.



**Fig.104: Dettaglio potenza in ingresso ed in uscita dal carico**

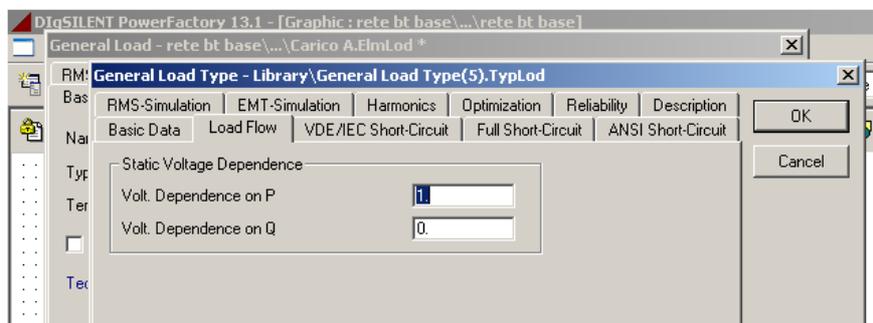
Nel grafico inferiore è mostrato l'andamento, per i primi 20s, delle potenze lette dal file testo e che dovrebbero essere quelle potenze che il carico dovrebbe richiedere alla rete. Il grafico superiore invece rivela che il carico assorbe dalla rete una potenza costante ed è ciò che non è soddisfacente.

Per sistemare le cose bisognerà lavorare sulle specifiche del carico interessato nella maniera seguente. Selezionare il carico con un doppio click per entrare nella sua scheda ed andare direttamente alla cartella "Load Flow" come mostrato in Fig.41.



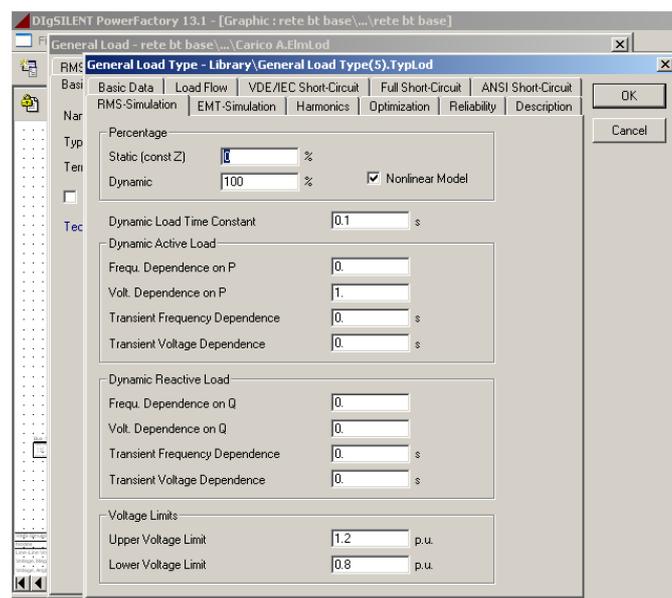
**Fig.105: Dettaglio scheda del carico**

Nel campo “Input Mode” bisognerà selezionare la voce “default”, nel campo “Balanced...” bisognerà scegliere “Balanced” poiché le nostre tipologie di carico sono tali. Nella sezione sottostante “Operating Point”, solo il campo “voltage” necessita di essere impostato ad uno in maniera tale da riferire la tensione di alimentazione del carico alla tensione del nodo (la quale tensione si cercherà di mantenere nell’intorno di un più o meno 4% attorno a 400 V), gli altri campi non hanno alcuna importanza in questa modalità di funzionamento. Adesso si dovrà ritornare alla cartella “Basic Data” e selezionare il tasto  in corrispondenza della voce “Type” al fine di accedere alla scheda del tipo del carico ed andare ad aprire la cartella “Load Flow” come in Fig.42.



**Fig.106: Dettaglio delle proprietà del carico**

Impostando i campi come in Fig.42 si vuole specificare che il carico è a potenza assegnata secondo la descrizione dei modelli ZIP. Successivamente si dovrà passare alla cartella RMS-Simulation della stessa scheda che apparirà come in Fig.43.

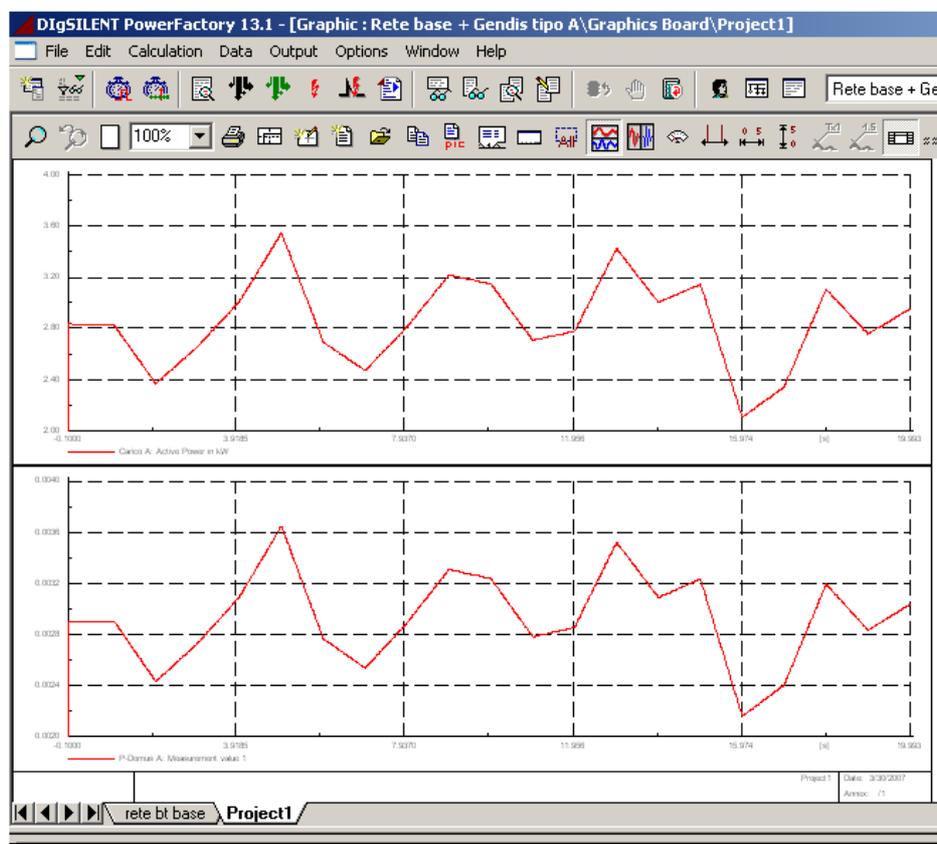


**Fig. 107: Dettaglio della cartella RMS Simulation del carico**

In tale finestra, per default il software imposta un carico statico al 100%, mentre per gli scopi che ci si prefigge il carico deve essere totalmente dinamico, per cui bisognerà introdurre il dato nel campo “Dynamic”, dopo di che si potrà dare l’ Ok a tutte le finestre perché si è terminata la definizione del carico. Lanciando adesso la stessa simulazione di prima si otterrà il risultato come in Fig.44.

Si può notare adesso che quanto viene letto nel file testo è quello che il carico richiede alla rete.

La stessa procedura verrà applicata alle utenze industriali con la sola differenza, rispetto al caso delle utenze domestiche, che non bisogna intervenire sulla scheda delle singole utenze, ovvero introdotto il componente nella rete e definito il suo tipo bisognerà solo introdurlo nello slot del Composite Model ed il lavoro sarà terminato.



**Fig.108: Dettaglio delle potenze in ingresso ed in uscita dal carico**

**Paragrafo 3.5:** L'impianto di generazione eolica

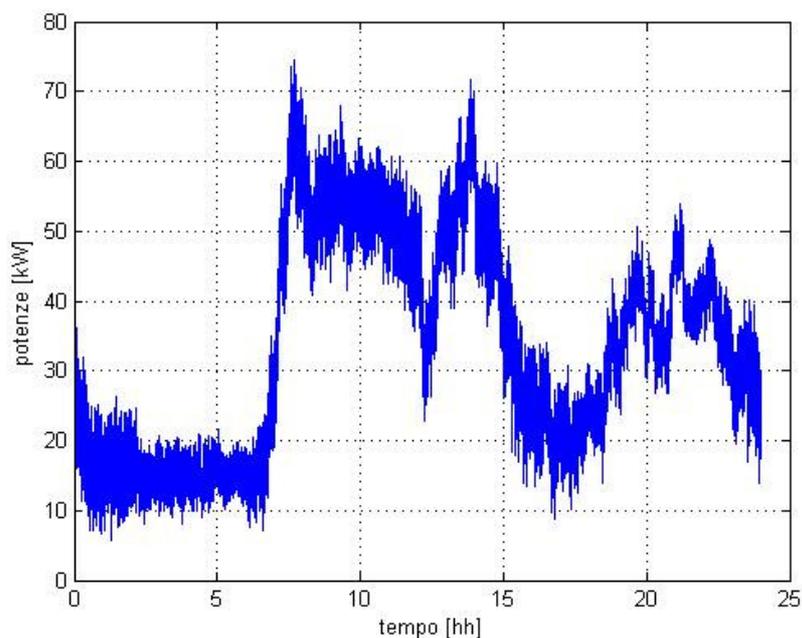
Il prossimo passo sarà quello dell'introduzione della generazione distribuita costituita, inizialmente, da una coppia di generatori eolici con una potenza di 35 kW ciascuno e direttamente allacciati alla rete BT. L'allacciamento alla rete non vede l'interposizione di trasformatori perché i generatori asincroni che equipaggiano gli impianti eolici forniscono la loro potenza ad una tensione di 400 V.

Il principio di funzionamento di questi generatori eolici è lo stesso visto nel capitolo "progetto di un generatore eolico", per cui si adotteranno gli stessi schemi a blocchi apportando però le dovute modifiche alla turbina eolica, che ovviamente avrà dimensioni e prestazioni ridotte, ed al generatore asincrono.

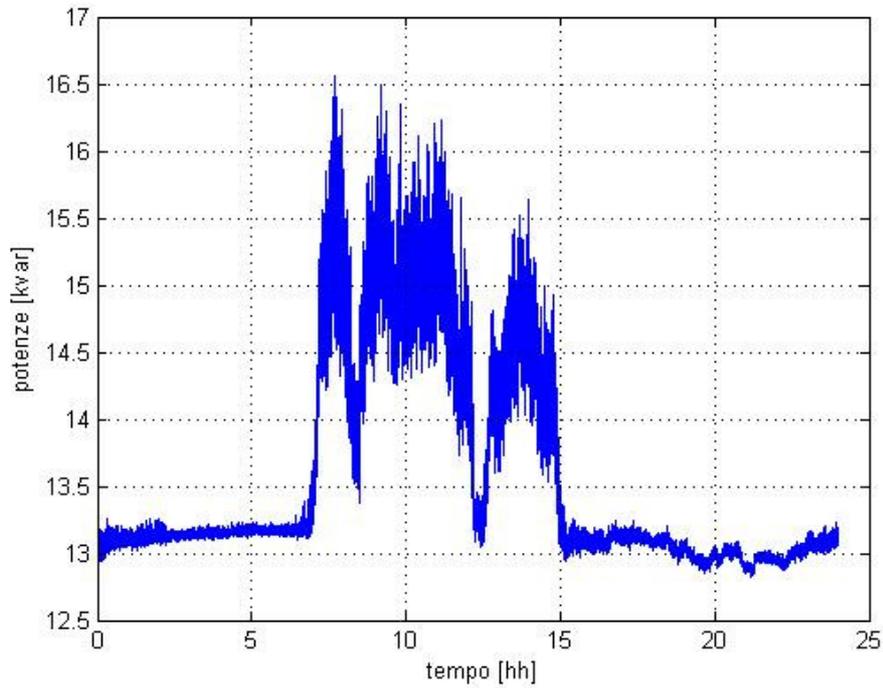
I dati per la progettazione della nuova turbina eolica sono stati attinti da un progetto eseguito dall' ENEL in collaborazione con la FIAT ([C,P-1976]).

**Paragrafo 3.6:** L'influenza della generazione distribuita sulla rete BT

Il primo aspetto che verrà passato in rassegna sarà la potenza assorbita dalla rete nel nodo di collegamento MT/BT in assenza generazione distribuita. La simulazione interesserà l'arco di una intera giornata. L'andamento riportato in Fig.45 rappresenta la potenza attiva, mentre l'andamento riportato in Fig.46 rappresenta la potenza reattiva.



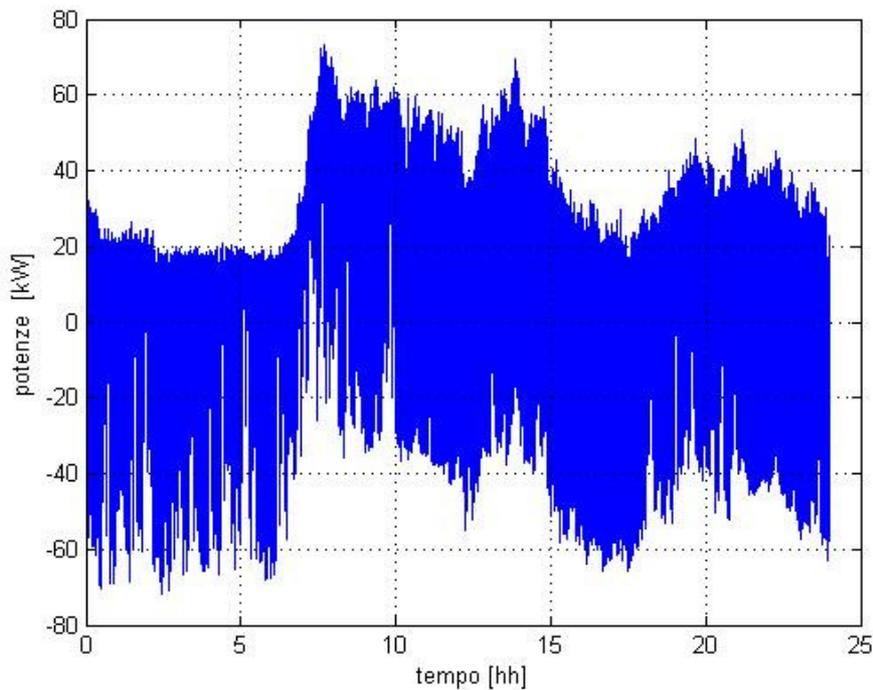
**Figura 109:** Andamento potenza attiva attraverso la stazione MT/BT



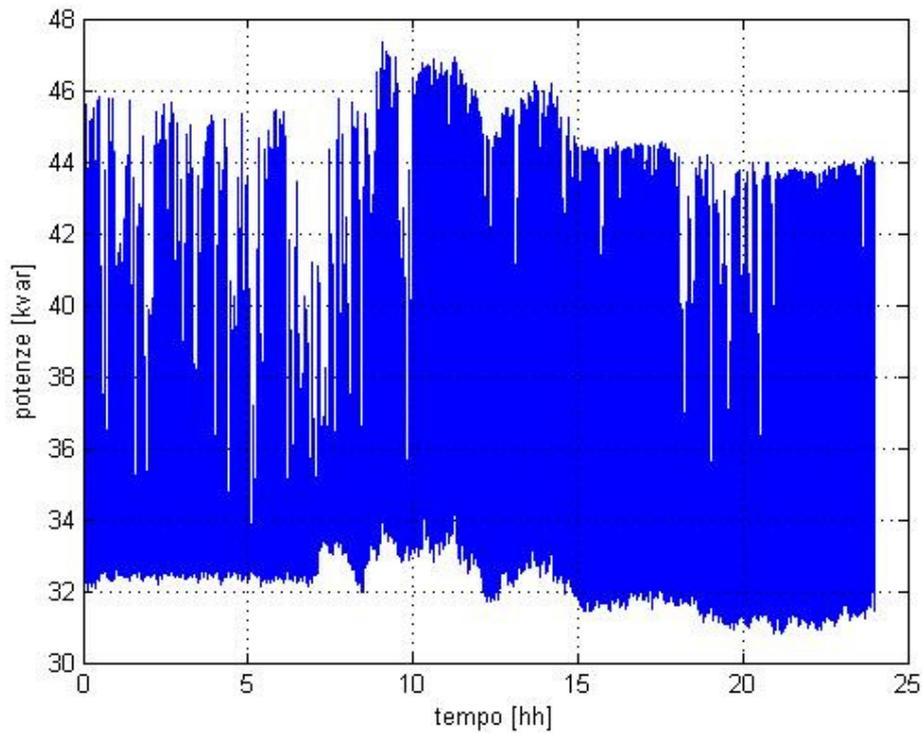
**Fig.110: Andamento della potenza reattiva attraverso la stazione MT/BT**

Successivamente si eseguirà la stessa simulazione posizionando gli impianti di generazione distribuita ai nodi di puro carico 10 e 14.

Nelle Fig.47 e Fig.48 sono riportati rispettivamente gli andamenti della potenza attiva e reattiva assorbite dalla rete.

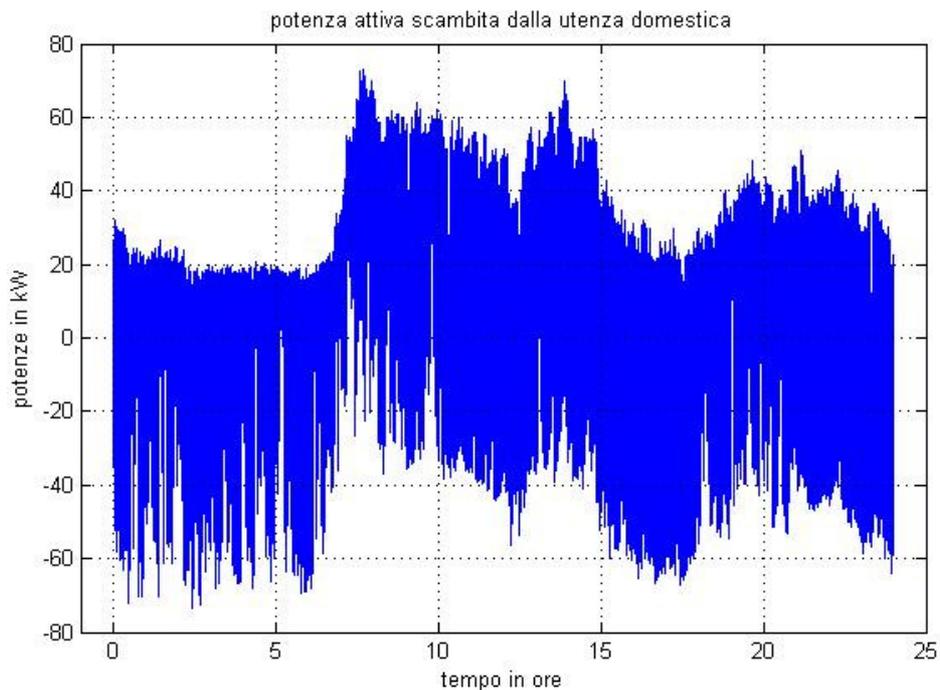


**Fig.111: Andamento della potenza attiva**

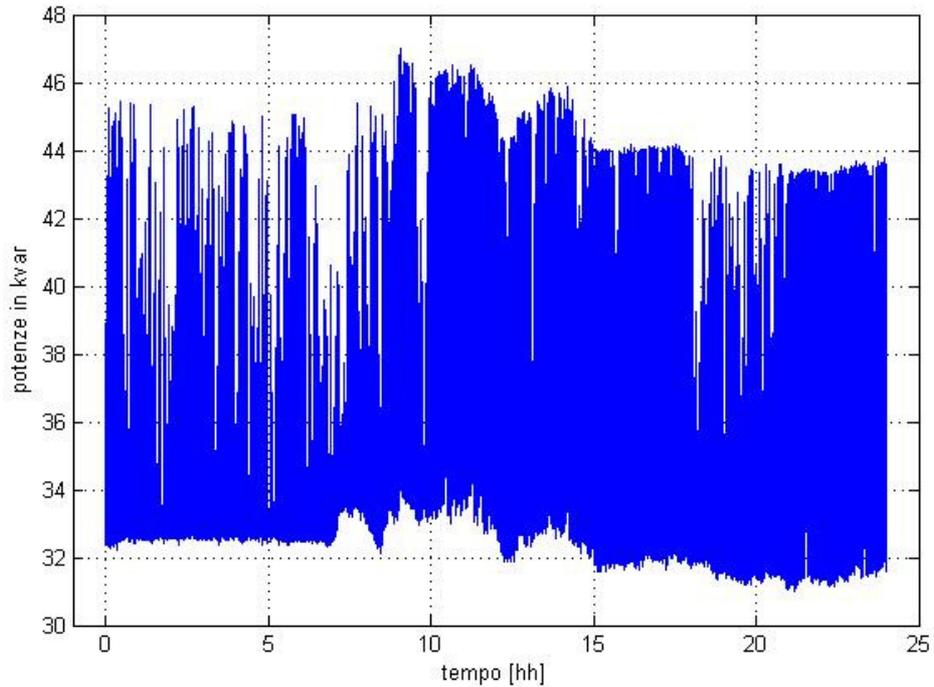


**Fig.112: Andamento della potenza reattiva**

Posizionando la generazione distribuita ai nodi 6 e 9 si otterranno, per la potenza attiva l'andamento riportato in Fig.49 mentre per la potenza reattiva l'andamento riportato nella Fig.50.

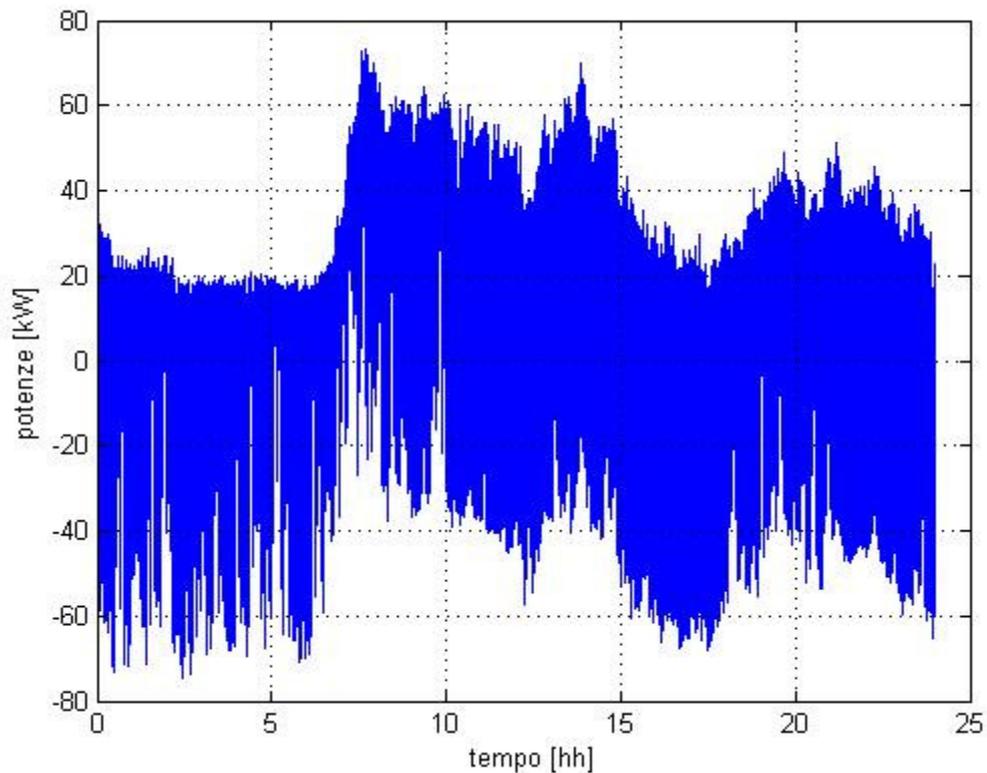


**Fig.113: Andamento potenze attive**

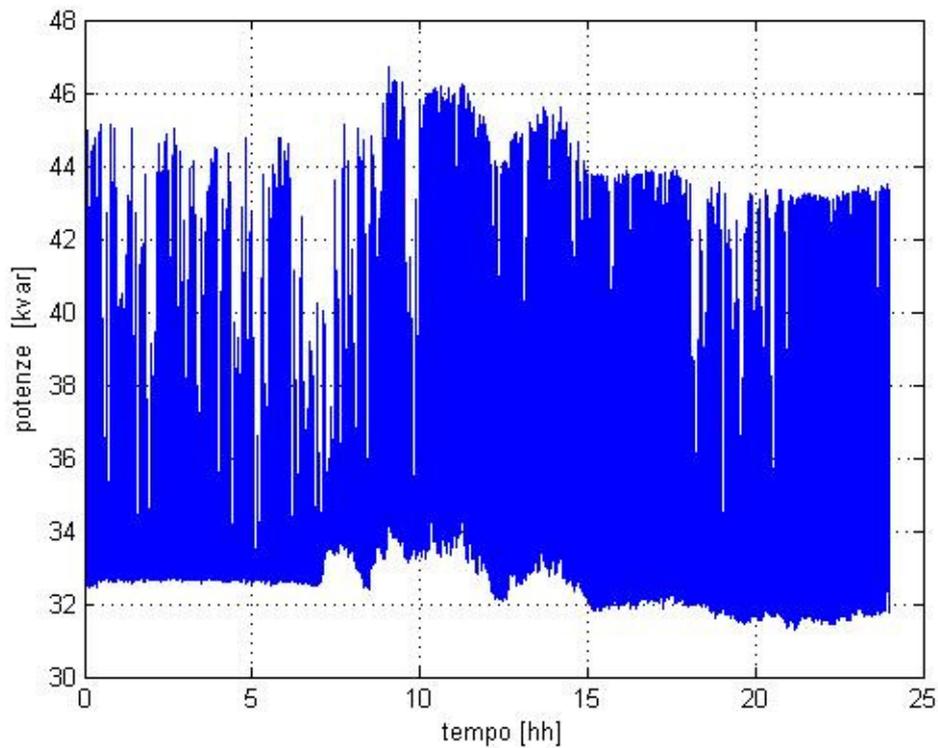


**Figura 114: Andamento delle potenze reattive**

Nella successiva simulazione i generatori eolici verranno posizionati ai nodi 3 e 5. Nella Fig.51 e nella Fig.52 vengono rappresentate rispettivamente le potenze attive e reattive scambiate con la rete MT attraverso la stazione.

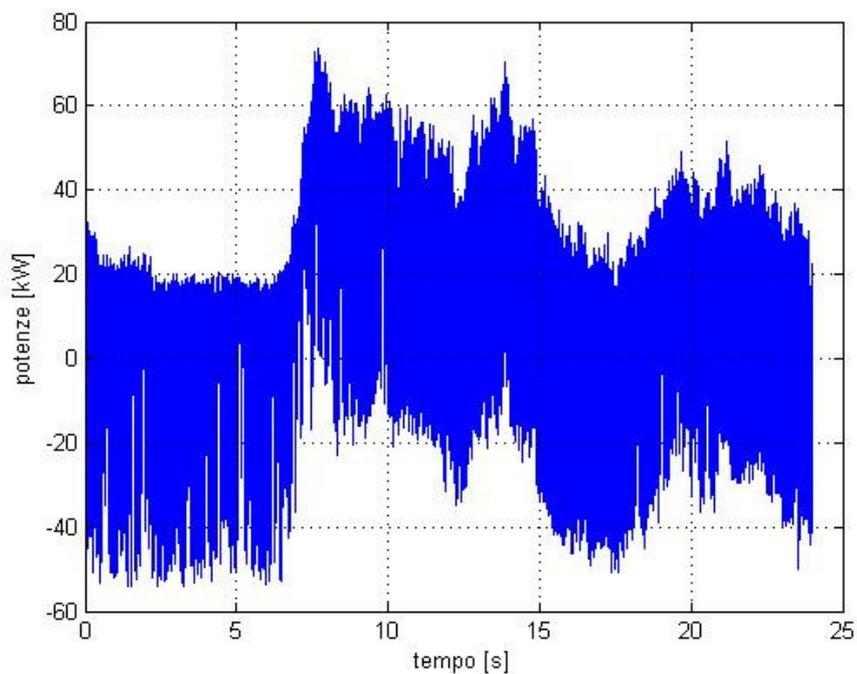


**Fig.115: Andamento delle potenze attive**



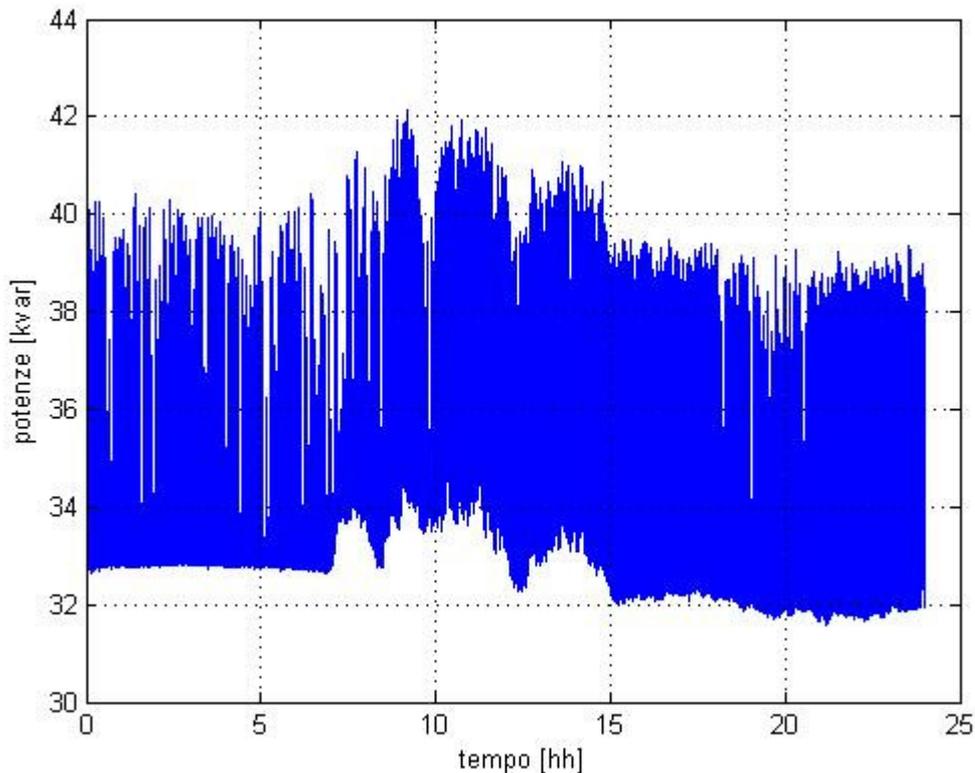
**Fig.116: Andamento delle potenze reattive**

L'ultima simulazione vedrà l'installazione della generazione distribuita nei nodi immediatamente a valle della stazione MT/BT. Nella Fig.53 è riportato l'andamento delle potenze attive.



**Fig.117: Andamento delle potenze attive**

Nella Fig.54 è riportato l'andamento delle potenze reattive.



**Fig.118: Andamento delle potenze reattive**

Dalla precedente esposizione può essere notata una grossa differenza, negli andamenti delle potenze attive, passando dal caso di assenza di generazione distribuita al caso con generazione distribuita. La stessa cosa non potrà dirsi per i diversi andamenti, sempre delle potenze attive, ottenuti spostando semplicemente gli impianti eolici da valle verso monte. Tuttavia bisogna anche dire che esiste, con l'impiego della generazione distribuita un flusso di potenza attiva verso la rete MT. Per quanto riguarda invece l'assorbimento di potenza reattiva, si può dire che non rispecchia lo stesso beneficio mostrato dalle potenze attive in quanto le macchine asincrone che equipaggiano i generatori eolici hanno una richiesta di potenza reattiva che non può provenire che dalla rete esterna.

L'installazione di impianti di generazione distribuita sulle reti MT e BT influisce su molti aspetti riguardanti la loro gestione ed il loro esercizio. Tra questi aspetti si trova il profilo della tensione.

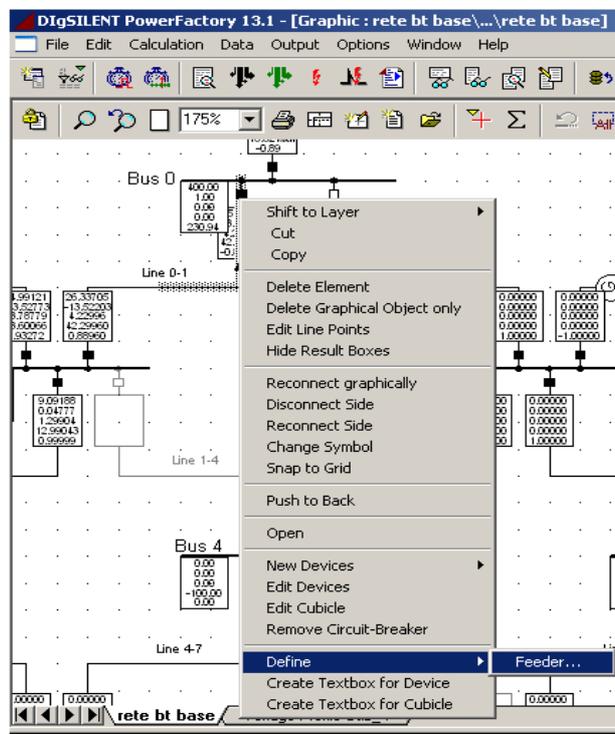
La presenza della generazione distribuita porta ad un innalzamento di tale profilo di tensione proprio perché vi è una iniezione di potenza attiva ed eventualmente di potenza reattiva.

Queste variazioni di tensione dipendono anche da fattori quali per esempio la posizione della stessa generazione distribuita lungo la linea.

Per condurre tale analisi si sfrutterà uno strumento grafico fornito da DIgSilent che permette di fornire l'andamento della tensione lungo un determinato "Feeder". Partendo dalla rete originale verrà isolato un determinato percorso, che includa anche la generazione distribuita, che parte dal nodo di allacciamento alla rete esterna ed arrivi ad un carico. Il tratto di rete che si è deciso di isolare è quello che partendo dal bus 0 alimenta direttamente il carico A; tutti gli altri rami saranno aperti ad un capo.

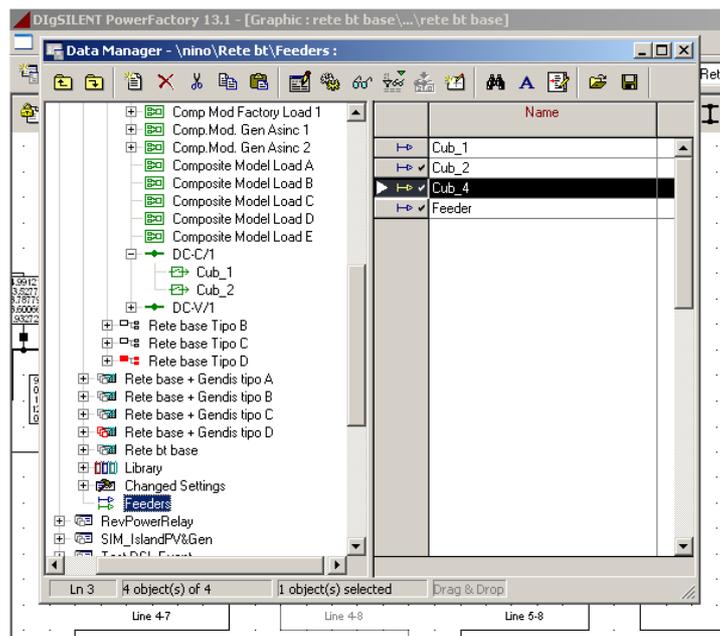
Per accedere al grafico "Voltage Profile" bisogna lanciare prima una simulazione di Load Flow selezionando il tasto  posto nella barra degli strumenti di DIgSilent. Successivamente si dovrà selezionare un "cubicle", ovvero uno di quegli oggetti che nello schema unifilare ospitano gli switch, con un singolo click del tasto destro del mouse facendo così apparire un menù attivo.

Da tale menù bisognerà scegliere la voce "Define" che si troverà nella parte bassa dello stesso come mostrato in Fig.45. Selezionando adesso la voce "Feeder..." si sarà definito come tale tutto il percorso a valle del "cubicle" selezionato fino al carico A.



**Fig.119: Dettaglio menù definizione profilo di tensione**

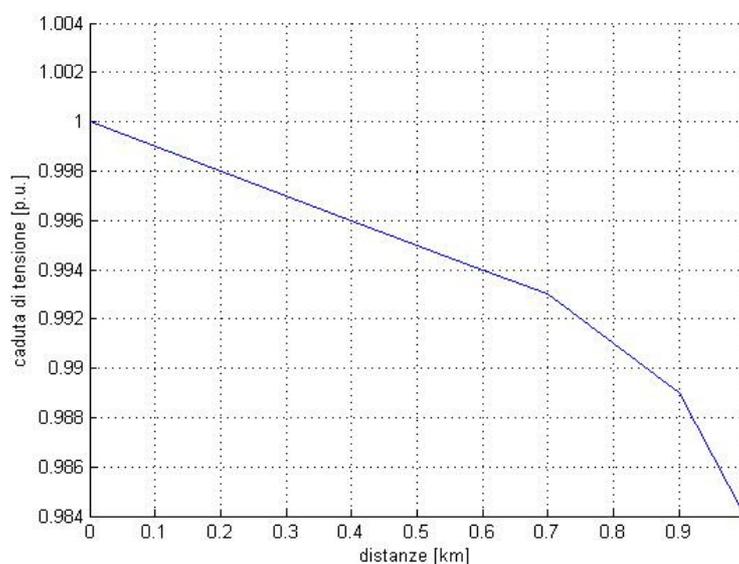
Questo nuovo feeder sarà disponibile nella cartella omonima presente nel progetto come mostrato in Fig.46.



**Fig.120: Dettaglio elenco feeders disponibili**

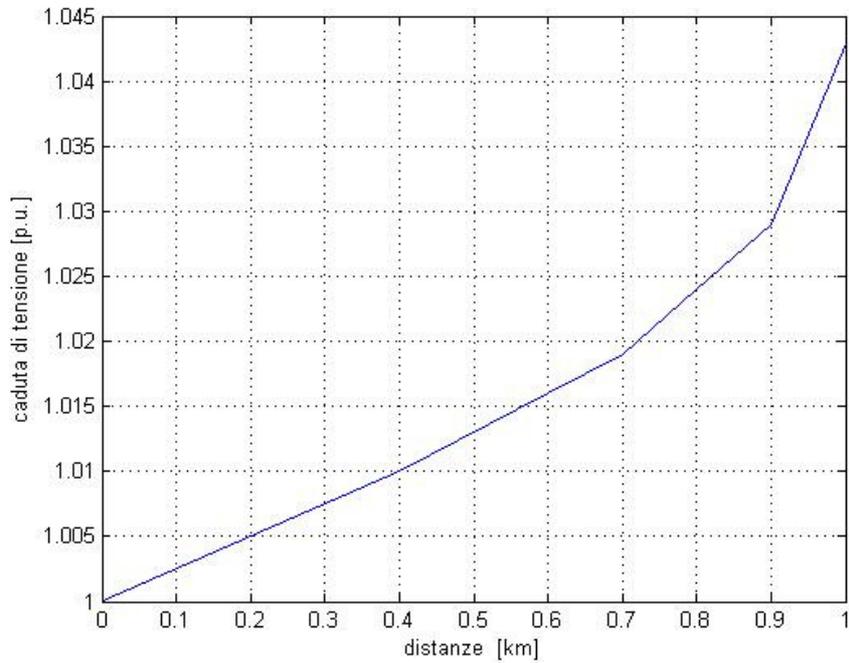
A questo punto si dovrà creare la pagina grafica e la procedura sarà la stessa vista per i grafici usuali. Lanciata la simulazione di Load Flow, si dovrà cercare il feeder interessato come in Fig.46, selezionarlo sul suo simbolo  con un click del tasto destro attivando così un menù dal quale bisognerà scegliere la voce “Show” e successivamente “Voltage Profile”.

Si effettuerà tale procedura per ognuno degli Study Case presenti nel progetto ottenendo i risultati mostrati nel seguito a partire dal caso di generazione distribuita vicino al carico. In particolare, la Fig.57 mostra l’andamento della tensione ai nodi nel caso in cui non ci sia generazione distribuita nella rete.



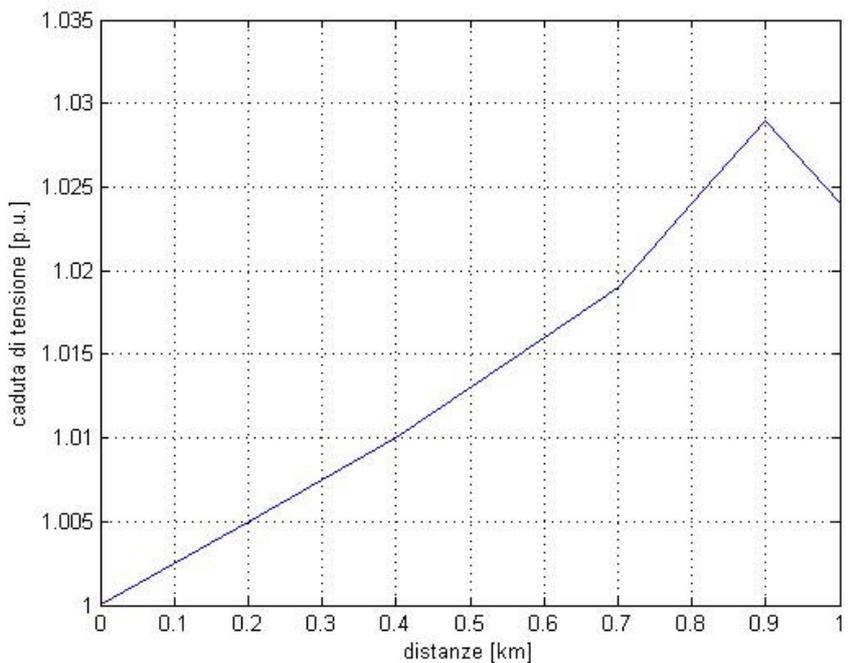
**Fig.121: Profilo di tensione senza generazione distribuita**

Nella Fig.58 è riportato l'andamento della tensione ai nodi nel caso in cui il generatore eolico venga allacciato al nodo 10 della rete Bt.



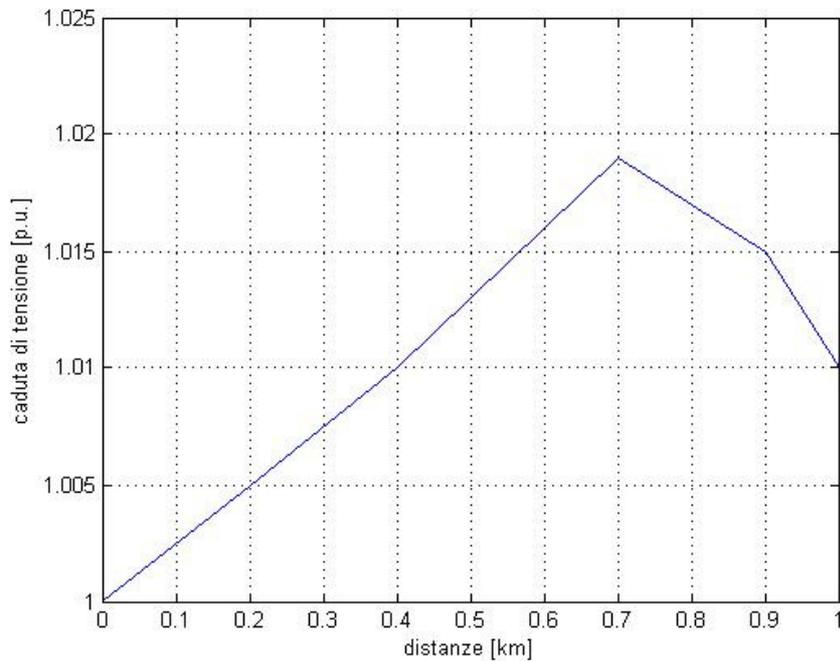
**Fig.122: Profilo di tensione con generatore eolico al nodo 10**

Nella Fig.59 è riportato l'andamento della tensione ai nodi nel caso in cui il generatore eolico venga allacciato al nodo 6 della rete in Bassa Tensione.



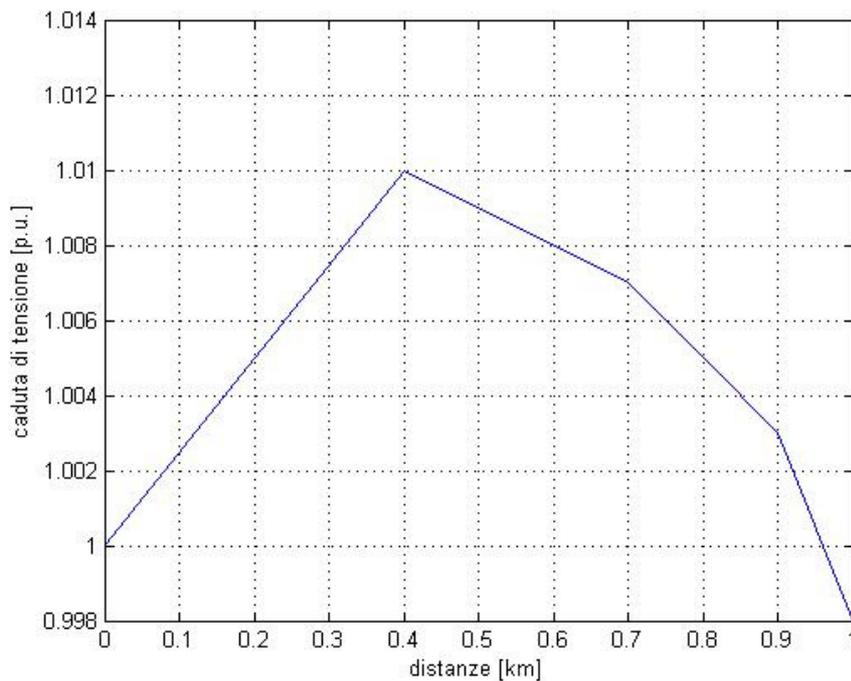
**Fig.123: Profilo di tensione con il generatore eolico al nodo 6**

Nella Fig.60 è riportato l'andamento della tensione ai nodi nel caso in cui il generatore eolico venga allacciato al nodo 3 della rete Bt.



**Fig.124: Profilo di tensione con generatore eolico al nodo 3**

Ed infine nella Fig.61 viene riportato il profilo di tensione nel caso in cui la generazione distribuita venga allacciata al nodo 1.



**Fig.125: Profilo di tensione con generazione distribuita al nodo 1**

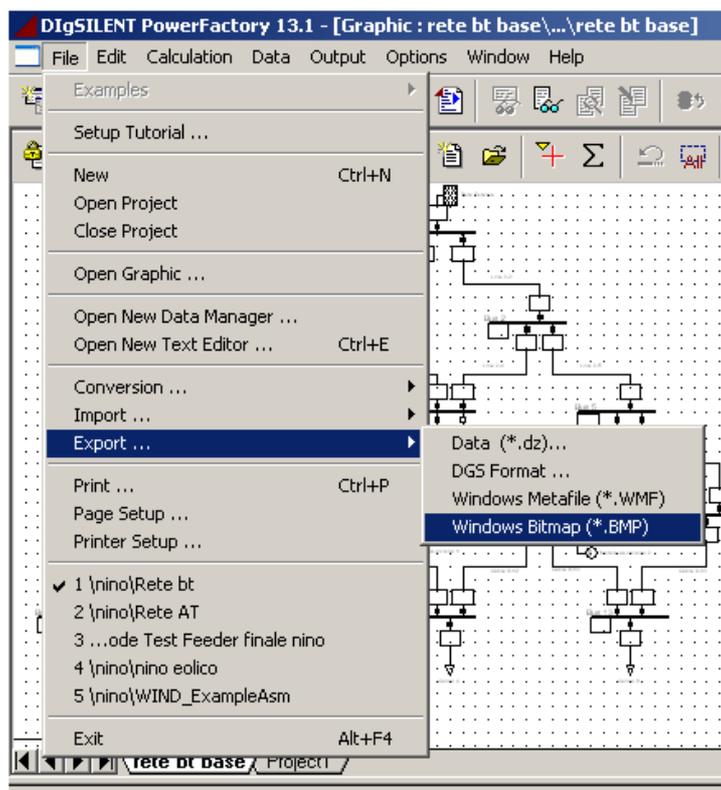
**Paragrafo 3.7:** Ancora sui grafici di DIgSilent

Il software DIgSilent fornisce un altro strumento per la rappresentazione grafica, costituito dalla possibilità di trasformare i grafici ottenuti da una RMS Simulation in file di altro tipo.

Nel caso in cui si volesse salvare un disegno oppure un grafico presente nella sezione “Graphic Window” basterà selezionarlo con un singolo click del tasto sinistro del mouse dopo di che si dovrà selezionare la voce “File” presente nella barra degli strumenti superiore di DIgSilent. Verrà fuori un menù attivo come mostrato in Fig.61.

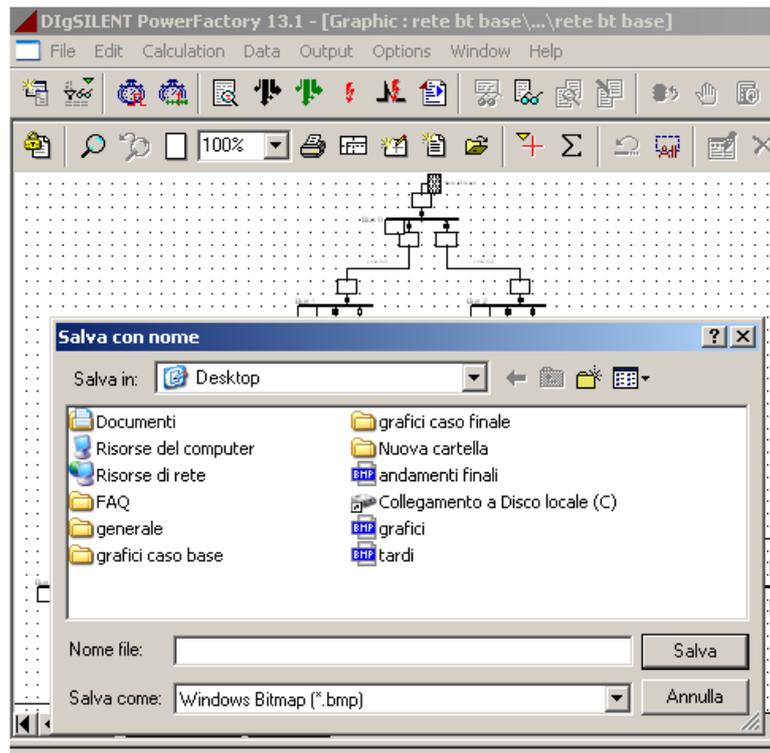
Da tale menù attivo si dovrà selezionare la voce “Export...” semplicemente trascinandovi sopra il cursore ed attivando così un secondo menù attivo (vedi Fig.62).

Dal secondo menù attivo bisognerà selezionare la voce “Windows Bitmap”; comparirà una nuova finestra



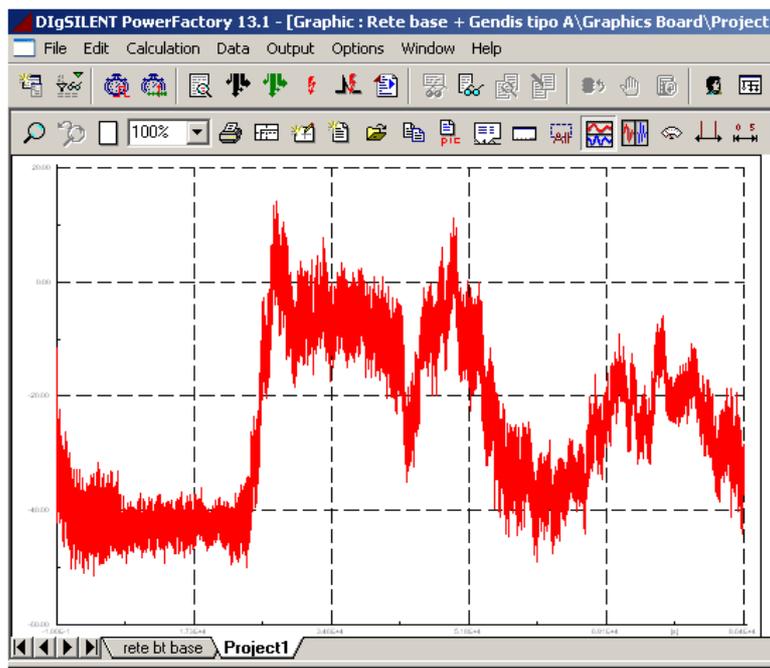
**Fig.126: Dettaglio del menù attivo**

Dal secondo menù attivo bisognerà selezionare la voce “Windows Bitmap”; comparirà una nuova finestra di dialogo, come in Fig.63, in cui bisognerà introdurre la cartella di destinazione del file e soprattutto il nome.



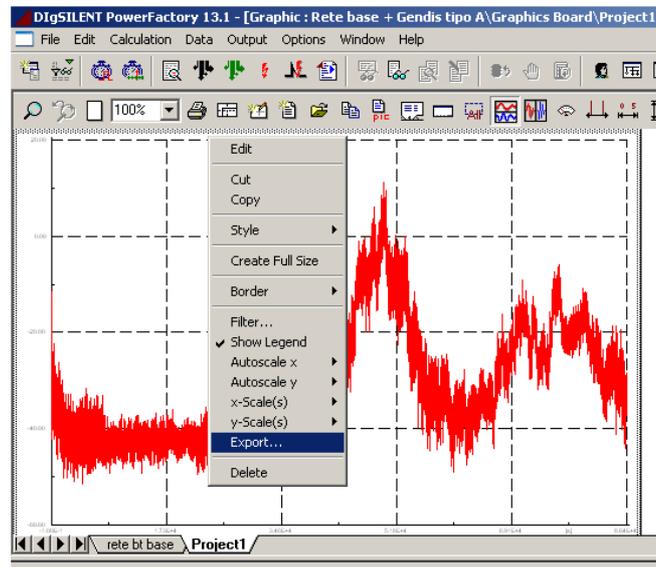
**Fig.127: Dettaglio scelta formato immagine**

Una seconda modalità per eseguire l'export dei grafici, e forse più interessante, verrà riportata a seguire. Una volta eseguita la RMS Simulation bisognerà riportare su di un foglio grafico una determinata grandezza, come per esempio quella riportata nella Fig.64.



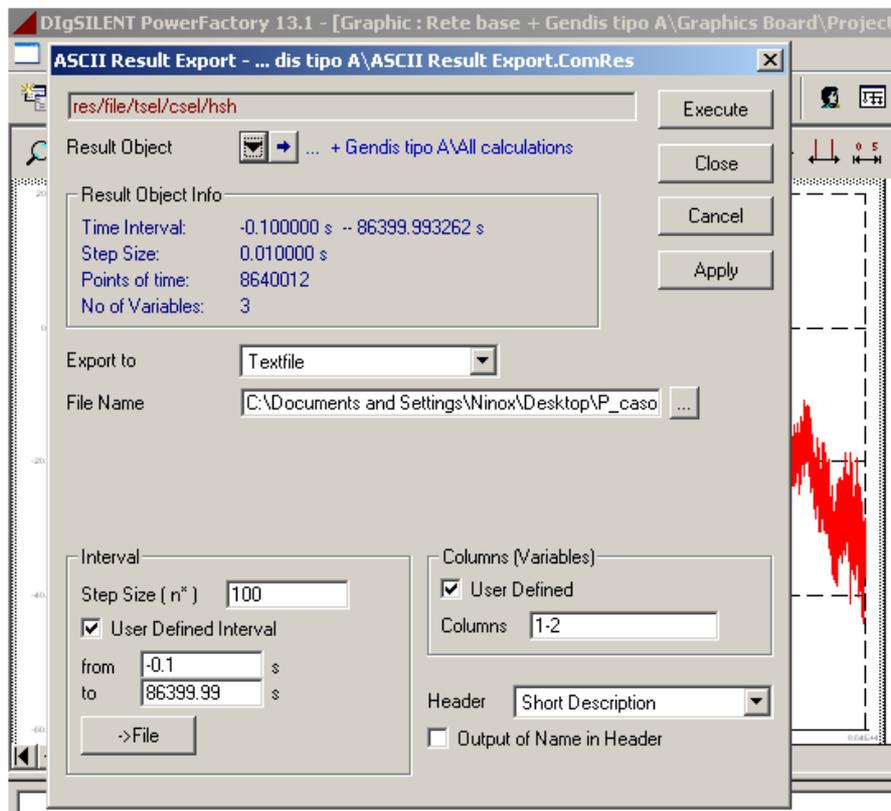
**Fig.128: Dettaglio pagina grafica**

A questo punto bisognerà selezionare l'area del grafico con un singolo click del tasto destro del mouse attivando così un menù, come mostrato in Fig.65.



**Fig.129: Dettaglio della funzione export**

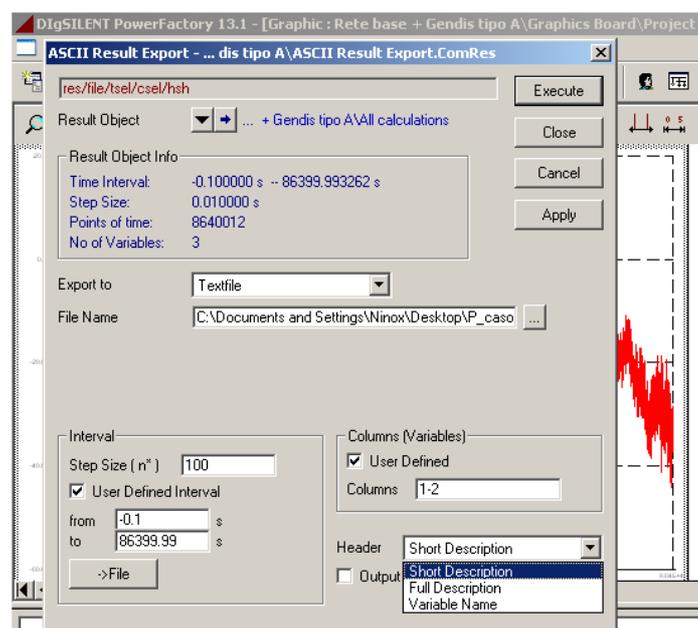
Da questo menù attivo dovrà essere scelta la voce “Export” con un click del tasto destro del mouse facendo aprire così la finestra di dialogo come in Fig.66.



**Fig.130: Dettaglio della scheda descrittiva della funzione Export**

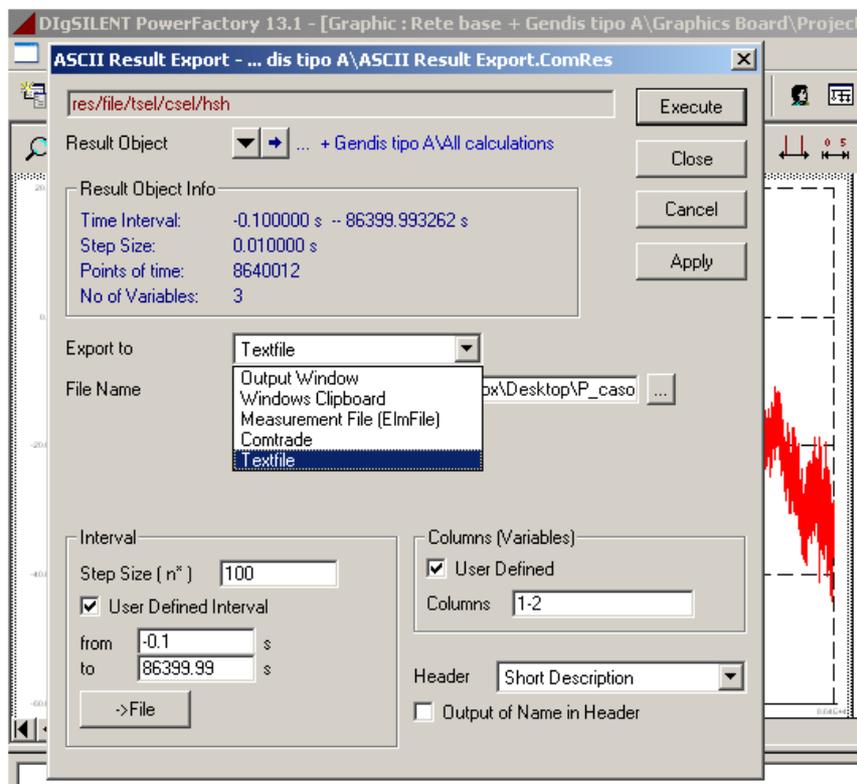
La parte più intuitiva di tale finestra è quella denominata “Interval” nella quale vengono riportati gli estremi dell’intervallo, nel dominio del tempo, che è oggetto di interesse e come si vede possono essere incluse anche le condizioni iniziali. Nel campo denominato “Step Size” deve essere introdotto il passo di campionamento del suddetto intervallo di tempo. Se si scegliesse di mettere un valore unitario allora ne risulterebbe un intervallo campionato al millisecondo, se invece si decidesse di mettere 100 significherebbe che il passo sarebbe di 100 ms ovvero 0.1 s. La differenza che passa tra le due modalità sopra enunciate sta nella dimensione del file risultante (per esempio per un intervallo di circa 80000 valori il file testo varia la sua dimensione da qualche MB a qualche centinaio di MB). Nella parte denominata “Columns (Variables)” compaiono dei numeri, in questo caso sono due, che hanno un duplice significato. In primo luogo identificano il numero di colonne che verranno stampate nel file testo. In secondo luogo, se in una simulazione si sono raccolti dati per dieci grandezze allora il software assegna ad ognuna di queste un numero da 2 a 11 poiché il numero 1 è riservato sempre alla colonna tempo. Quindi volendo utilizzare tale funzione di export bisognerà sapere quale numero è stato associato alla nostra grandezza e riportarlo nel campo bianco, senza nessun altro numero qualora si volesse ottenere un file con una sola colonna altrimenti nello stesso campo si riporteranno i codici di tutte le grandezze che si vorranno separate o dal trattino oppure dalla virgola.

Nel sottostante campo denominato “Header” viene offerta la possibilità di inserire informazioni su ogni colonna scegliendo come riportato in Fig.67.



**Figura 131: Dettaglio della scheda di export**

A questo punto si rivolgerà l'attenzione al campo denominato "Export to" dove sarà possibile scegliere il tipo di file destinazione di tutti i dati come indicato nella Fig68.



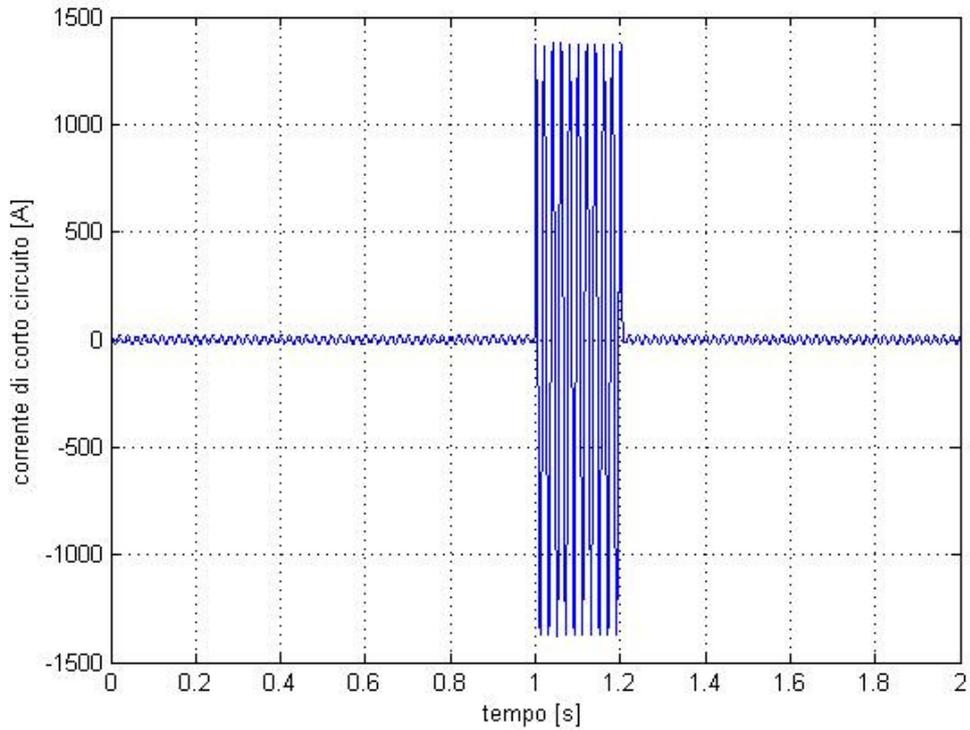
**Figura 132: Dettaglio della scheda della funzione export**

La prima voce dell'elenco, "Output Window" permette di visualizzare i dati nell'omonima sezione di DIgSilent. La seconda voce "Windows Clipboard" rende disponibili i dati per l'operazione di copia incolla. La terza voce "Measurement File" crea un file testo pronto per il successivo utilizzo nello stesso DIgSilent (si ricordi la procedura per l'introduzione delle velocità del vento oppure ancora dei carichi). La quarta voce invece, "Textfile", permette di generare un semplice file testo.

Selezionando, a questo punto, il tasto "Execute" si creerà il file scelto nella directory desiderata.

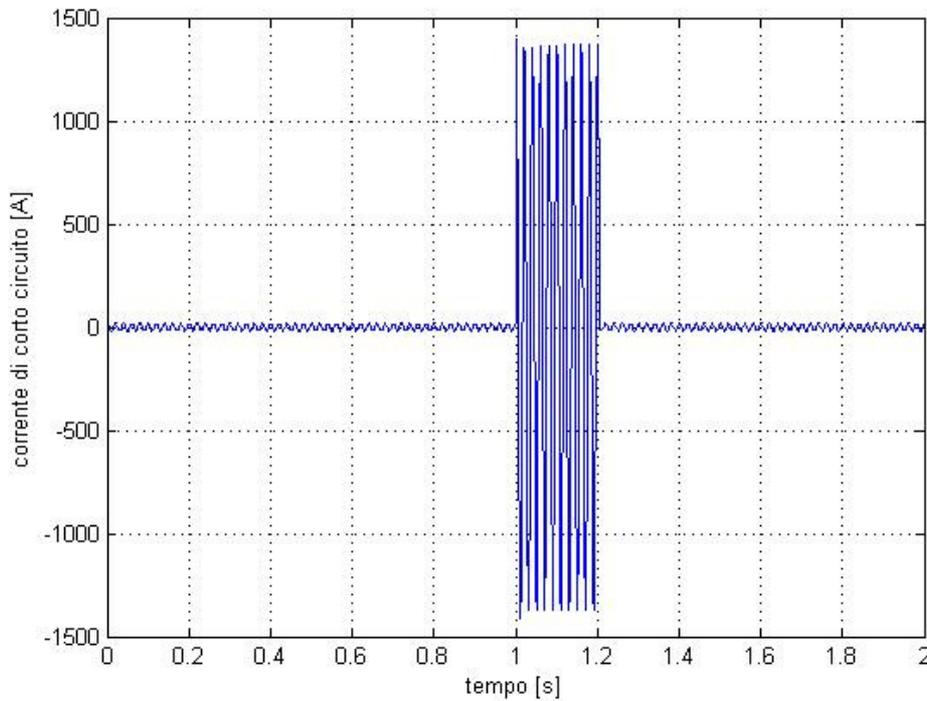
### **Paragrafo3.8: Le prove di corto circuito sulla rete di bassa tensione**

La prima prova che si intende realizzare è la simulazione di un corto circuito trifase in un nodo di puro carico che viene interrotto dalle protezioni di macchina. Nella Fig.68 è riportato l'andamento della corrente di guasto in assenza di generazione distribuita.



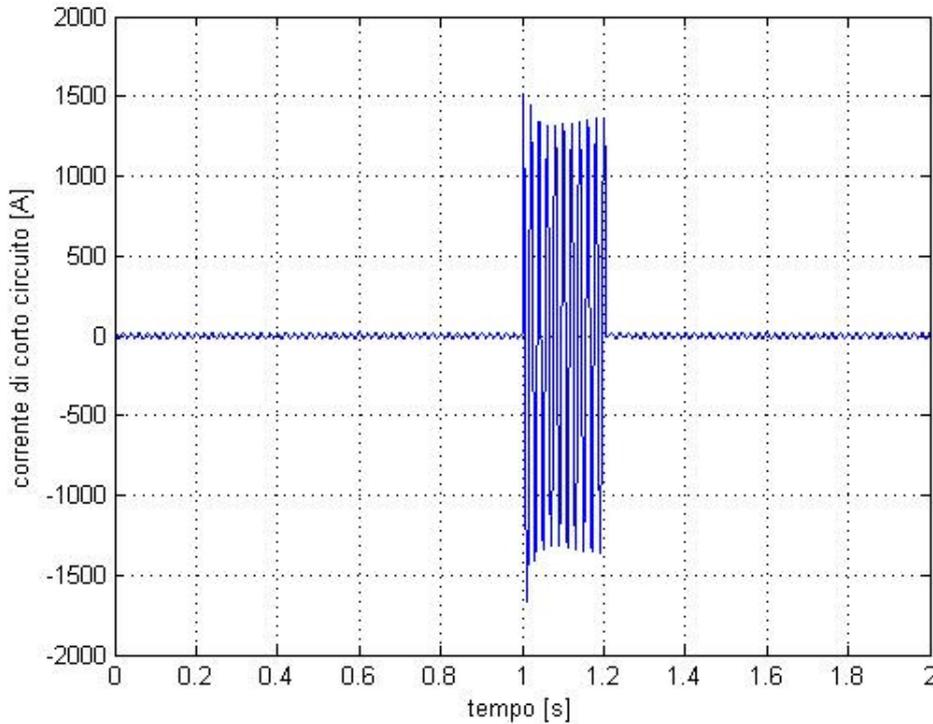
**Fig.133: Corrente di guasto attraverso la linea**

Nella successiva Fig.70 è riportato l'andamento della corrente di guasto in presenza di due impianti di generazione distribuita.



**Fig.134: Andamento della corrente di guasto attraverso la linea**

La differenza tra i due precedenti grafici è veramente piccola e la si può notare soltanto nei primissimi picchi della corrente di guasto in Fig.69. Tale differenza può essere incrementata incrementando la potenza degli impianti di generazione distribuita come mostrato nella Fig.71.



**Fig.135: Andamento della corrente di guasto in linea**

Per ottenere quest'ultimo risultato, la potenza degli impianti di generazione distribuita è stata addirittura triplicata a giudicare la lieve influenza di questi impianti sulle correnti di corto circuito delle reti in Bassa tensione.

## CAPITOLO 4

### LO STATO DELL'ARTE DEL CORTO CIRCUITO NELLE RETI AD ALTA TENSIONE

#### Paragrafo 4.1: La definizione della rete ad alta tensione

La rete ad alta tensione che viene presa in considerazione in questa sede ha le seguenti caratteristiche. Nella Tab.1 sono riportate le caratteristiche dei nodi, nella Tab.2 ci sono le caratteristiche dei carichi, nella Tab.3 ci sono le caratteristiche dei generatori elettrici mentre nella Tab.4 ci sono le caratteristiche dei carichi.

**Tab. 4: Caratteristiche dei nodi**

Nodo	Tensione Nominale [kV]
1	225
2	225
3	225
4	225
5	225
6	225
7	225
8	225
9	225
10	225

**Tab. 6: Caratteristica dei carichi**

carichi		
nodo	P [MW]	Q [Mvar]
2	250	150
4	100	63
6	100	35
7	100	30
8	150	75
9	250	150
10	100	50

**Tab.5: Caratteristiche dei generatori**

generatori		
nodo	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	0	0
2	306	229,5
3	194	145,5
5	212	159
7	174	130,5

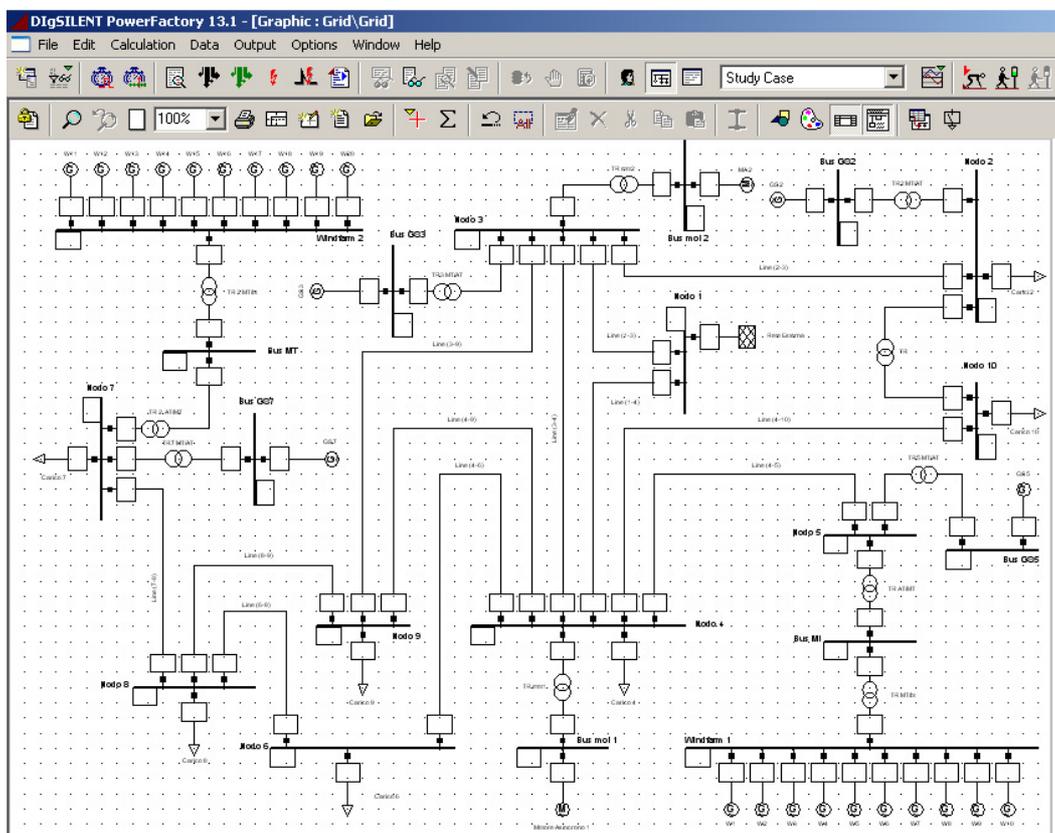
**Tab. 7: Caratteristiche delle linee elettriche**

linee			
nodi	L [km]	R [ohm/km]	X [ohm/km]
1-3	94,655	0,0528	0,2589
1-4	66,766	0,0749	0,367
3-4	147,066	0,0408	0,2696
3-9	101,186	0,0568	0,2767
2-3	151,292	0,1507	0,4138
4-9	188,329	0,1312	0,515
4-6	67,103	0,0559	0,3688
4-10	134,431	0,0614	0,2455
4-5	60,465	0,03307	0,16535
8-9	188,329	0,1312	0,515
6-8	107,829	0,088	0,295
7-8	147,066	0,0408	0,2686

A questa configurazione iniziale sono state apportate delle modifiche. La prima modifica è stata l'introduzione di due motori asincroni, funzionanti secondo la loro

caratteristica coppia-velocità, che vengono però allacciati alla rete a mezzo di due cabine.

La seconda modifica ha toccato quelle linee (sono la 3-9,4-9 e la 8-9) che, a seguito di una simulazione di Load Flow, presentavano una caduta di tensione relativa percentuale superiore alla soglia limite del 4%. La soluzione è stata trovata passando dalla configurazione a linea singola a quella con tre linee in parallelo e successivamente rilanciando la simulazione di load flow si noterà come adesso tutte le linee rispettano il vincolo sulla caduta di tensione percentuale. La terza modifica ha riguardato l'introduzione di due windfarm allo scopo di verificare quale fosse l'influenza delle risorse distribuite sulle correnti di corto circuito e soprattutto sulla stabilità della stessa rete. I due impianti di generazione eolica hanno una taglia di 37500 MVA ciascuno e sono costituiti da dieci turbine eoliche collegate a delle macchine asincrone funzionanti come generatori. Per la progettazione di ciascuno di questi generatori eolici si è fatto riferimento ad un modello realizzato dalla VESTAS della potenza di 3MW e con una tensione nominale di 1kV. Per potere allacciare queste due windfarm alla rete si sono rese necessarie due stazioni di trasformazione AT/MT, per portare la tensione da 225 kV a 22 kV, ed MT/BT che portano la tensione da 22 kV ad 1 kV. La nuova rete così modificata si presenta come nella Fig.1.

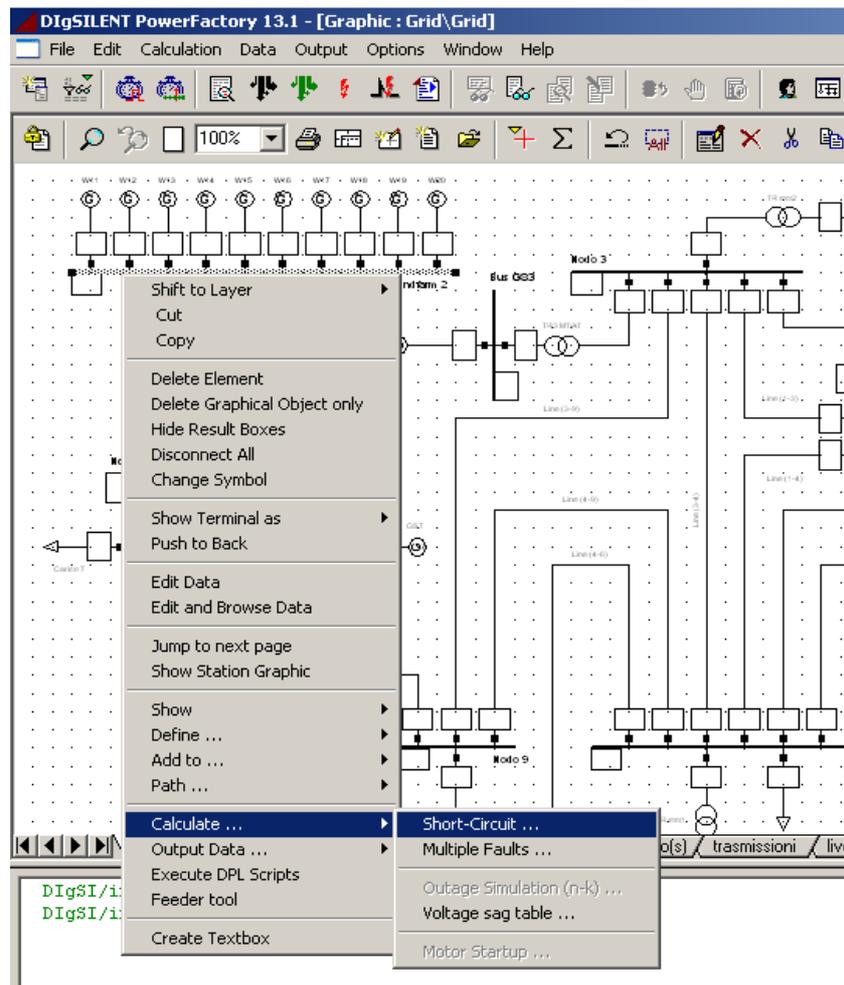


**Fig.136: Schema unifilare della rete AT**

**Paragrafo 4.2:** Il calcolo del corto-circuito con DIgSilent

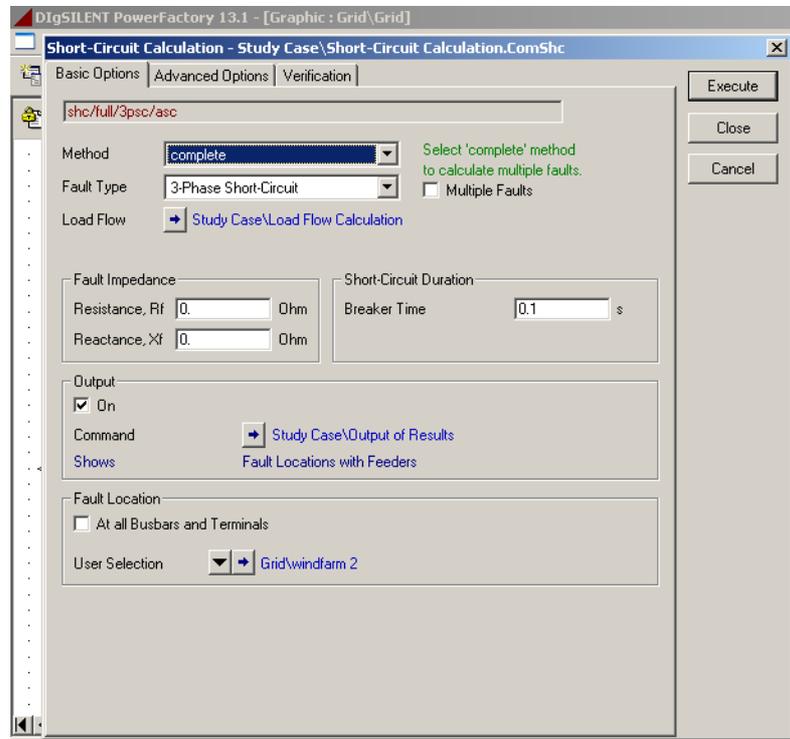
Tale studio viene condotto lanciando una simulazione di load flow con l'ipotesi della presenza di un guasto in rete. Il software DIgSilent fornisce la possibilità di eseguire tale studio seguendo diverse norme ma in tale contesto si è scelto di usare la norma internazionale IEC 60909.

In questo paragrafo saranno passate prima in rassegna le modalità di esecuzione dello studio di corto circuito e solo successivamente verranno presentate le prove eseguite sulla rete AT. DIgSilent permette di simulare guasti singoli come anche quelli multipli ai nodi come alle linee, ma cominciamo con il guasto singolo ad un nodo. Bisogna inizialmente selezionare il nodo interessato con in singolo click del tasto destro del mouse, a seguito comparirà un menù attivo dal quale verrà scelta la voce "Calculate..." che aprirà un nuovo menù attivo dal quale si dovrà scegliere la voce "Short-Circuit..." come si può vedere dalla Fig.2.



**Fig. 137: Dettaglio menù di calcolo corto\_circuito**

Verrà fuori la finestra di dialogo del corto-circuito, come in Fig.3, dove alla voce “Method” bisognerà scegliere le modalità con le quali studiare il corto-circuito stesso dalla lista che comparirà selezionando il tasto  sul lato destro dello stesso campo.



**Fig.138: Dettaglio della scheda del corto-circuito**

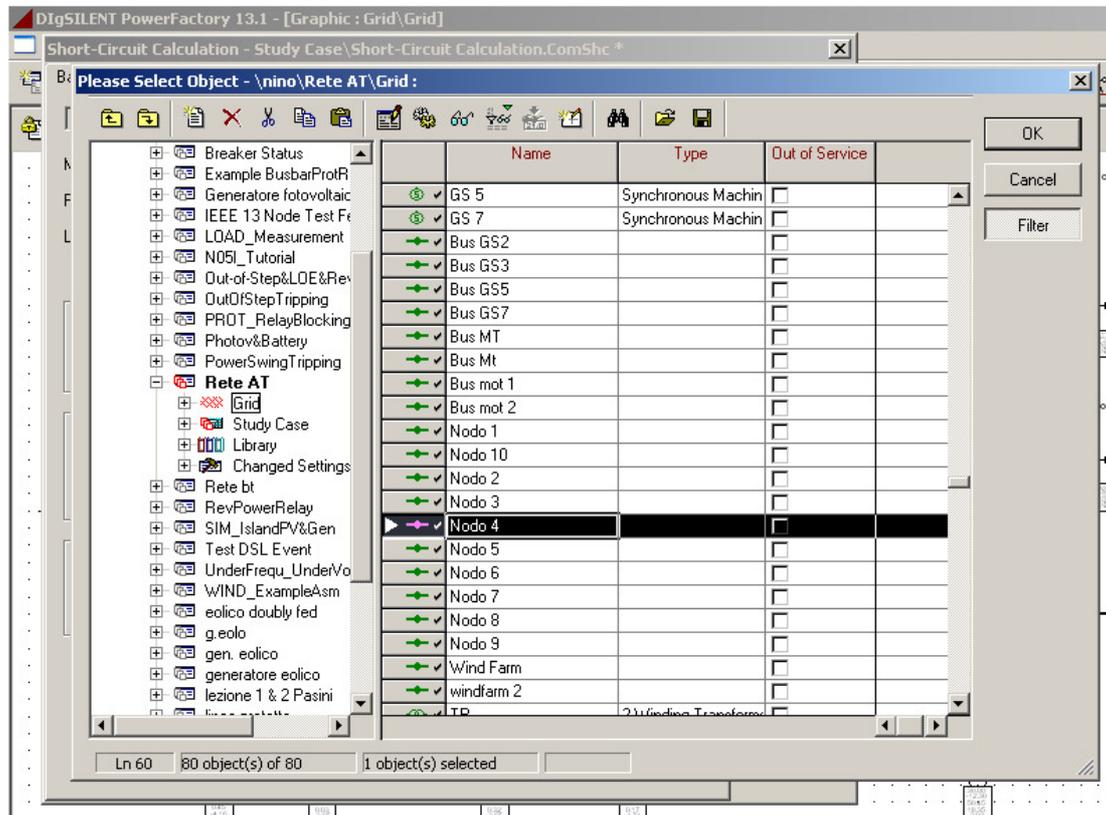
Al successivo campo denominato “Fault Type” bisognerà selezionare il tipo di guasto che si vuole simulare. Nella sezione “Fault Impedance” come si può notare è impostato un valore di impedenza di guasto nulla (guasto franco) ma il valore può essere impostato arbitrariamente, come pure può essere fatto per la durata del guasto nella corrispondente sezione alla destra. Le due sezioni sottostanti sono di minore importanza in quanto la prima riguarda la scelta di avere disponibili i dati della simulazione nella “Output Windows” di DIgSilent, mentre la seconda riguarda la scelta della localizzazione del guasto cosa che è stata fatta inizialmente.

Premendo dunque il tasto di “Execute” si darà il via alla simulazione di load flow alla fine della quale nello schema unifilare tutti i box conterranno i rispettivi dati della simulazione, mentre il nodo interessato dal guasto sarà riconoscibile perché marchiato con il simbolo .

Allo stesso risultato è possibile giungere selezionando il tasto  presente nella barra degli strumenti di DIgSilent con la differenza, rispetto alla procedura precedente, che adesso bisognerà selezionare nella sezione “Fault Location” il nodo che si vuole sia

interessato dal guasto e questo può essere fatto selezionando il tasto  presente nel campo “User Selection”.

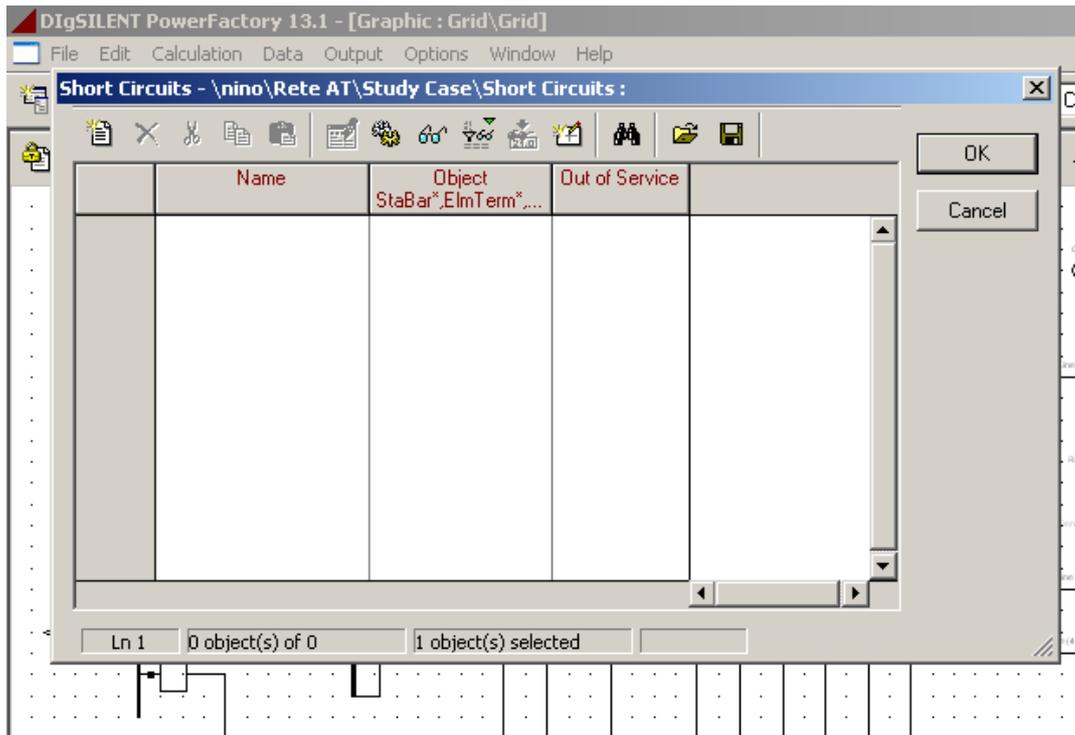
Verrà fuori una finestra di dialogo, come in Fig.4, del Data Manager che invita alla scelta del nodo.



**Fig.139: Dettaglio elenco componenti elettrici**

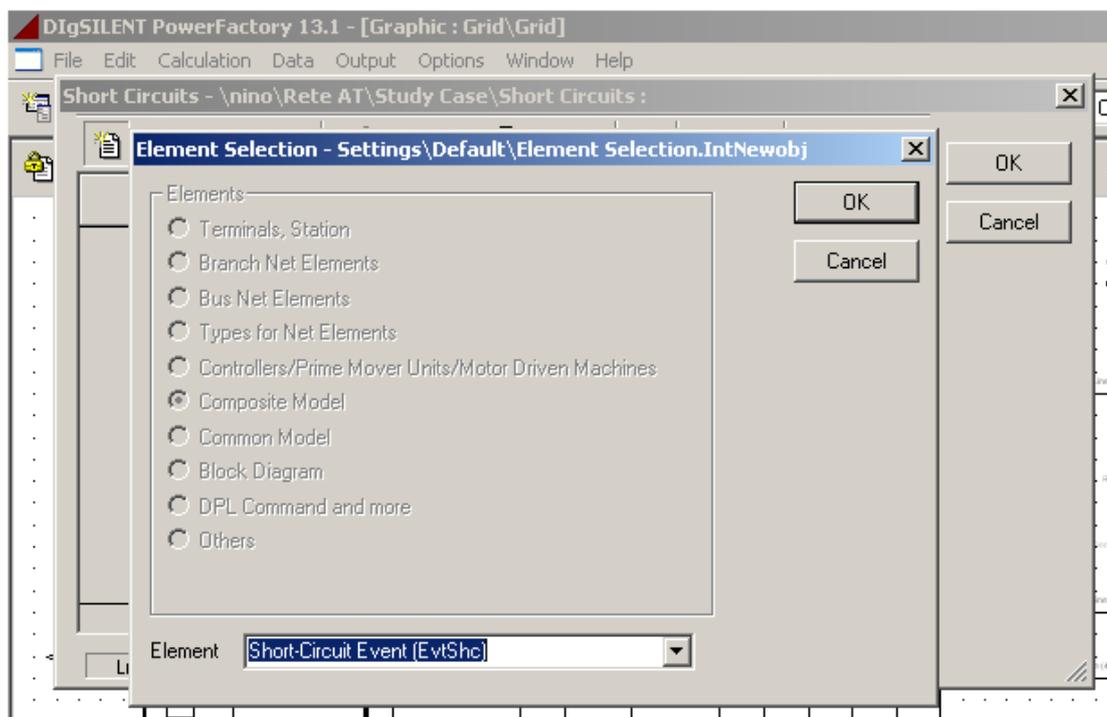
In tale nuova finestra si dovrà selezionare prima la griglia attiva con un singolo click e ciò darà l’accesso ad una lista con tutti gli elementi presenti nella stessa griglia e dal quale bisognerà scegliere il nodo interessato selezionandone il rispettivo simbolo con un singolo click. Fatto ciò sarà possibile lanciare la simulazione.

Se si volessero simulare più guasti occorrenti allo stesso istanti allora il software fornisce la funzione “Multiple Fault”. Per prima cosa si dovrà creare una lista degli elementi che vengono interessati dal guasto e ciò è possibile selezionando il tasto  il quale apre una finestra di dialogo come nella seguente Fig.5.



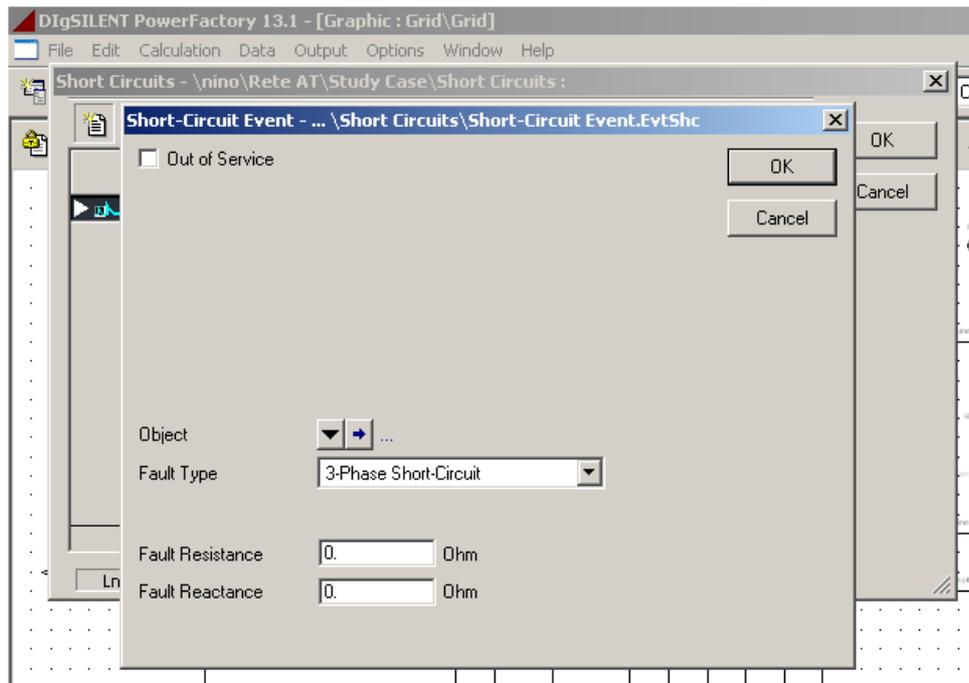
**Fig. 140: Dettaglio pagina definizione corto-circuiti**

Per creare la lista si dovrà selezionare il tasto  il quale aprirà a sua volta una nuova finestra nella quale bisognerà scegliere la tipologia di guasto che si desidera simulare.



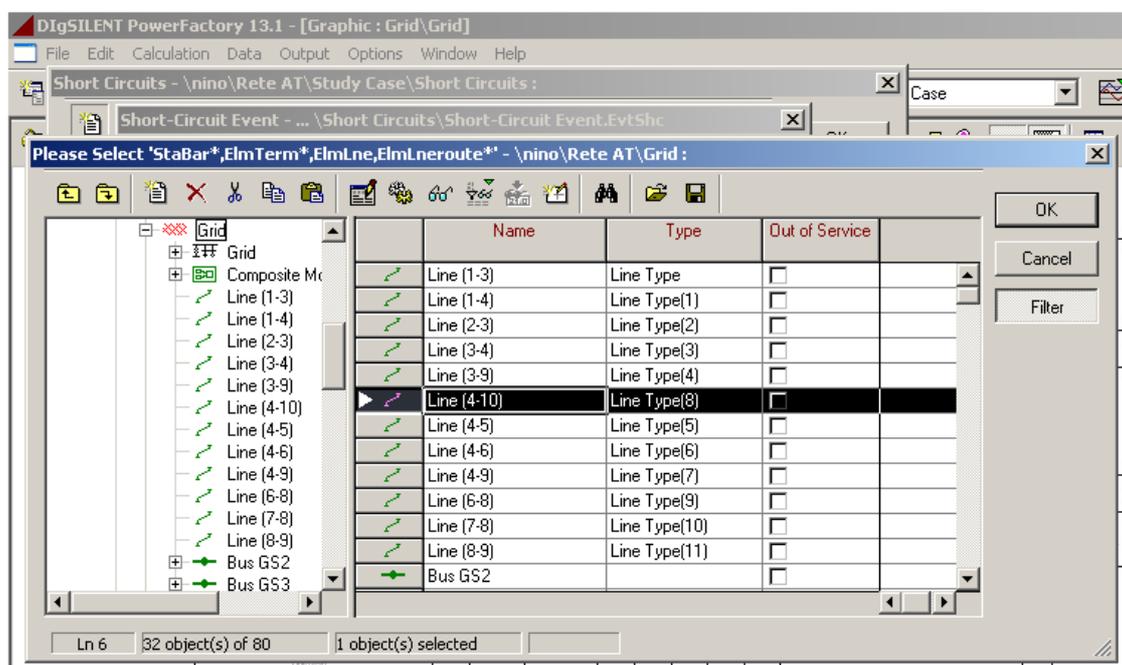
**Fig.141: Dettaglio scelta evento corto-circuito**

Selezionando OK si entrerà nella finestra descrittiva del guasto come mostrato in Fig.7.



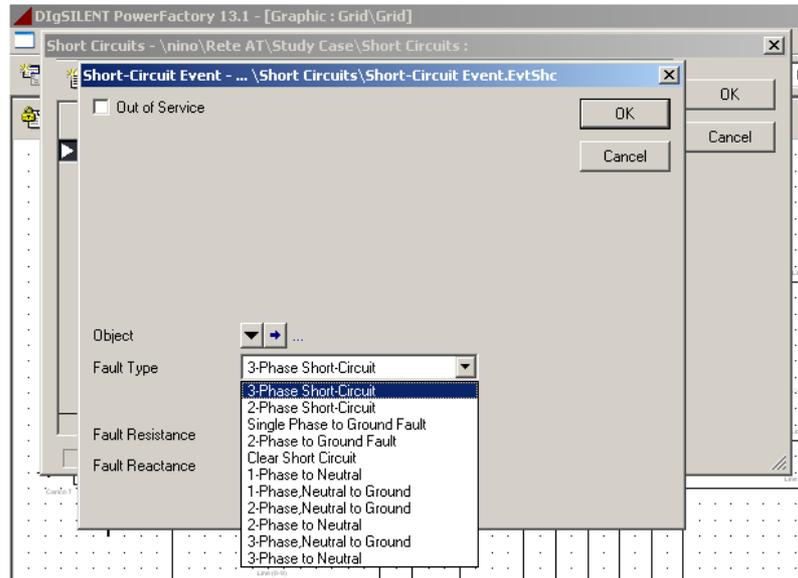
**Fig. 142: Dettaglio scheda descrittiva del corto-circuito**

In tale finestra viene chiesto il componente elettrico interessato dal guasto che può essere introdotto selezionando il tasto ▾ e poi dal menù attivo che sarà venuto fuori si selezionerà la voce “Select” che permetterà la scelta del componente direttamente dalla griglia attiva, come mostrato in Fig.8.



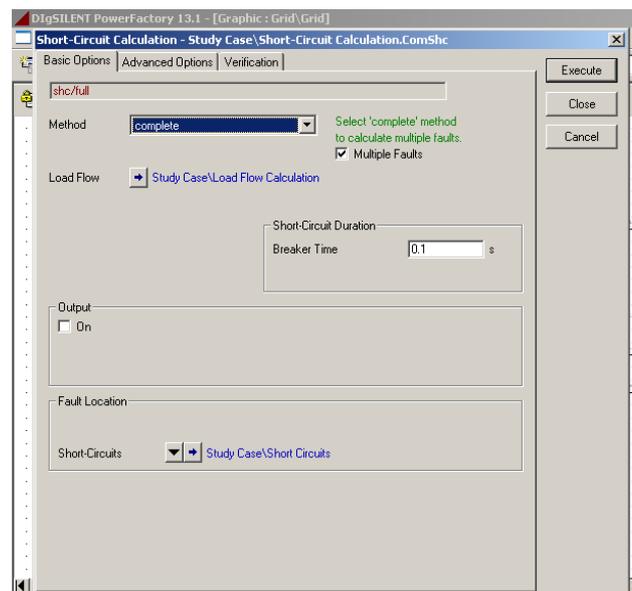
**Fig.143: Dettaglio lista componenti elettrici**

Scelto il componente si potrà dare l'OK per ritornare alla finestra descrittiva del guasto, dove nel campo "Fault Type" si dovrà scegliere il tipo di corto-circuito che si vuole simulare (vedi Fig.9).



**Fig.144: Dettaglio elenco tipologie di guasto**

Eseguita questa scelta bisognerà decidere se il guasto ha impedenza nulla oppure no ed in quest'ultimo caso si dovranno introdurre i valori di resistenza e reattanza negli appositi campi. La lista degli eventi di guasto è stata completata in ogni sua parte per cui si potrà procedere oltre con la simulazione. Selezionando il tasto  si entrerà nella finestra di dialogo del calcolo del corto-circuito come in Fig.10.



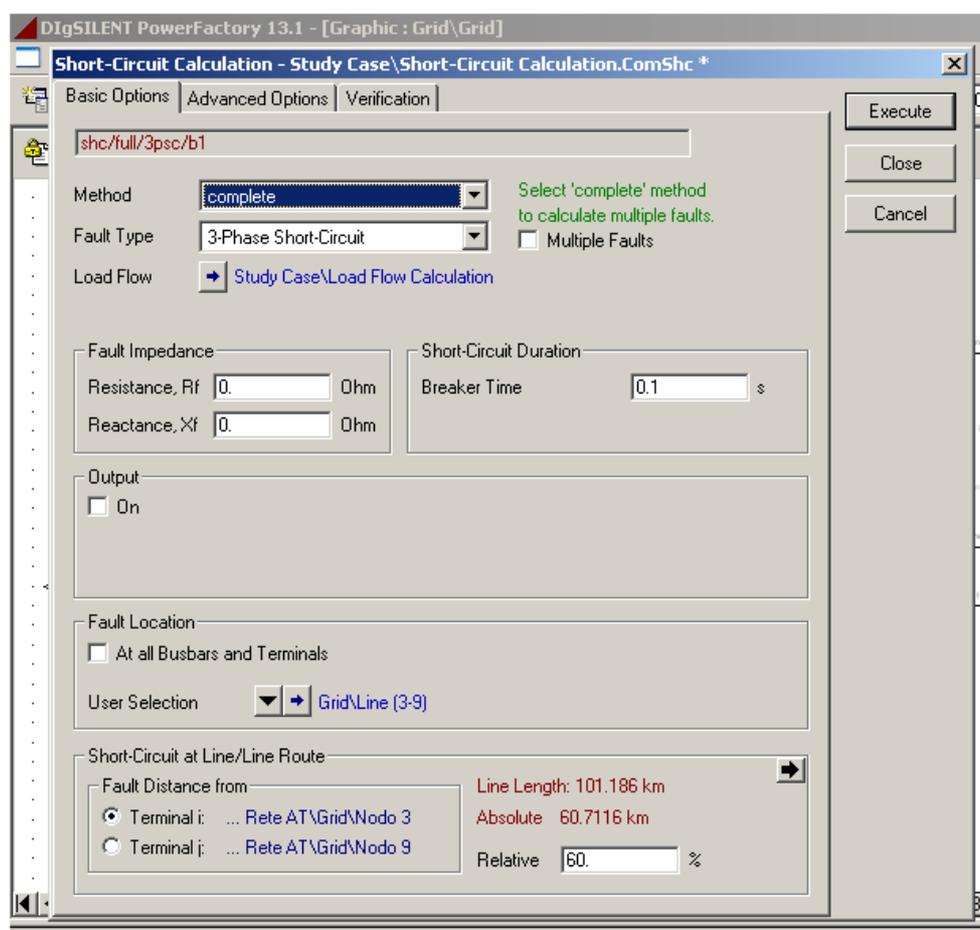
**Fig.145: Dettaglio scheda della simulazione del guasto**

In tale finestra si noterà subito che l'opzione "Multiple Fault" è già selezionata, quindi l'unica cosa che resta da fare è di selezionare la lista dei guasti dalla sezione "Fault Location".

Selezionando OK si darà il via alla simulazione di load flow in condizioni di guasto.

Bisogna a questo punto fare una precisazione a riguardo delle linee, infatti se una linea elettrica è introdotta nella lista dei componenti elettrici soggetti a guasto multiplo, non è possibile posizionare il guasto in un qualsiasi punto lungo la linea ma soltanto nel punto mediano.

Se si è interessati al guasto in un punto qualsiasi lungo la linea si deve seguire una nuova strada. Bisogna selezionare la linea con un click del tasto destro del mouse e dal menù attivo che verrà fuori si dovrà scegliere la voce "Calcolate..." e poi successivamente "Short Circuit..." per arrivare alla finestra di dialogo come in Fig.11.



**Fig.146: Dettaglio scheda del guasto**

In tale finestra (vedi Fig.11) diventa adesso importante l'ultima sezione in basso, dove è possibile scegliere il punto dove si vuole accada il guasto introducendo la percentuale della lunghezza della linea.

**Paragrafo 4.3:** Lo studio statico del corto-circuito nelle reti ad Alta Tensione

Ci si posizioni in un nodo di puro carico (scelto in maniera del tutto arbitraria) come per esempio il nodo 9 e si scelga di effettuare un corto-circuito trifase.

Verranno effettuate tre simulazioni di guasto nello stesso nodo, la prima senza alcun impianto di generazione distribuita, nella seconda si introdurrà l'impianto eolico "Windfarm 1" e nella terza simulazione verrà incluso anche il secondo impianto eolico "Windfarm 2".

Le grandezze prese in considerazione, per vedere l'influenza della generazione distribuita sulla rete, sono:

- 1) la potenza di corto circuito al nodo  $S_k''$  espressa in [MVA];
- 2) la corrente di corto-circuito a regime  $I_k''$  espressa in [kA];
- 3) il valore di picco della corrente di corto-circuito  $i_p$  espressa in [kA].

Oltre al nodo, scelto per il guasto, si è scelto di osservare anche ciò che succede in tutte le linee che alimentano lo stesso nodo.

I risultati della prima simulazione sono riportati nella Tab.5.

**Tab.8: Corto-circuito senza generazione distribuita**

	$S_k''$ [MVA]	$I_k''$ [kA]	$i_p$ [kA]
nodo 9	4211,83	10,81	24,26
linea (3-9)	Al nodo 3: 2548,88	6,54	14,68
linea (4-9)	Al nodo 4: 1030,7	2,64	5,94
linea (8-9)	Al nodo 8: 632,9	1,62	3,65

I risultati della seconda simulazione sono riportati nella Tab.6.

**Tab.9: Corto-circuito con un impianto eolico**

	$S_k''$ [MVA]	$I_k''$ [kA]	$i_p$ [kA]
nodo 9	4227,75	10,85	24,36
linea (3-9)	Al nodo 3: 2553,35	6,55	14,7
linea (4-9)	Al nodo 4: 1039,58	2,67	5,99
linea (8-9)	Al nodo 8: 635,48	1,63	3,66

I risultati della terza simulazione sono riportati nella Tab.7

**Tab.10: Corto-circuito con due impianti eolici**

	Sk" [MVA]	Ik" [kA]	ip [kA]
nodo 9	4246,15	10,9	24,44
linea (3-9)	Al nodo 3: 2554,27	6,55	14,7
linea (4-9)	Al nodo 4: 1041,4	2,67	5,99
linea (8-9)	Al nodo 8: 651,13	1,67	3,75

Può essere notato come l'introduzione della generazione distribuita influenzi tutte e tre le grandezze ed in particolar modo esse aumentano all'aumentare del numero di impianti eolici presenti in rete. C'è da notare inoltre che tali aumenti dipendono anche dalle potenze dei rispettivi impianti eolici.

Si può dunque concludere, che una massiccia (quindi in numero e potenza) penetrazione di impianti di generazione distribuita può portare un innalzamento delle correnti di guasto tale per cui le protezioni delle linee, predisposte dal gestore della rete di trasmissione, risulteranno inadeguate.

#### **Paragrafo 4.4:** Lo studio dinamico del corto-circuito nelle reti ad Alta Tensione

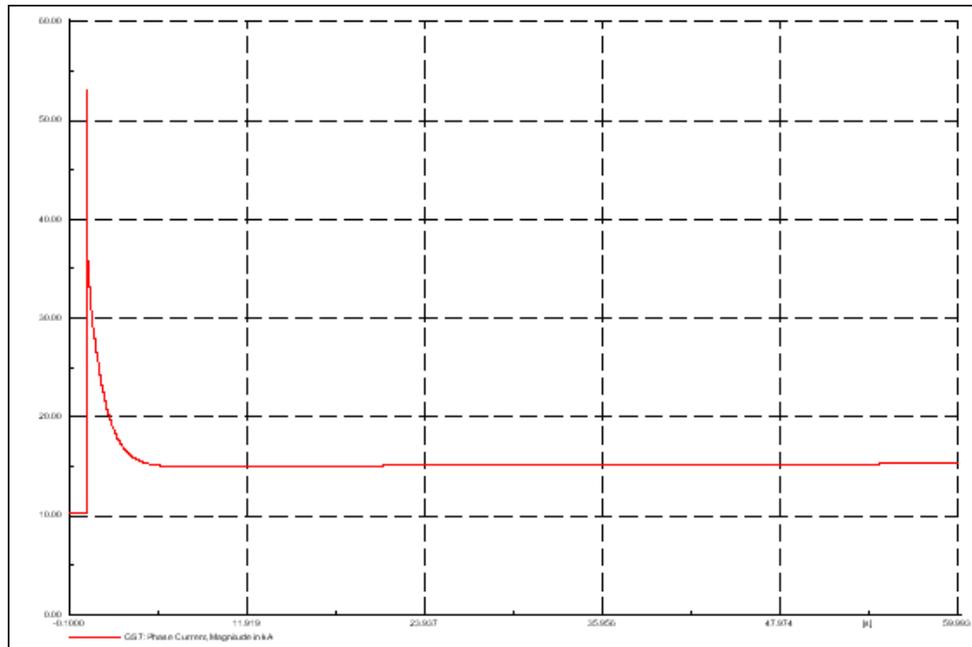
Questo studio, a differenza di quello condotto nel paragrafo precedente, viene eseguito con una simulazione (RMS Simulation) nel tempo allo scopo di verificare quale sia l'influenza della generazione distribuita sulla stabilità della rete AT in seguito ad un guasto.

Verranno prese in considerazione sia la configurazione di guasto transitorio sia la configurazione di guasto permanente con relativa esclusione del ramo guasto.

In tale studio si farà l'ipotesi che i generatori asincroni degli impianti eolici lavorino sempre alla loro potenza nominale e ciò può essere fatto escludendo tutti i Composite Model dei generatori eolici (bisogna selezionare la voce "Out of Service" nella finestra di dialogo dello stesso Composite Model).

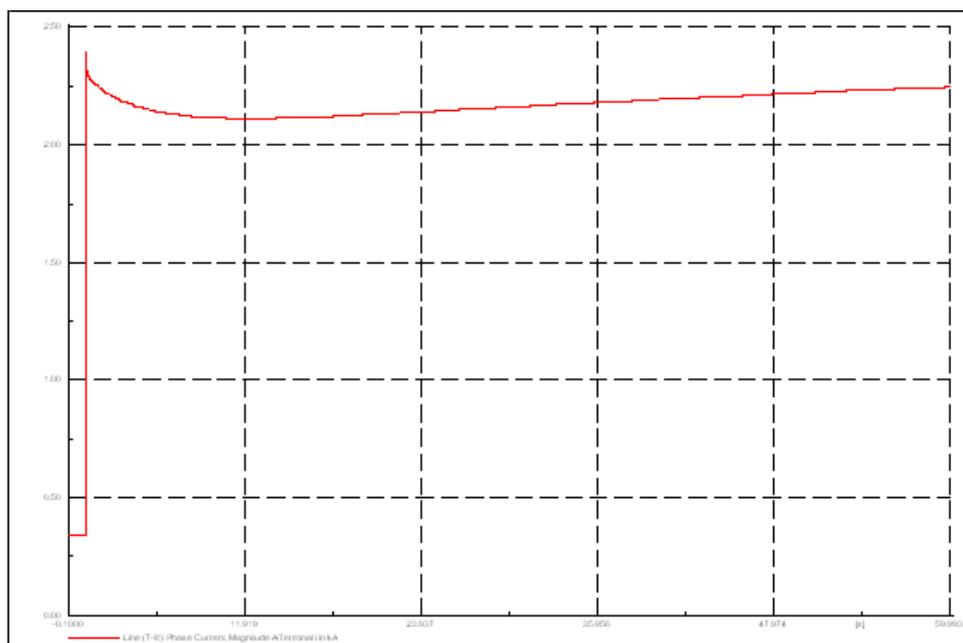
La prima prova che si esegue è quella di un corto-circuito al nodo 7 (nodo di puro carico) che non viene estinto dall'intervento delle protezioni di linea ed inoltre si suppone che non intervengano neanche le protezioni di macchina.

Nella Fig.12 viene riportato l'andamento della corrente iniettata in rete dal generatore sincrono denominato GS7 e come si può notare si passa da un valore pre-guasto di 10.349 kA ad un valore di 14.94 kA che varierà (aumentando) in maniera debole con il proseguire della simulazione.



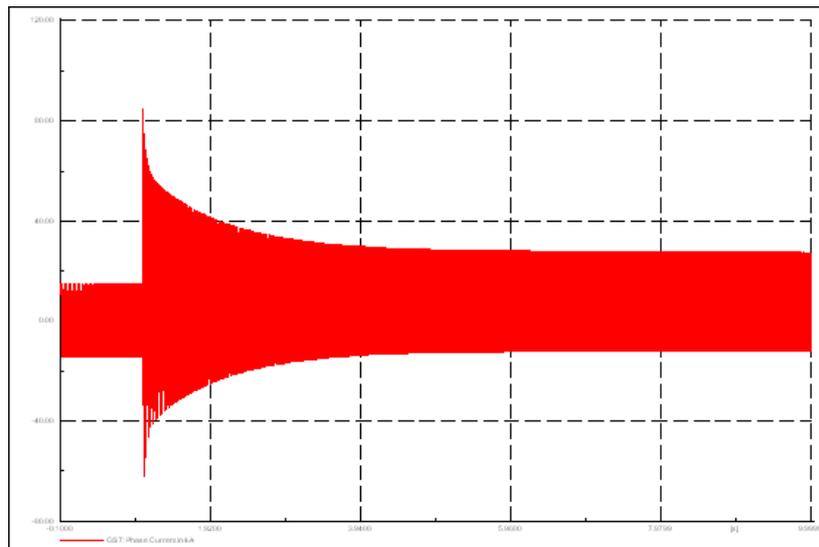
**Fig.147: Andamento corrente iniettata da generatore sincrono**

Nella Fig.13 viene riportato l'andamento della corrente nella linea che alimenta il carico (linea 7-8).



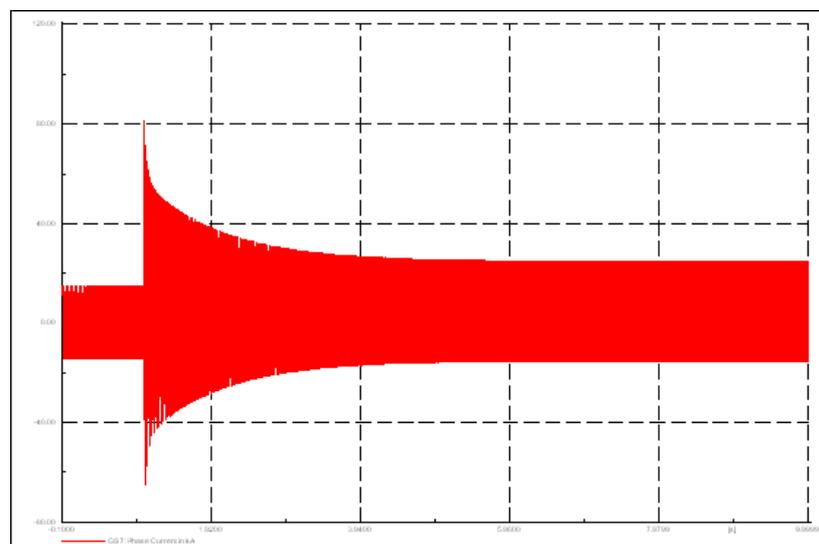
**Fig. 148:**

Con il software DIgSilent esiste la possibilità di restringere la finestra temporale fino ai millisecondi (EMT Simulation) e permettere di visualizzare i fenomeni elettromagnetici, che per esempio avvengono all'interno delle macchine sincrone. Nella Fig.14 viene riportato l'andamento della corrente iniettata in rete dal generatore GS7. Questa volta però ci saranno i valori istantanei della stessa corrente e non il valore efficace. Adesso possono essere notate le tre finestre temporali caratterizzanti un corto-circuito (subtransitorio, transitorio e regime).



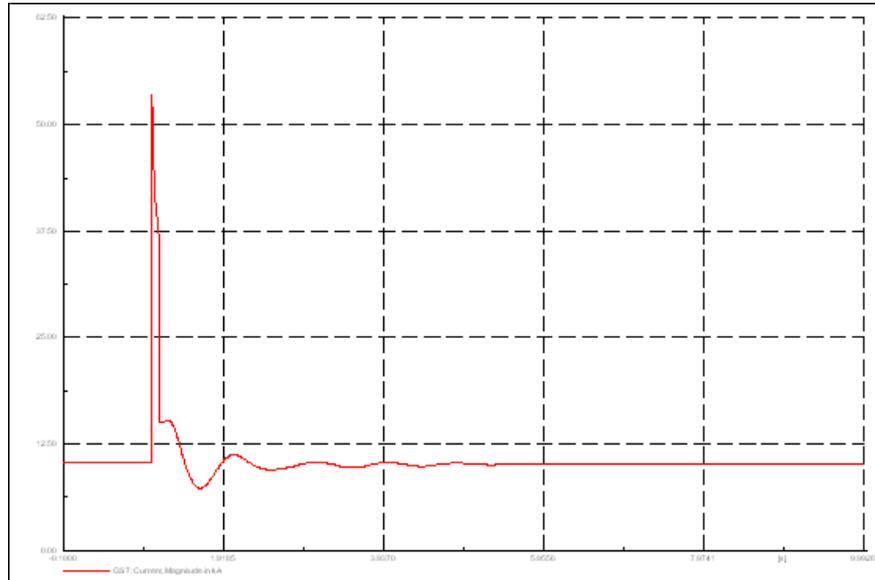
**Fig.149: Contributo alla corrente del GS7 senza generazione distribuita**

Adesso si farà la stessa simulazione tenendo conto di entrambi gli impianti eolici. Il risultato è riportato nella Fig.15 e come si può notare è diminuito il picco di corrente immediatamente successivo al guasto.



**Fig.150: Contributo alla corrente del GS7 con generazione distribuita**

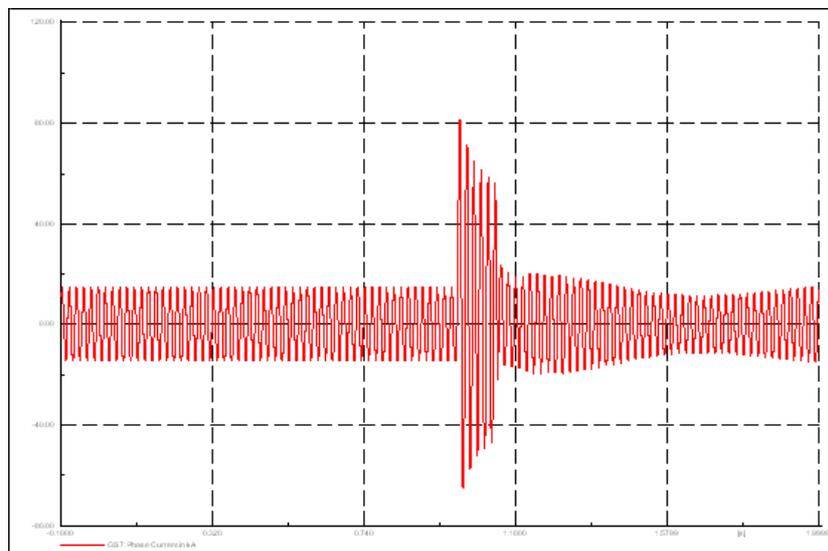
Si supponga adesso che il guasto si estingua e si riesegnano le stesse prove. Nella Fig.16. Si può notare che dopo l'avvenuta estinzione del guasto, la corrente iniettata in rete dal generatore GS7 avrà un andamento tendente al valore preguasto (ci arriverà dopo 30 s circa).



**Fig.151: Contributo corrente di guasto**

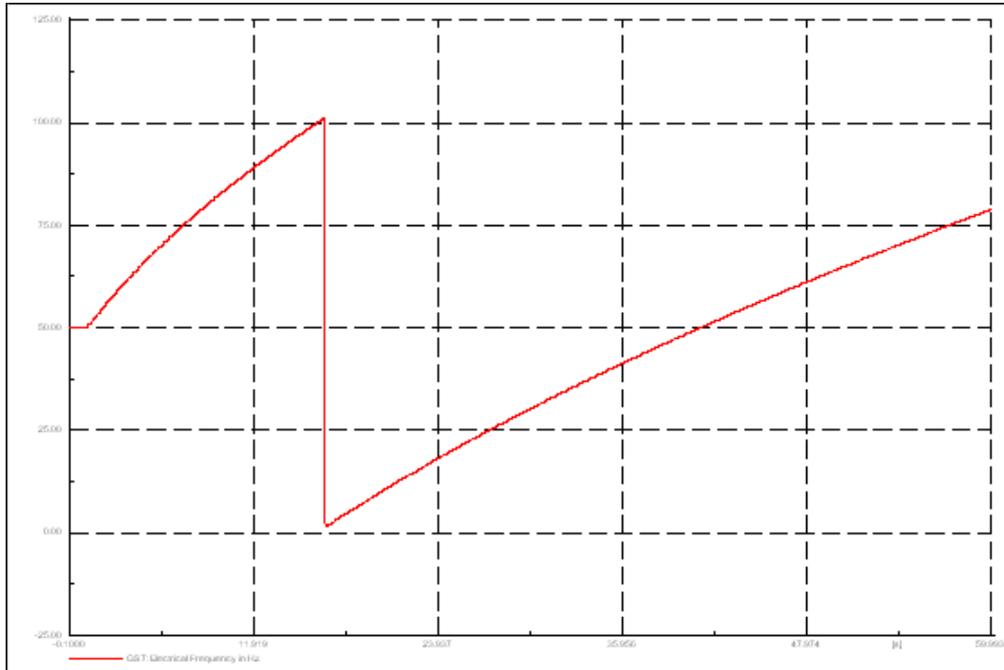
Se si effettuasse la stessa simulazione di cui sopra, includendo però gli impianti eolici si otterrebbe un andamento abbastanza simile a quello di Fig.16, sarà cambiato però il picco di corrente successivo al guasto e più precisamente sarà diminuito.

Eseguendo una EMT Simulation (con una finestra temporale di 2 s) si passerà ad una rappresentazione con valori istantanei ottenendo quanto riportato in Fig.17.



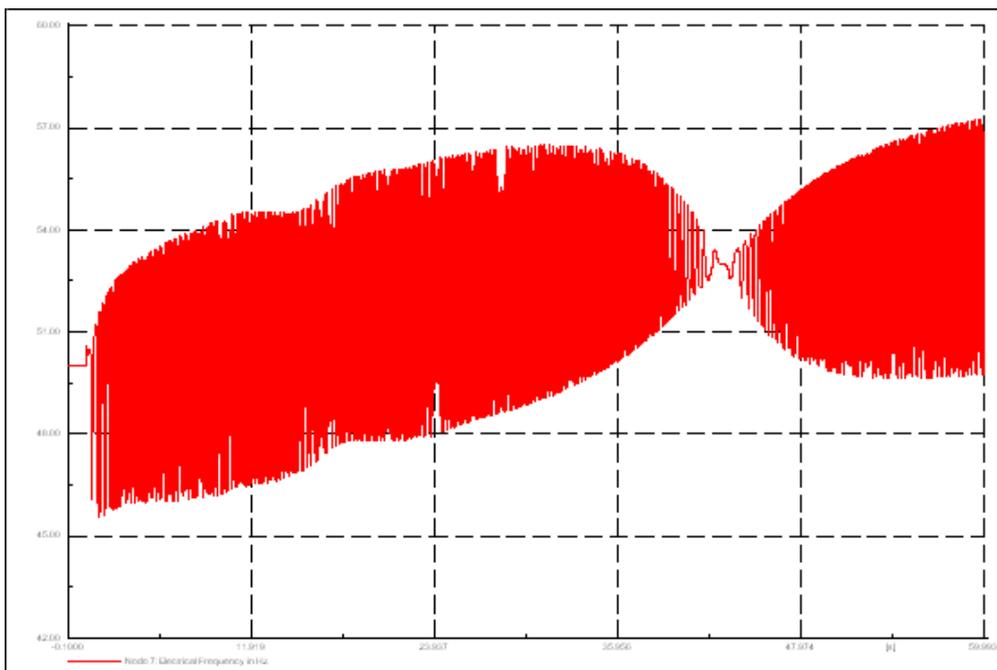
**Fig.152: Andamento corrente con valori istantanei**

Si effettueranno adesso delle simulazioni per controllare l'andamento della frequenza ai capi del generatore GS7, al nodo in cui avviene il guasto ed infine ad un nodo lontano dallo stesso guasto. Nel caso di guasto permanente ai capi del generatore l'andamento è quello mostrato nella Fig.18.



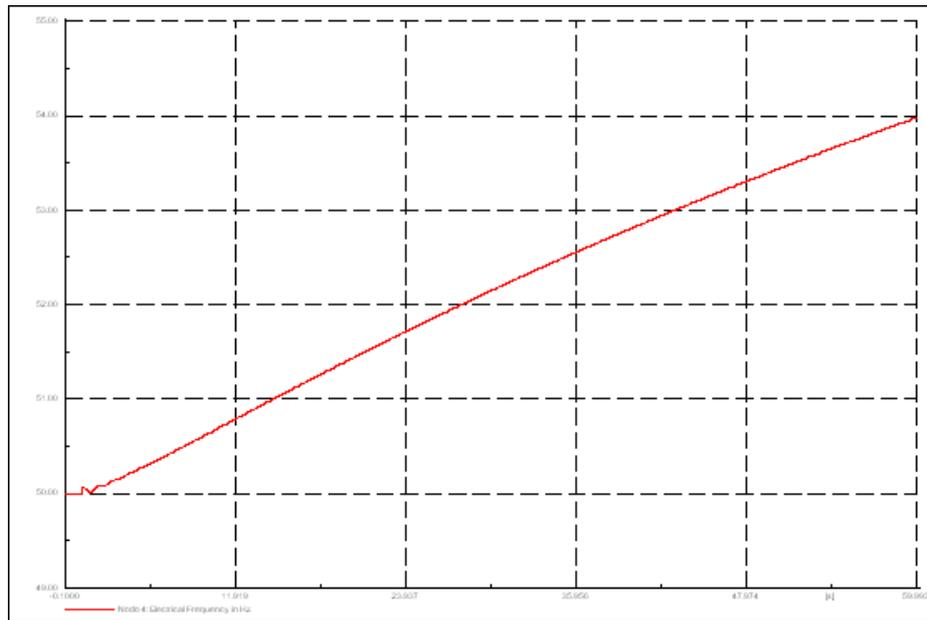
**Fig.153: Frequenza con guasto permanente ai capi del generatore sincrono**

Al nodo in cui si presenta il guasto l'andamento sarà quello riportato in Fig.19.



**Fig.154: Frequenza al nodo guasto permanente**

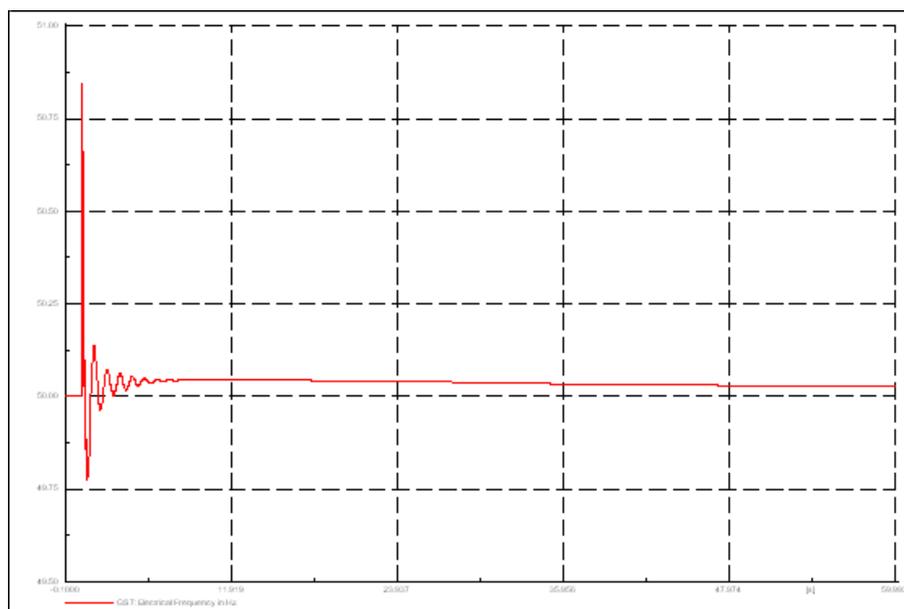
Nel nodo 4 invece la frequenza ha l'andamento mostrato in Fig.20.



**Fig. 155: Frequenza al nodo 4 con guasto permanente**

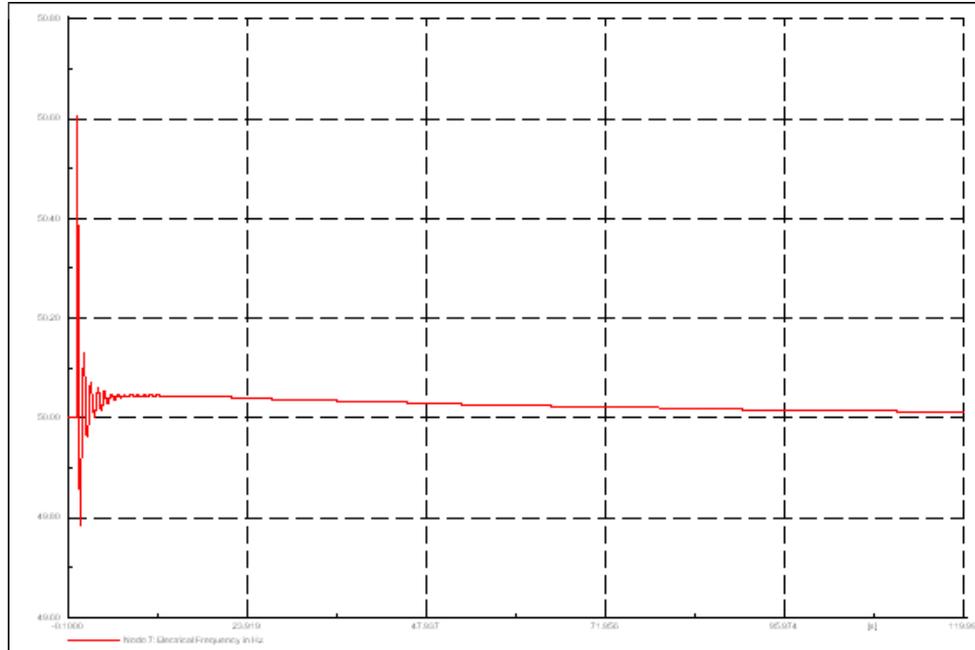
Delle variazioni così pronunciate della frequenza sono, per un sistema elettrico, inammissibili. Per fortuna una tale tipologia di guasti nelle reti AT è quasi del tutto assente motivo per cui si vedrà cosa succede alla stessa frequenza nel caso in cui il guasto si estingue.

La frequenza, ai capi del generatore GS7, dopo la perturbazione dovuta al guasto tende al suo valore nominale con tempi che vanno oltre il minuto come mostrato nella Fig.21.



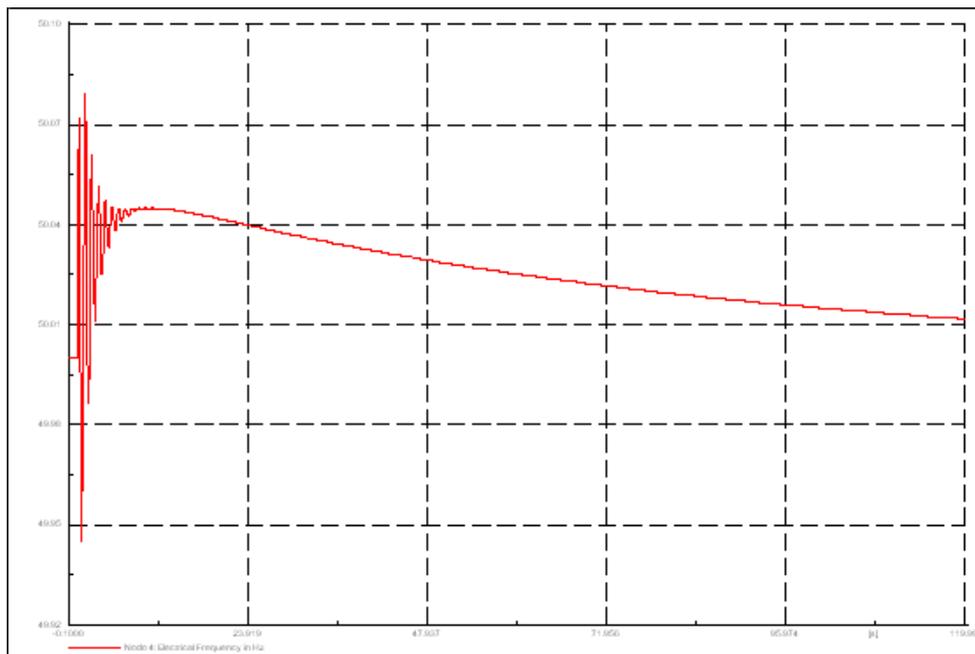
**Fig.156: Frequenza ai capi del generatore sincrono con guasto transitorio**

Al nodo 7, dove avviene il guasto, l'andamento della frequenza è molto simile a quello precedente (Fig.21). Può essere però notato che a distanza di due minuti, ancora non è stato raggiunto il valore nominale (Fig.22).



**Fig. 157: Frequenza al nodo 7 con guasto transitorio**

Al nodo 4 cambia l'andamento ma non cambia il comportamento a regime, come mostrato nella Fig.23



**Fig.158: Frequenza al nodo 4 con guasto transitorio**

Nel caso della frequenza, l'influenza degli impianti di generazione distribuita si manifesta con un ritardo maggiore nella convergenza al valore nominale.

## CAPITOLO 5

### STUDIO DELLA RETE IN MEDIA TENSIONE

#### Paragrafo 5.1: Definizione della rete in Media Tensione

La rete in media tensione, oggetto di studio in tale capitolo, presenta distribuzione di tipo radiale. Le caratteristiche elettriche di tale rete, verranno qui di seguito elencate seguendo il protocollo IEEE e poi successivamente verrà mostrato come passare alla rappresentazione secondo il sistema internazionale. Nelle Tab.1 e Tab 2 vengono riportate le caratteristiche dei carichi.

**Tab.11: Modelli dei carichi**

Codice	Connessione	Modello del carico
Y-PQ	Wye	Potenza attiva e reattiva costanti
Y-I	Wye	corrente costante
Y-Z	Wye	impedenza costante
D-PQ	Delta	Potenza attiva e reattiva costanti
D-I	Delta	corrente costante
D-Z	Delta	impedenza costante

**Tab.12: Caratteristiche elettriche dei carichi concentrati**

Nodo	Modello del carico	Fase A [kW]	Fase B [kW]	Fase C [kW]	Fase A [kvar]	Fase B [kvar]	Fase C [kvar]
634	Y-PQ	160	120	120	110	90	90
645	Y-PQ	0	170	0	0	125	0
646	D-Z	0	230	0	0	132	0
652	Y-Z	128	0	0	86	0	0
671	D-PQ	385	385	385	220	220	220
675	Y-PQ	485	68	290	190	60	212
692	D-I	0	0	170	0	0	151
611	Y-I	0	0	170	0	0	80

Nella Tab.3 vengono riportate invece le caratteristiche elettriche di un carico rappresentato con il modello dei carichi distribuiti.

**Tab.13: Caratteristiche elettriche dei carichi distribuiti**

Nodo A	Nodo B	Modello del carico	Fase A [kW]	Fase B [kW]	Fase C [kW]	Fase A [kvar]	Fase B [kvar]	Fase C [kvar]
632	671	Y-PQ	17	66	117	10	38	68

Nella Tab.4 sono riportate le configurazioni delle linee elettriche.

**Tab.14: Caratteristiche delle linee**

Nodo A	Nodo B	Lunghezza [ft]	Configurazione
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Le Tab.5 e Tab.6 riportano la corrispondenza tra i codici delle configurazioni e la disposizione delle fasi per ogni conduttore.

**Tab.15: Disposizione delle fasi nelle linee aeree**

Configurazione	Sequenza delle fasi	Caratteristiche delle fasi (ACSR)	Caratteristiche del neutro (ACSR)	Disposizione spaziale (ID)
601	BACN	556,5	4/0	500
602	CABN	4/0	4/0	500
603	CBN	1/0	1/0	505
604	ACN	1/0	1/0	505
605	CN	1/0	1/0	510

**Tab. 16: Disposizione delle fasi nelle linee in cavo**

Configurazione	Sequenza delle fasi	Caratteristiche delle fasi (AA)	Caratteristiche del neutro (AA)	Disposizione spaziale (ID)
606	ABCN	250	/	515
607	AN	1/0	1/0	520

Nella Tab.7 sono riportate le caratteristiche elettriche corrispondenti ai codici riportati nelle Tab.5 e Tab.6.. Le sigle ACSR ed AA, identificanti il materiale costituente il conduttore, corrispondono rispettivamente ad alluminio rinforzato ed alluminio.

**Tab.17: Caratteristiche elettriche**

Fase	Tipo di conduttore	Resistenza [Ohm/mile]	Diametro esterno del conduttore [inch]	Raggio geometrico medio [ft]	Portata [A]
556,5	ACSR	0,1859	0,927	0,313	730
250	AA	0,41	0,567	0,0171	329
4/0	ACSR	0,592	0,563	0,00814	340
1/0	ACSR	1,12	0,398	0,00446	230
1/0	AA	0,97	0,368	0,0111	310

Nella Tab.8 sono riportate le caratteristiche dei due trasformatori presenti nella rete.

**Tab.18: Caratteristiche dei trasformatori**

	kVA	kV lato alta tensione	kV lato bassa tensione	Resistenza [%]	Reattanza [%]
<b>Substation</b>	5000	115 - D	4,16 Gr. Yn5	1	8
<b>XFM-1</b>	500	4,16 - Z	0,48 Gr. Zn6	1,1	2

Nella Tab.9 sono riportate le caratteristiche dei condensatori.

**Tab.19: Caratteristiche condensatori**

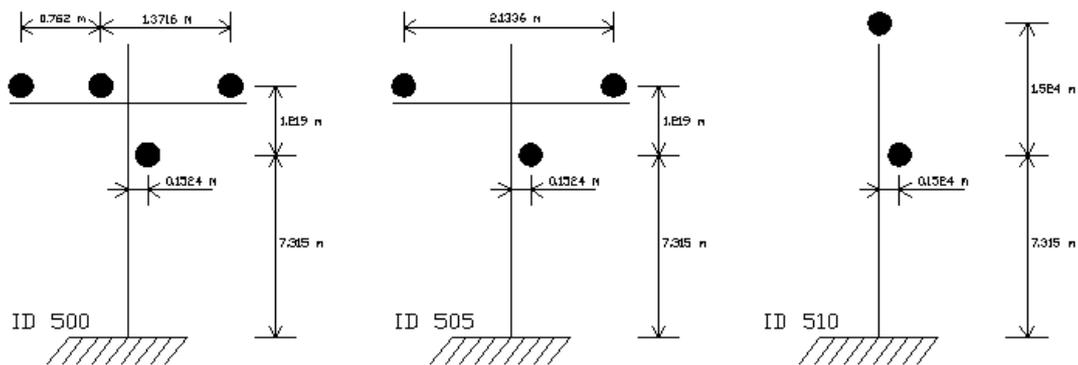
Nodo	Fase A [kvar]	Fase B [kvar]	Fase C [kvar]
675	200	200	200
611			100

Si riporta per ultima la Tab.10 con le conversioni delle u.d.m. dal sistema inglese al sistema europeo.

**Tab.20: Conversioni**

1 ft	30,48 cm
1 inch	2,54 cm
1 mile	1609,344 m

Nella Fig.1 vengono indicate le disposizioni spaziali, in metri, corrispondenti ai codici delle configurazioni riportate nelle tabelle precedenti, nel caso di linee aeree.



**Fig.159: Distanze tra conduttori per linee aeree**

Nella Fig.2 sono riportate invece le distanze tra i conduttori nel caso di linee in cavo.



**Fig.160: Distanze tra i conduttori per linee in cavo**

A questo è possibile calcolare le matrici di impedenza (vedi dalla Tab.11 alla Tab.17) delle linee, facendo però attenzione alle dimensioni in quanto espresse in Ohm/miglio e non in Ohm/km.

**Tab.21**

Configurazione 601		
0,3465+j1,0179	0,1560+j0,05017	0,1580+j0,4236
0,1560+j0,05017	0,3375+j1,0478	0,1535+j0,3849
0,1580+j0,4236	0,1535+j0,3849	0,3414+j1,0348

**Tab.22**

<b>Configurazione 602</b>		
0,7526+j1,1814	0,1580+j0,4236	0,1560+j0,5017
0,1580+j0,4236	0,7475+j1,1983	0,1535+j0,3849
0,1560+j0,5017	0,1535+j0,3849	0,7436+j1,2112

**Tab.23**

<b>Configurazione 603</b>		
0	0	0
0	1,3294+j1,3471	0,2066+j0,4591
0	0,2066+j0,4591	1,3238+j1,3569

**Tab.24**

<b>Configurazione 604</b>		
1,3238+j1,3569	0	0,2066+j0,4591
0	0	0
0,2066+j0,4591	0	1,3294+j1,3471

**Tab.25**

<b>Configurazione 605</b>		
0	0	0
0	0	0
0	0	1,3292+j1,3475

**Tab.26**

<b>Configurazione 606</b>		
0,7982+j0,4463	0,3192+j0,0328	0,2849-j0,0143
0,3192+j0,0328	0,7891+j0,4041	0,3192+j0,0328
0,2849-j0,0143	0,3192+j0,0328	0,7982+j0,04463

**Tab.27**

<b>Configurazione 607</b>		
1,3425+j0,5124	0	0
0	0	0
0	0	0

Nelle successive tabelle (dalla Tab.18 alla Tab.24) verranno invece riportate le matrici di suscettanza riguardanti i parametri trasversali delle linee stesse. bisogna anche qui fare attenzione alle u.d.m., infatti le suscettanze verranno espresse in  $\mu S / mile$ .

**Tab.28**

<b>Configurazione 601</b>		
0+j6,2998	0-j1,9958	0-j1,2595
0-j1,9958	0+j5,9597	0-j0,7417
0-j1,2595	0-j0,7417	0+j5,6386

**Tab.29**

<b>Configurazione 602</b>		
0+j5,6990	0-j1,0817	0-j1,6905
0-j1,0817	0+j5,1795	0-j0,6588
0-j1,6905	0-j0,6588	0+j5,4246

**Tab.30**

<b>Configurazione 603</b>		
0	0	0
0	0+j4,7097	0-j0,8999
0	0-j0,8999	0+j4,6658

**Tab.31**

<b>Configurazione 604</b>		
0+j4,6658	0	0-j0,8999
0	0	0
0-j0,8999	0	0+j4,7097

**Tab.32**

<b>Configurazione 605</b>		
0	0	0
0	0	0
0	0	0+j4,5193

**Tab.33**

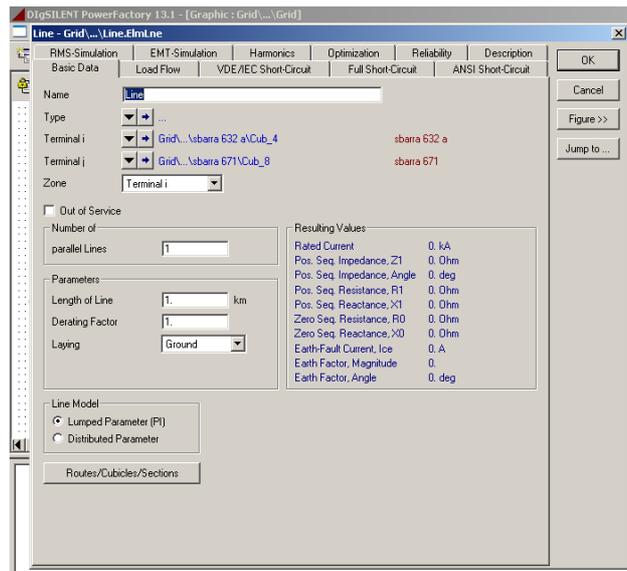
<b>Configurazione 606</b>		
0+j96,8897	0	0
0	0+j96,8897	0
0	0	0+j96,8897

**Tab.34**

<b>Configurazione 607</b>		
0+j88,9912	0	0
0	0	0
0	0	0

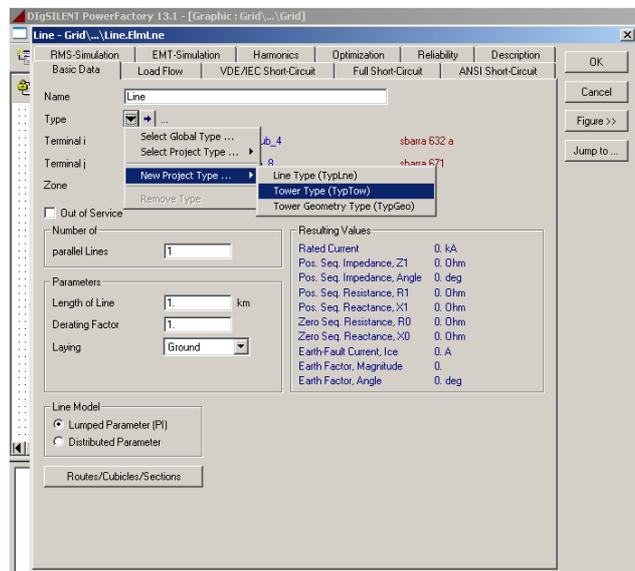
**Paragrafo 5.2:** Definizione del modello di una linea elettrica

Per poter effettuare la definizione di una linea elettrica, in ambiente DIGSilent, servono tutte le informazioni sulle caratteristiche elettriche e meccaniche riguardanti la linea stessa. Per prima cosa bisogna introdurre nello schema unifilare il componente Linea elettrica, successivamente bisognerà selezionare lo stesso componente con un doppio click per avere l'accesso alla scheda descrittiva, come mostrato in Fig.3.



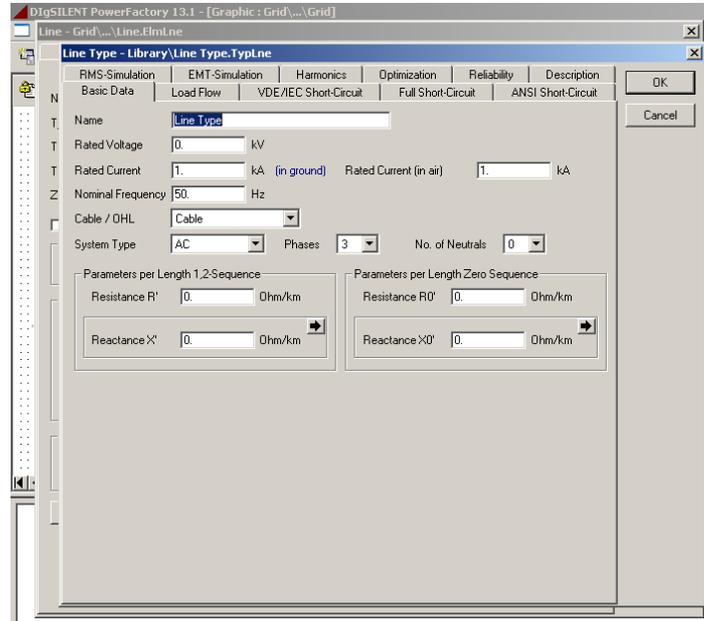
**Fig.161: Dettaglio scheda linea elettrica**

La prima cosa da fare è quella di definire un tipo per la linea nell'apposito campo denominato "Type" selezionando il tasto  e facendo comparire un primo menù attivo dal quale scegliere la voce "New Project Type" (le altre voce avrebbero imposto la scelta di un tipo o dalla libreria generale di DigSilent, la prima, oppure dalla libreria di progetto) entrando così in un secondo menù attivo, come mostrato in Fig.4. In tale figura può essere notato come nella sezione denominata "Resulting Values" tutti i valori abbiano valore nullo non essendo ancora stata definita la linea. Inoltre nella sezione in basso, denominata "Line Model" si può scegliere se il modello per la linea debba essere a parametri concentrati oppure a parametri distribuiti.



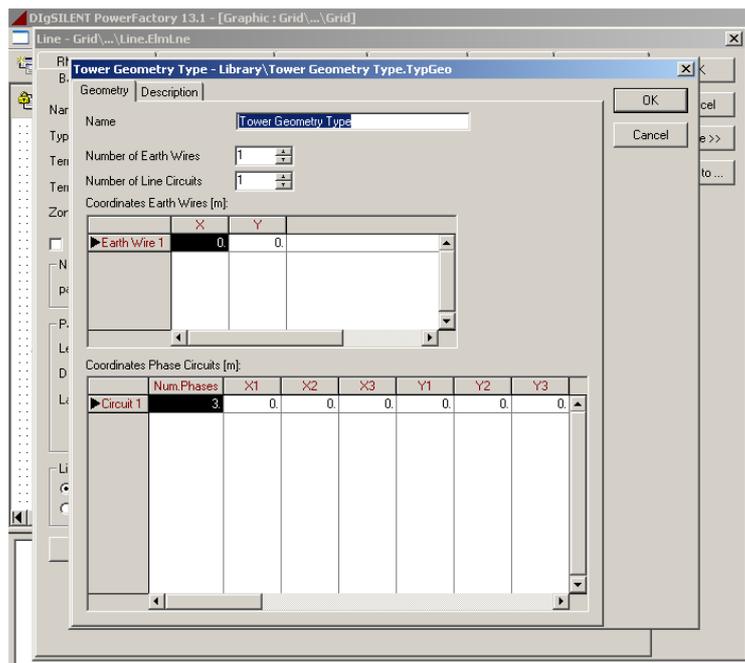
**Fig.162: Dettaglio scelta del tipo per la linea**

In questo secondo menù attivo, la prima voce “Line Type” serve per definire la linea attraverso i parametri di sequenza diretta, inversa ed omeopolare per unità di lunghezza. Vengono inoltre richiesti altri dati, come mostrato in Fig.5.



**Fig.163: Dettaglio scheda di definizione delle linee elettriche**

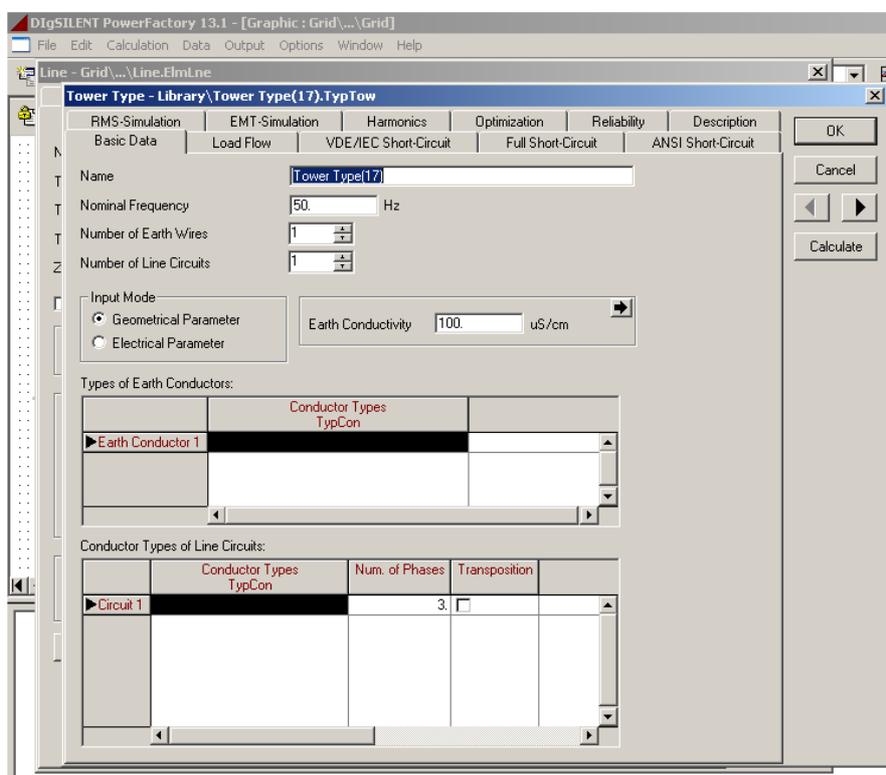
Passiamo adesso alla terza voce del menù, la seconda verrà trattata per ultima, denominata “Tower Geometry Type” che porta ad una finestra di dialogo come in Fig.6.



**Fig.164: Dettaglio della scheda di definizione delle linee elettriche**

In tale finestra possono essere definiti il numero di conduttori di neutro, il numero di conduttori di fase disposti in parallelo ed infine nella parte inferiore si trovano le sezioni dove introdurre le coordinate spaziali di ogni singolo conduttore. Per questa ultima operazione deve essere prestata particolare attenzione alla scelta dell'origine del sistema di riferimento, nel senso che deve essere scelta una volta sola e sarà valida per tutti i conduttori, pena il malfunzionamento del modello.

Passiamo adesso alla seconda voce del menù attivo, denominata "Tower Type", la quale è stata lasciata per ultima perché è la strada che si è scelto di seguire, per cui verrà trattata più in dettaglio. La finestra di dialogo che verrà fuori è mostrata in Fig.7.

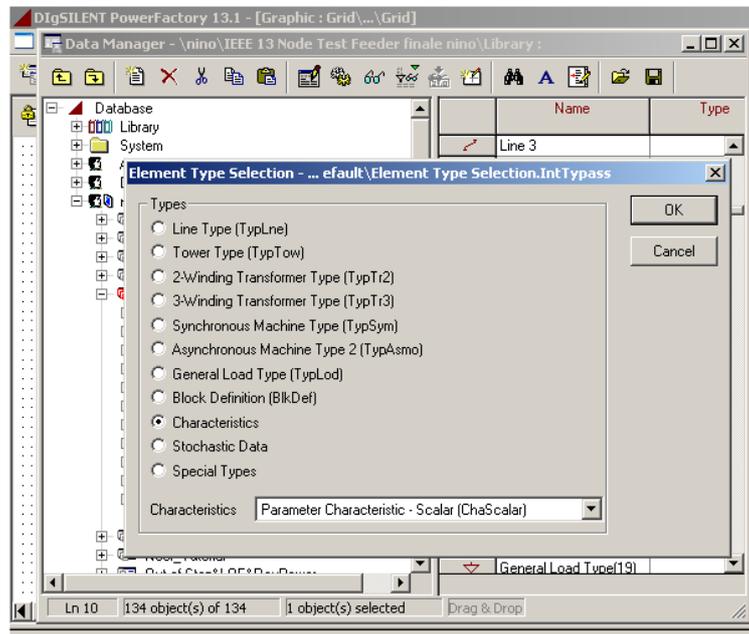


**Fig.165: Dettaglio della scheda di definizione delle linee elettriche**

In tale finestra, a differenza della precedente in Fig.6, è presente la possibilità di scegliere le modalità con cui introdurre i dati nella sezione centrale denominata "Input Mode". La modalità impostata per default dal software è quella con parametri geometrici. Nelle due sezioni inferiori bisognerà introdurre la tipologia del conduttore sia per le fasi che per il conduttore di terra. Si farà adesso una digressione per mostrare come sia possibile introdurre tali caratteristiche dei conduttori in DIgSilent.

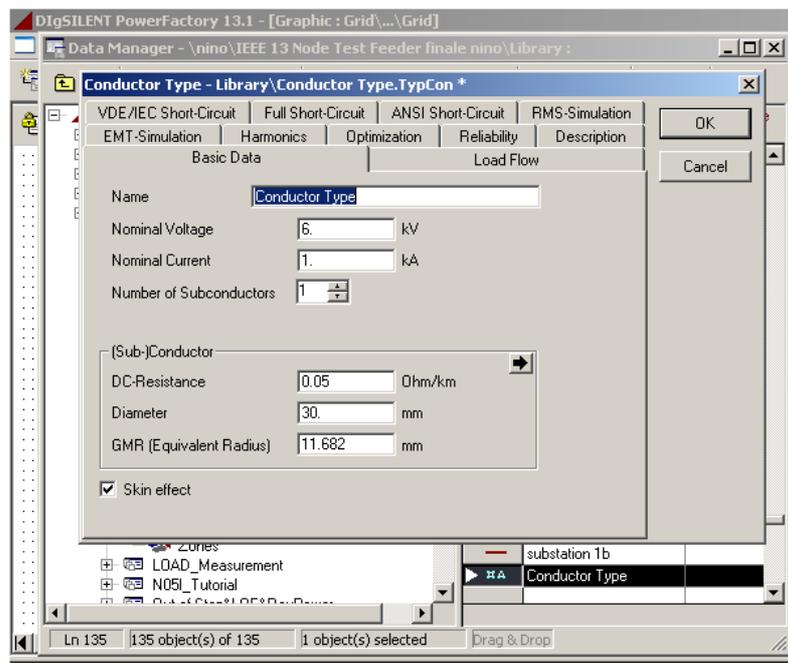
Per prima cosa bisognerà selezionare con un singolo click del tasto destro del mouse la libreria di progetto che è possibile trovare nel Data Manager. Successivamente

bisognerà selezionare il tasto “New Object” (  ) presente nella barra degli strumenti dello stesso DataManager, aprendo così una finestra di dialogo come mostrato in Fig.8.



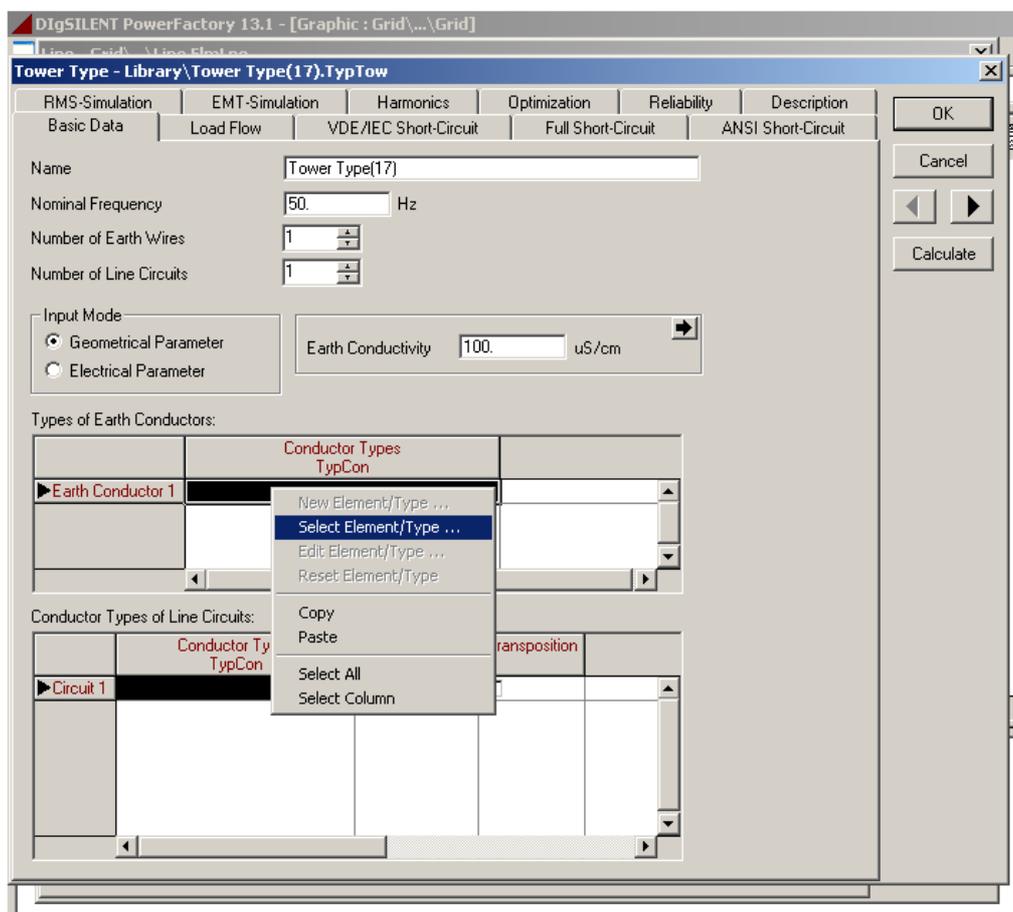
**Fig.166: Dettaglio lista componenti**

Da tale finestra bisogna selezionare l’ultima voce “Special Type” e poi, successivamente dal campo sottostante (denominato “Characteristic”) si dovrà scegliere la voce “Conductor Type” e dare l’OK. Si aprirà una finestra come in Fig.9.



**Fig.167: Dettaglio scheda descrittiva del conduttore**

Avendo compilato tale scheda in ogni sua parte, è possibile procedere oltre selezionando Ok. Si potrà notare adesso, come un tipo per i conduttori compaia nella libreria del progetto. Finisce qui la digressione e si riparte dalla scheda di definizione delle linee elettriche lasciata alla Fig.7. Nei rispettivi campi nelle due sezioni denominate “Types of earth conductors” e “Conductor Types of line circuits” bisogna selezionare la zona in nero con un click del tasto destro, facendo comparire una finestra come in Fig.10.

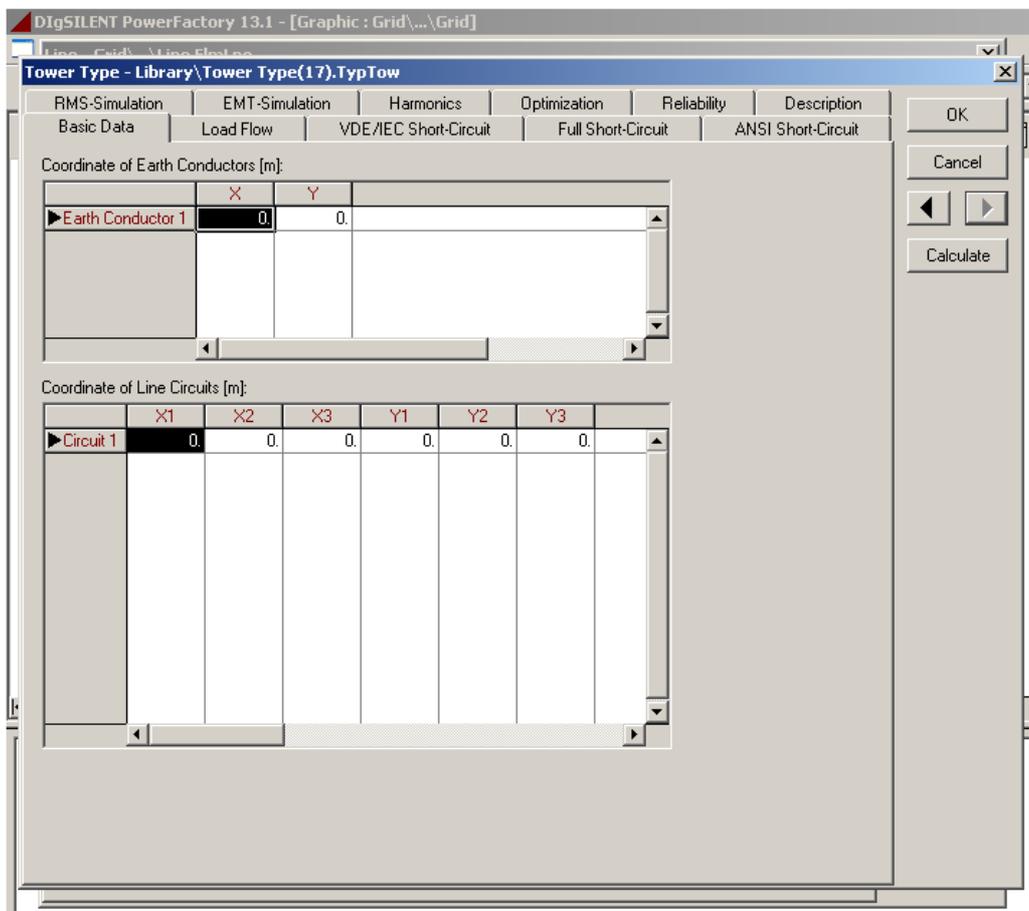


**Fig.168: Dettaglio della definizione del tipo di conduttore**

Dal menù bisognerà scegliere la voce “Select Element/Type” la quale farà comparire una nuova finestra che inviterà alla scelta del tipo di conduttore direttamente dalla libreria del progetto. Tale selezione deve avvenire selezionando il simbolo  del componente e non il suo nome.

Eseguita la scelta si può dare l’OK ritornando alla scheda iniziale, notando che adesso i rispettivi campi contengono i tipi per i conduttori. Adesso per proseguire nella definizione bisogna passare alla disposizione spaziale dei conduttori selezionando 1

tasto , posto in alto a destra della stessa scheda, che porterà ad una seconda pagina della stessa scheda come mostrato in Fig.11.



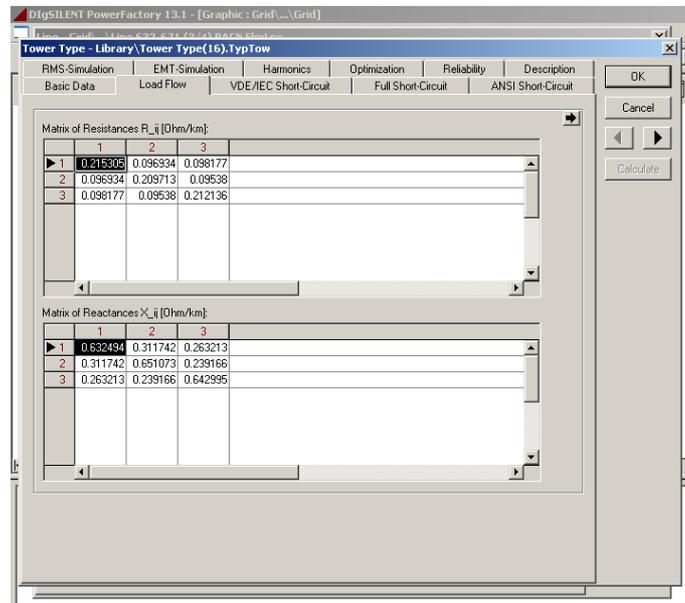
**Fig.169: Dettaglio seconda pagina della scheda della linea elettrica**

Come si può notare in tale pagina si dovranno introdurre le coordinate spaziali dei singoli conduttori, dopo di che si potrà dare l'Ok in entrambe le pagine poiché la linea è stata definita completamente.

A questo punto, selezionando la linea con un doppio click si accederà alla scheda della stessa, nella quale sarà possibile notare come nella sezione "Resulting Values" tutte le grandezze hanno valori diversi da zero.

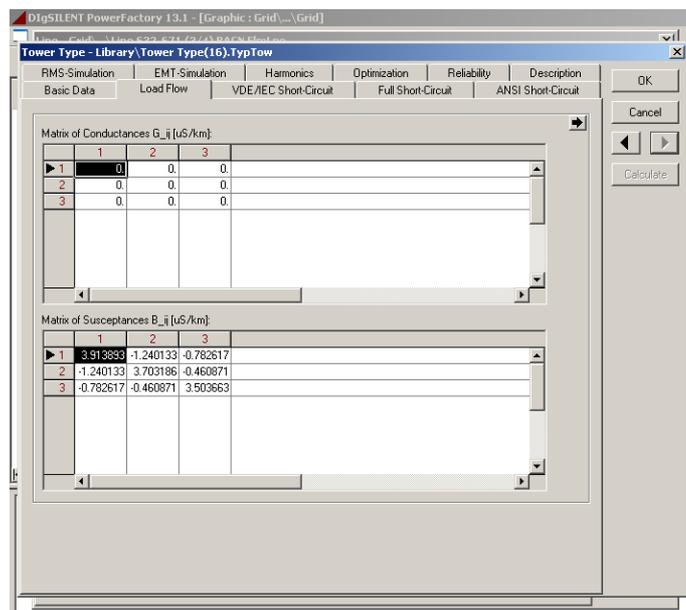
Ritornando alla Fig.10, alla sezione "Input Mode" esiste una seconda possibilità per definire le linee ovvero introducendo i parametri elettrici. Con tale modalità scomparirà la sezione riguardante il conduttore di terra, mentre rimarrà quella per i circuiti di linea, per i quali la selezione del tipo di conduttore rimane identica a quella eseguita precedentemente. Ciò che sarà cambiato è invece la seconda pagina della scheda che

adesso apparirà come in Fig.12. In tale seconda pagina sono presenti più cartelle ma quella che ricoprirà più interesse sarà quella denominata “Load Flow”.



**Fig.170: Dettaglio scheda definizione matrici**

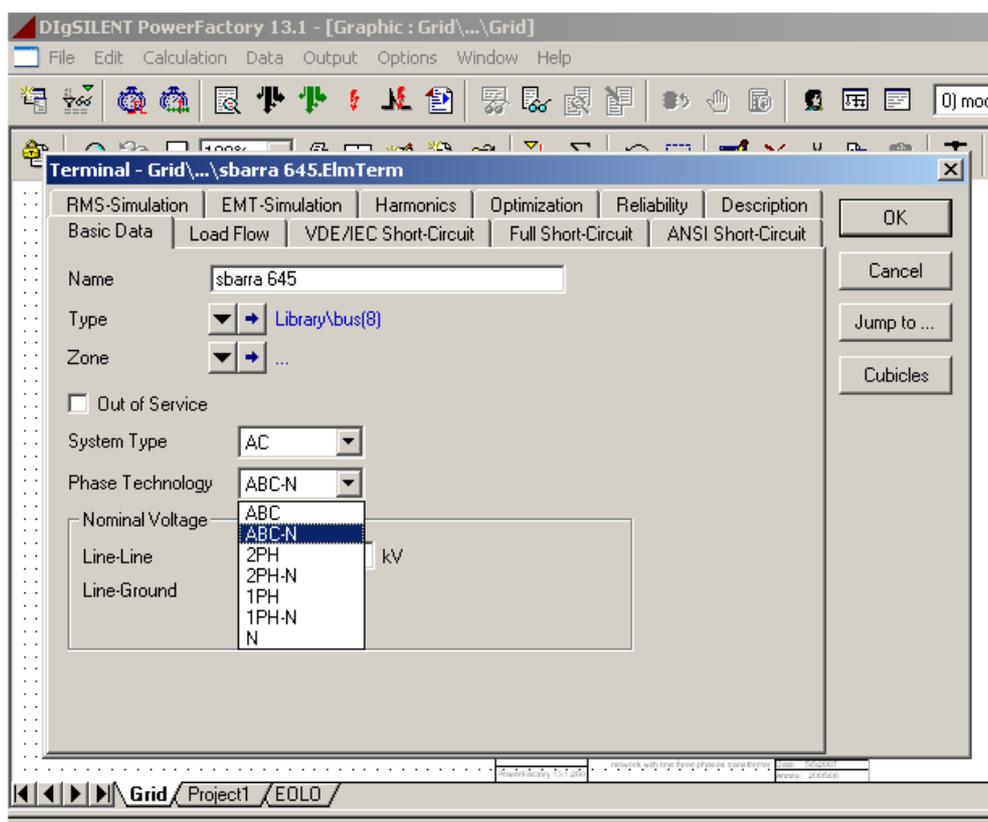
Come si può notare nella Fig.12 vengono introdotte le matrici di resistenza e reattanza (parametri longitudinali) espresse in ohm/km. Il tasto  permette di scegliere quali grandezze si vuole siano introdotte nelle rispettive matrici. Introdotte le matrici dei parametri longitudinali si passerà alla definizione di quelle relative ai parametri trasversali selezionando il tasto . La terza pagina è mostrata in Fig.13



**Fig.171: Dettaglio scheda di definizione matrici**

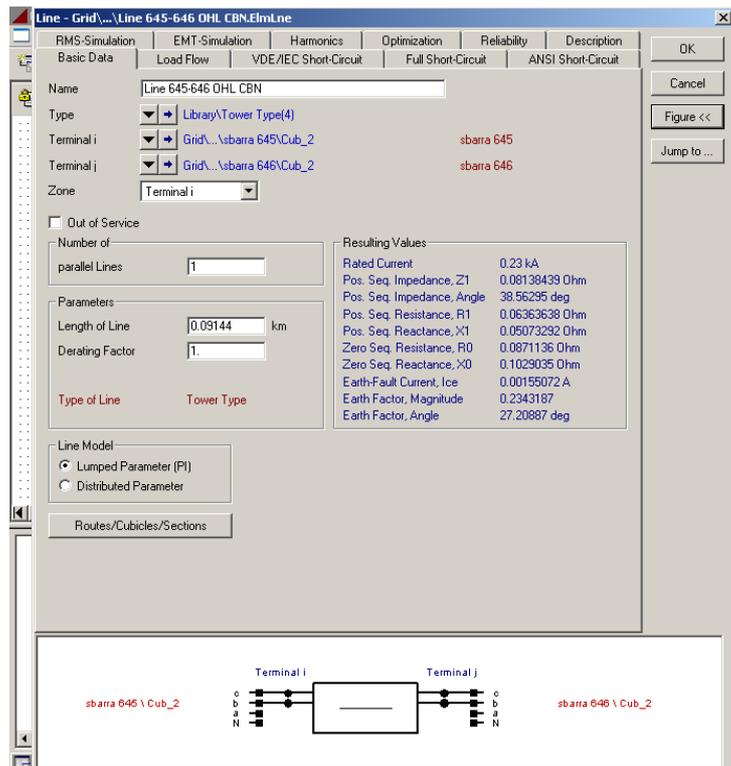
Eseguita anche questa operazione si potrà dare l'OK a tutte le pagine perché la linea è stata definita in ogni sua parte.

In ultimo bisogna trattare delle linee elettriche bifase e monofase, con o senza neutro in quanto bisognerà specificare quali fasi devono essere presenti e quali no. Più precisamente nel caso in cui una linea trifase arriva in un nodo ed il successivo tratto di linea è rappresentato da una linea bifase oppure monofase allora bisognerà specificare quali fasi continuano e quali invece no. Per fare ciò, innanzitutto, tutti i nodi della rete devono avere a disposizione tre poli per le fasi ed uno per il neutro come mostrato in Fig.14. A tale scheda si arriva selezionando con un doppio click il nodo.



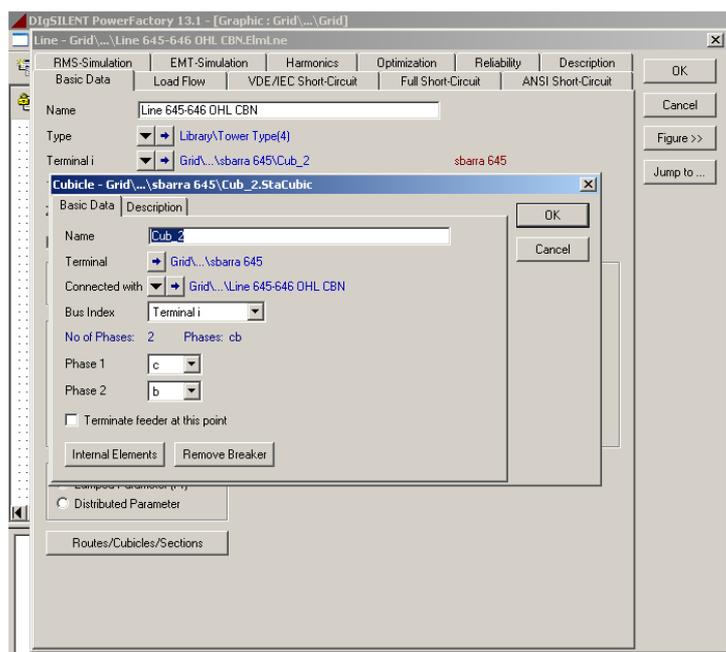
**Fig.172: Dettaglio scheda descrittiva del nodo**

Quando una linea elettrica viene collegata ad un nodo, è possibile vedere come sono collegati i conduttori di fase e neutro semplicemente selezionando la linea nello schema unifilare e poi successivamente (nella cartella denominata “Basic Data”) andare a selezionare il tasto denominato “Figure>>” presente in alto a destra. A questo punto, nella parte inferiore della scheda comparirà una finestra che descrive in maniera schematica come la linea è connessa ai nodi, come mostrato nella Fig.15.



**Fig.173: Dettaglio scheda definizione linea elettrica**

Naturalmente, per il buon funzionamento del modello ci deve essere coerenza nel nome delle fasi passando dal nodo di sinistra al nodo di destra. Per poter variare le fasi collegate, bisognerà selezionare il tasto  del campo "Terminal i" (e lo stesso lavoro andrà fatto nel campo "Terminal j") che farà aprire una nuova finestra, come in Fig.16.



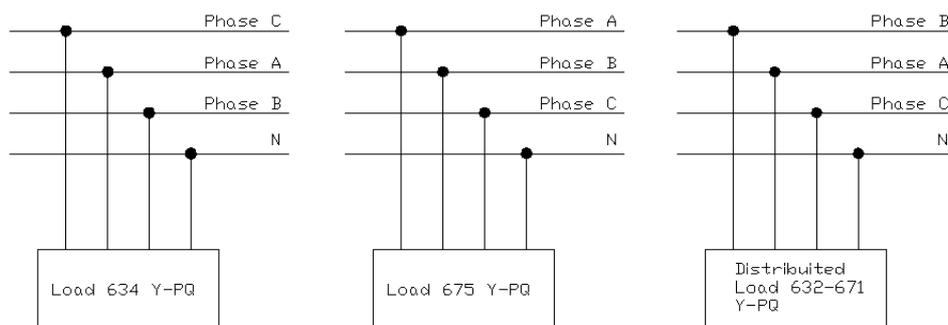
**Fig. 174: Dettaglio scheda descrizione collegamenti al nodo**

La variazione del nome delle fasi da collegare al nodo può essere eseguita selezionando il tasto  nei rispettivi campi denominati “Phase 1” e “Phase 2” e dare successivamente l’Ok per ritornare alla scheda della linea. A questo punto si potrà notare come le variazioni siano state riportate nella rappresentazione schematica di cui alla Fig.15.

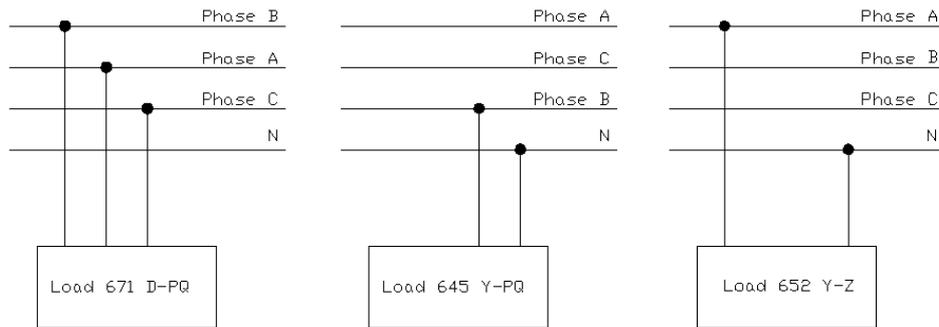
C’è da precisare però che un errore nel nome delle fasi di una linea, passando dal nodo di monte a quello di valle, conduce ad un messaggio di errore da parte del software. Un errore invece tra il nome delle fasi della linea che arriva al nodo di carico ed il nome delle fasi del carico che vengono collegate allo stesso nodo porta invece ad una condizione di funzionamento in cui il carico non verrà alimentato (nella finestra “Output Window” di DigSilent comparirà il messaggio che una determinata aerea non è stata alimentata).

### **Paragrafo 5.3:** Definizione del modello di un carico

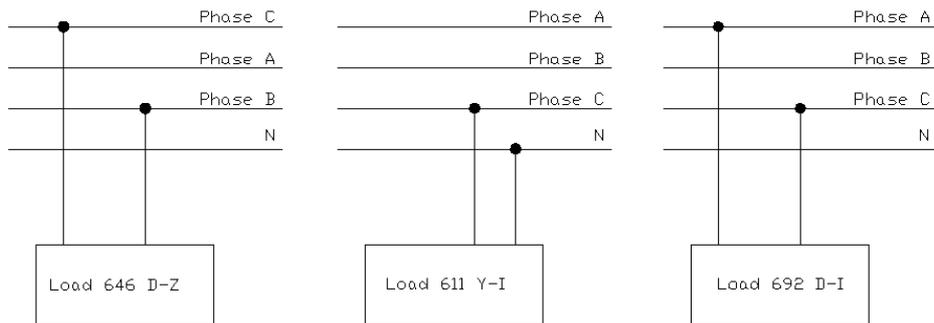
In tale paragrafo si vuol mostrare come definire un carico partendo però dalla nomenclatura, usata dal protocollo IEEE, e riportata nelle tabelle descrittive della rete MT. La disposizione delle fasi è riportata nelle figure dalla Fig.17 alla Fig.19.



**Fig.175: Disposizione delle fasi per carichi trifase più neutro**

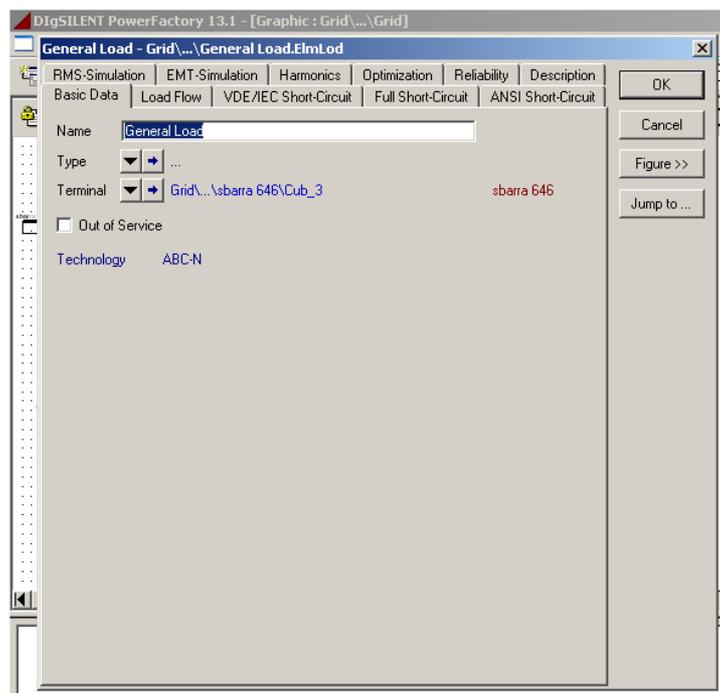


**Fig.176: Disposizione delle fasi per carichi trifase e monofase**



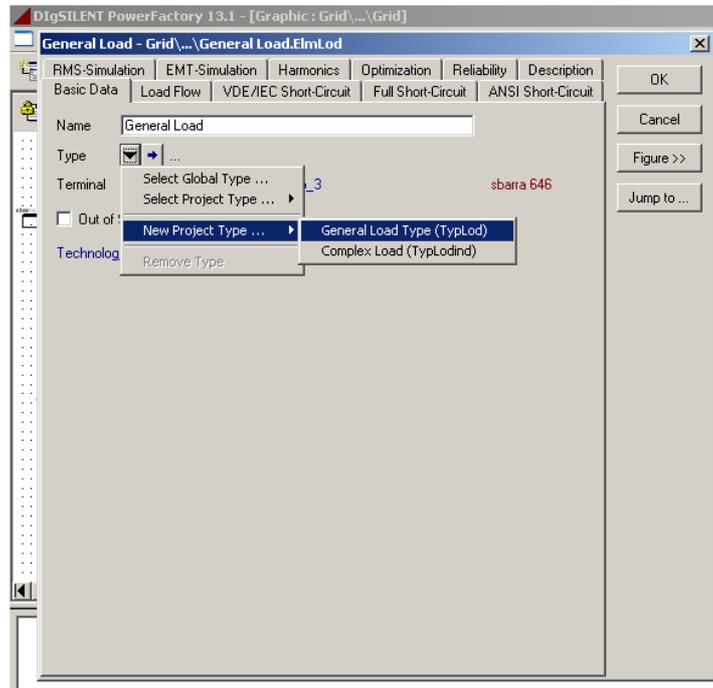
**Fig.177: Disposizione delle fasi per carichi bifase e monofase con neutro**

Fatto ciò si può andare nello schema unifilare di DIgSilent introdurre i carichi e definirli uno ad uno. Si selezioni per prima cosa il simbolo del carico presente nello schema unifilare con un doppio click per accedere alla scheda descrittiva come in Fig.20.



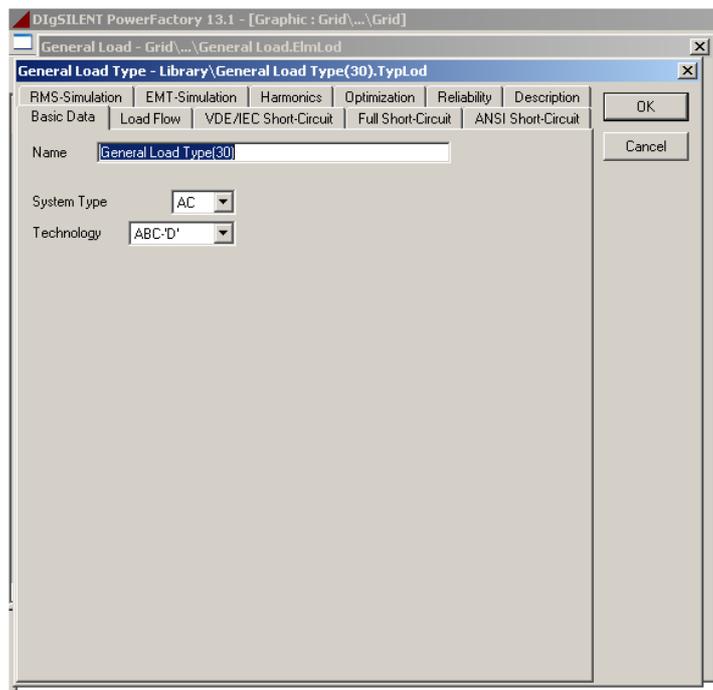
**Fig.178: Dettaglio scheda del carico**

Bisognerà scegliere un tipo per il carico nel campo “Type” selezionando il tasto , il quale farà comparire il menù attivo come in Fig.21.



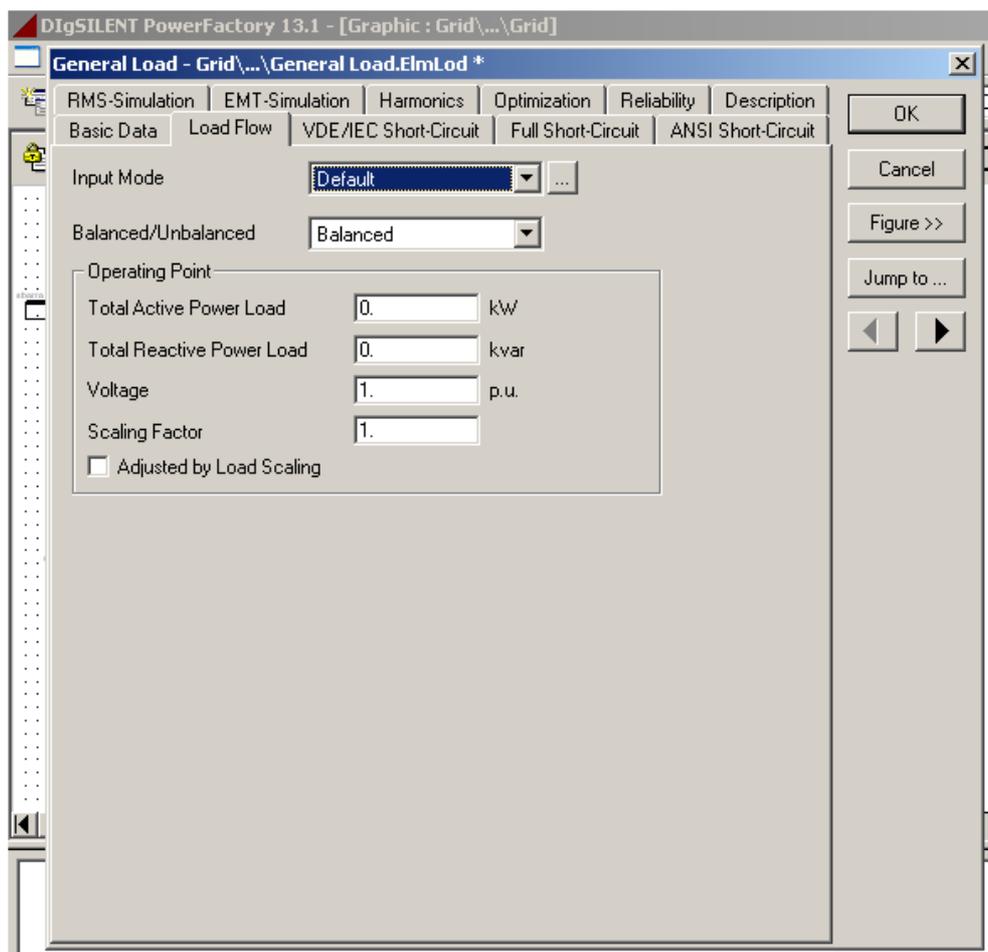
**Fig.179: Dettaglio scelta del tipo per il carico**

Da tale menù dovrà essere scelta la voce “General Load Type”. Verrà fuori una finestra di dialogo come mostrato in Fig.22.



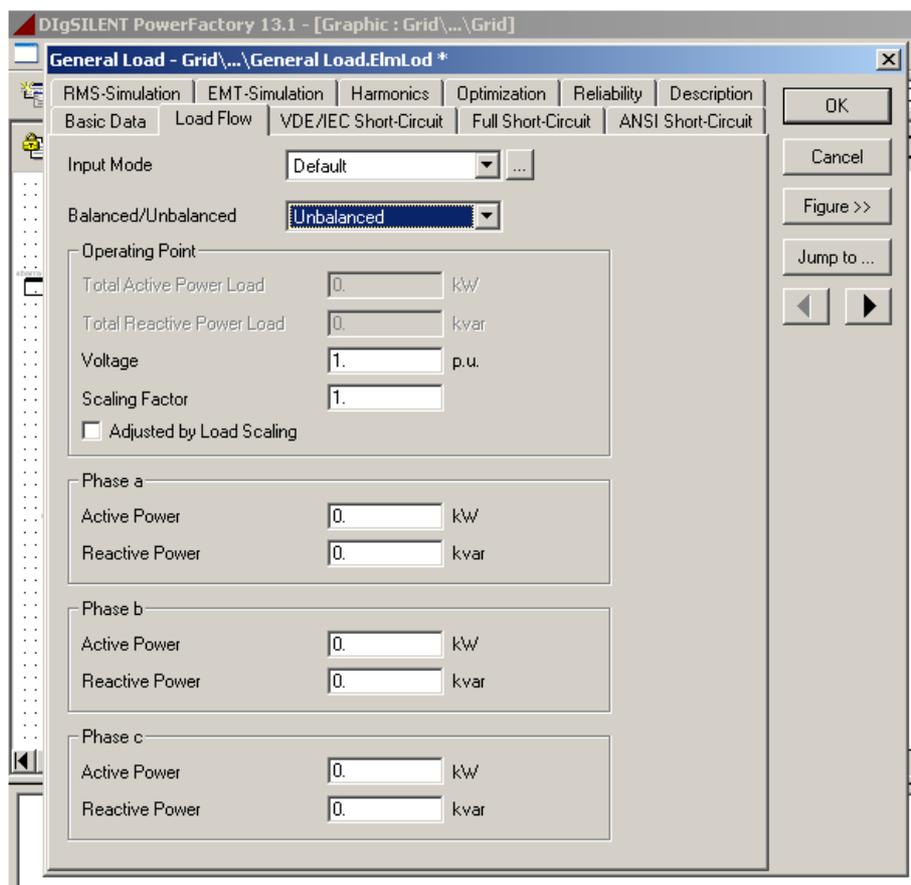
**Fig.180: Dettaglio descrizione del tipo per il carico**

In tale scheda andrà riempito il campo denominato “System Type” per specificare se si tratta di un carico AC oppure DC. Successivamente si passerà al campo “Technology” per specificare con quale tipo di collegamento il carico dovrà essere allacciato alla rete. Eseguite queste scelte bisognerà passare alla seconda cartella della stessa scheda, denominata “Load Flow”, nella quale andranno definite le dipendenze del carico dalla potenza attiva e reattiva e per le quali si usano i codici usati per descrivere i modelli ZIP. Fatto ciò si può dare l’OK e ritornare così alla scheda iniziale (vedi Fig.20). Adesso si dovrà selezionare la cartella “Load Flow” che apparirà come in Fig.23.



**Fig.181: Dettaglio definizione delle potenze del carico**

Nella Fig.23, al campo denominato “Input Mode” è possibile scegliere quali coppie grandezze descriveranno il carico. Nel campo “Balanced/Unbalanced” si dovrà specificare se il carico è bilanciato oppure no ed in quest’ultimo caso la sezione sottostante cambierà immediatamente in quanto verranno richieste le potenze attive e reattive assorbite da ciascuna fase (vedi Fig.24).



**Fig.182: Dettaglio descrizione di un carico squilibrato**

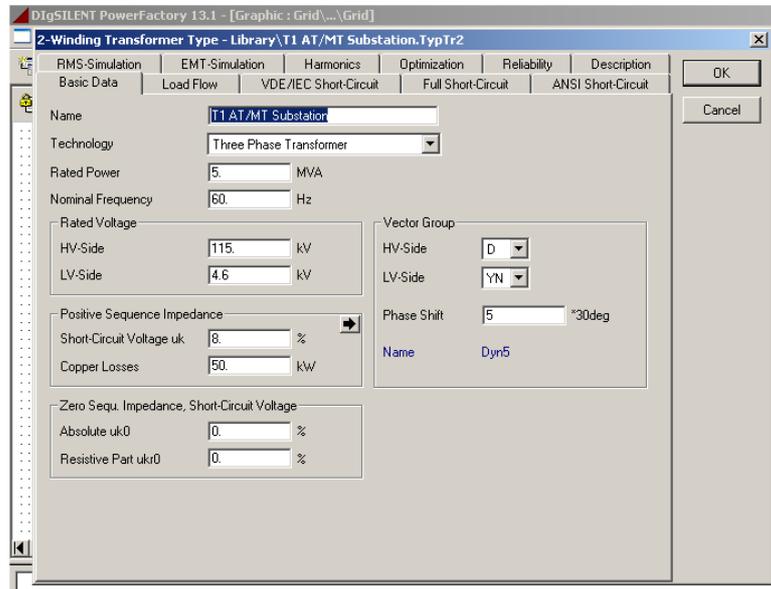
Nella Fig.23 come anche nella Fig.24 compaiono due campi denominati rispettivamente “Voltage” e “Scaling Factor”; il primo serve per legare la tensione di alimentazione del carico a quella del nodo a cui è allacciato, il secondo serve come fattore di scala delle potenze, nel senso che si può fare assorbire allo stesso carico una potenza multipla di quella definita negli appositi campi.

Si ribadisce, ancora una volta, che bisogna prestare attenzione affinché ci sia congruenza tra il nome delle fasi attive per il carico ed il nome delle fasi fisicamente presenti al nodo, pena la non alimentazione dello stesso carico.

#### **Paragrafo 5.4: Definizione del modello di un trasformatore**

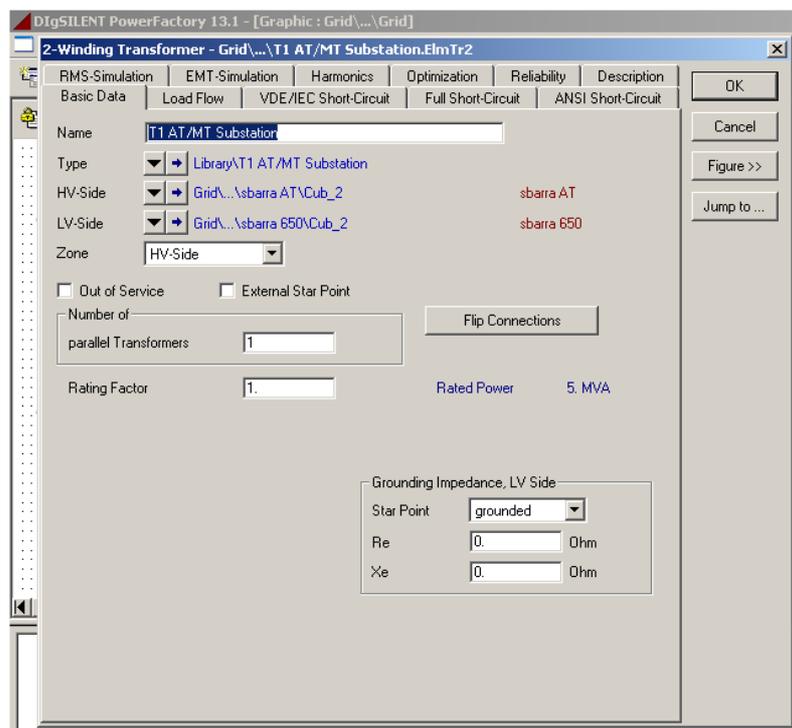
La prima cosa da fare è quella di costruire un tipo per il trasformatore direttamente nella libreria di progetto, poiché sono noti i parametri necessari per la sua definizione (vedi Tab.8). Per definire il tipo si procederà come per i conduttori, ovvero si selezionerà con un singolo click la libreria di progetto, si selezionerà il tasto “New Object” e dalla lista

che apparirà successivamente si sceglierà la voce “2-Winding Transformer Type” e dare poi l’Ok. Comparirà una finestra di dialogo, come in Fig.25, che dovrà essere in ogni sua parte con i dati in proprio possesso e successivamente dare l’Ok.



**Fig.183: Dettaglio della scheda descrivente il tipo per il trasformatore**

Adesso si dovrà introdurre un trasformatore nello schema unifilare e selezionarlo con un doppio click per avere accesso alla sua scheda di definizione, come in Fig.26.



**Fig.184: Dettaglio scheda del trasformatore**

Per prima cosa bisognerà selezionare il tipo a cui il modello dovrà puntare, scegliendolo dalla libreria del progetto. Successivamente si potrà andare direttamente nella sezione in basso, “Grounding Impedance”, e definire i valori dell’impedenza del collegamento verso terra del centro stella del trasformatore. Fatto ciò si può dare l’Ok poiché il trasformatore è stato definito nelle sue parti essenziali.

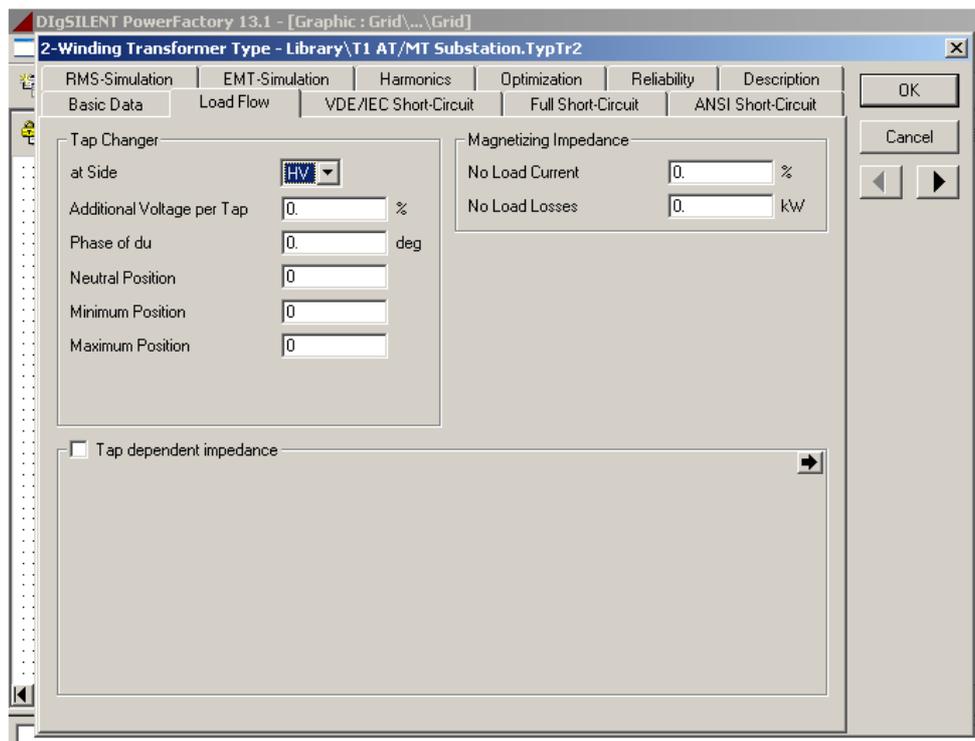
Nell’ambito della Media Tensione però alcuni trasformatori sono equipaggiati con un regolatore di tensione che ricopre il compito di mantenere costante la tensione in un determinato punto.

Nel seguito verrà mostrato come dimensionare un regolatore di tensione per un trasformatore trifase, il quale ha però un difetto costituito dal fatto che agisce soltanto su di una fase. Si vedrà solo successivamente come realizzare un regolatore di tensione trifase. Nel caso in cui si volesse introdurre un regolatore di tensione nello schema unifilare, il software prevede una sua definizione nella stessa scheda di definizione del trasformatore. Come primo passo bisogna selezionare il tipo per il trasformatore che è presente nella libreria in maniera da accedere alla sua scheda come mostrato in Fig.27.

The screenshot shows the '2-Winding Transformer Type' dialog box in DigSILENT PowerFactory 13.1. The dialog is titled 'Library\T1 AT/MT Substation.TypeTr2' and has tabs for 'Basic Data', 'Load Flow', 'VDE/IEC Short-Circuit', 'Full Short-Circuit', and 'ANSI Short-Circuit'. The 'Basic Data' tab is active. Fields include: Name (T1 AT/MT Substation), Technology (Three Phase Transformer), Rated Power (5 MVA), Nominal Frequency (60 Hz), Rated Voltage (HV-Side: 115 kV, LV-Side: 4.6 kV), Positive Sequence Impedance (Short-Circuit Voltage uk: 8%, Copper Losses: 50 kW), Zero Sequ. Impedance, Short-Circuit Voltage (Absolute uk0: 0%, Resistive Part ukr0: 0%), and Vector Group (HV-Side: D, LV-Side: YN, Phase Shift: 5 \*30deg, Name: Dyn5). OK and Cancel buttons are on the right.

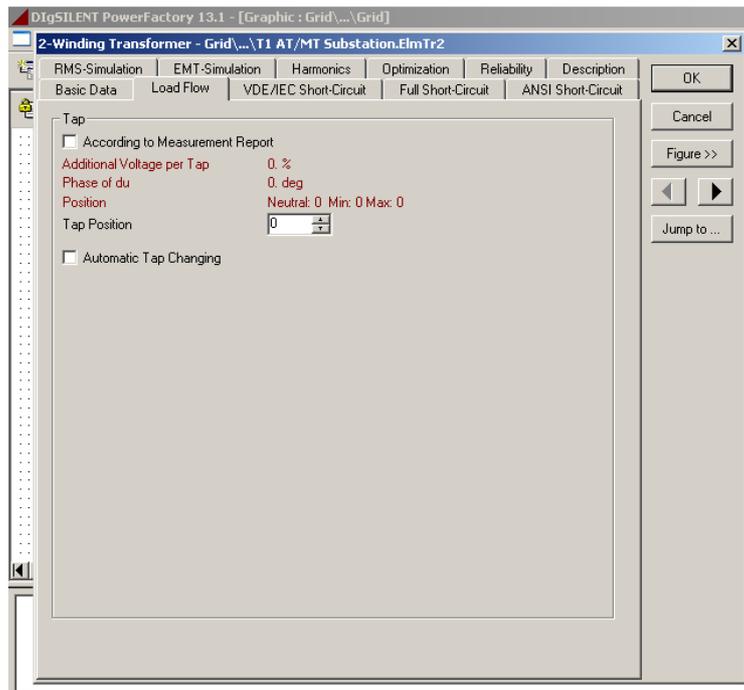
**Fig.185: Dettaglio scheda definizione del trasformatore**

A questo punto si dovrà selezionare la cartella denominata “Load Flow” che apparirà come nella seguente Fig.28.



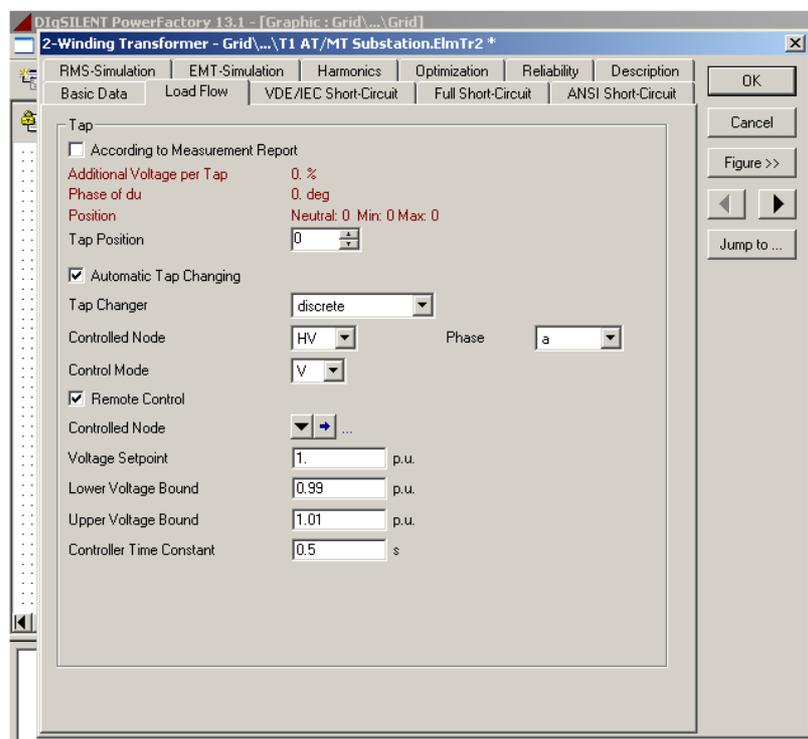
**Fig.186: Dettaglio scheda descrittiva del regolatore di tensione**

Come si può notare in tale cartella (vedi Fig.28) bisogna specificare l'avvolgimento che ospita il regolatore di tensione nel campo "at Side", l'ampiezza (espressa in percento della tensione nominale dell'avvolgimento sul quale il regolatore viene montato ed agisce) di uno step del regolatore nel campo "Additional Voltage per Tap" (il regolatore di tensione infatti non ha la possibilità di variare con continuità), l'angolo di fase della variazione di tensione nel campo "Phase of du" e nei campi sottostanti andranno introdotti rispettivamente i numeri che identificano la presa centrale, il massimo incremento positivo ed il massimo incremento negativo (questi ultimi due andranno introdotti in modulo e segno). Il regolatore è così stato definito completamente, per cui si può selezionare l'Ok ed uscire dalla scheda. A questo punto bisogna entrare nella scheda del trasformatore presente nello schema unifilare ed andare direttamente alla cartella "Load Flow" che apparirà come in Fig.29. In tale finestra alla sezione "Tap" compaiono delle voci con valore nullo che verranno cambiati al momento in cui nella scheda del tipo del trasformatore verranno introdotti i dati del regolatore di tensione. Nel campo "Tap Position" può essere scelta la posizione che il regolatore dovrà mantenere durante il funzionamento e l'unico modo per variare la tensione è l'intervento manuale.



**Fig.187: Dettaglio scheda descrizione del regolatore**

Per fare agire automaticamente il regolatore bisognerà innanzitutto posizionare la presa in posizione neutrale (variazione di tensione nulla) nel campo “Tap Position” e poi bisognerà selezionare la voce “Automatic Tap Changing”. La cartella si modificherà immediatamente come in Fig.30.



**Fig.188: Dettaglio scheda regolatore di tensione**

Contrariamente a quanto avviene nella realtà, il software DIgSilent offre la possibilità di una variazione continua della tensione. Tuttavia, per lo studio della rete si è scelto un regolatore discreto. Nel campo “Controlled Node” si sceglie se il nodo da controllare sia dal lato a tensione inferiore o superiore del trasformatore. Nel campo “Control Mode” si può scegliere la grandezza da controllare potendo tra tensione, potenza attiva e potenza reattiva. Nel nostro caso si è optato per un controllo in tensione, per cui il passo successivo è quello di riempire il campo “Phase”, che altrimenti scomparirebbe, con la fase da controllare (si può scegliere di controllare una tensione di fase come una tensione concatenata). A questo punto selezionando l’opzione “Remote Control” sarà possibile scegliere un nodo della rete da tenere sotto controllo, ovvero far lavorare il regolatore di tensione in maniera tale da mantenere costante la tensione a questo nodo.

Nei campi sottostanti andranno inserite le impostazioni in tensione, espressi in p.u., che determinano il valore di tensione da mantenere al nodo (la base di riferimento per il sistema in per unit è la tensione del nodo controllato), i suoi limiti superiore ed inferiore. Nell’ultimo campo “Controller Time Costant” deve essere introdotto il valore della costante di tempo che determina il ritardo della risposta del regolatore di tensione.

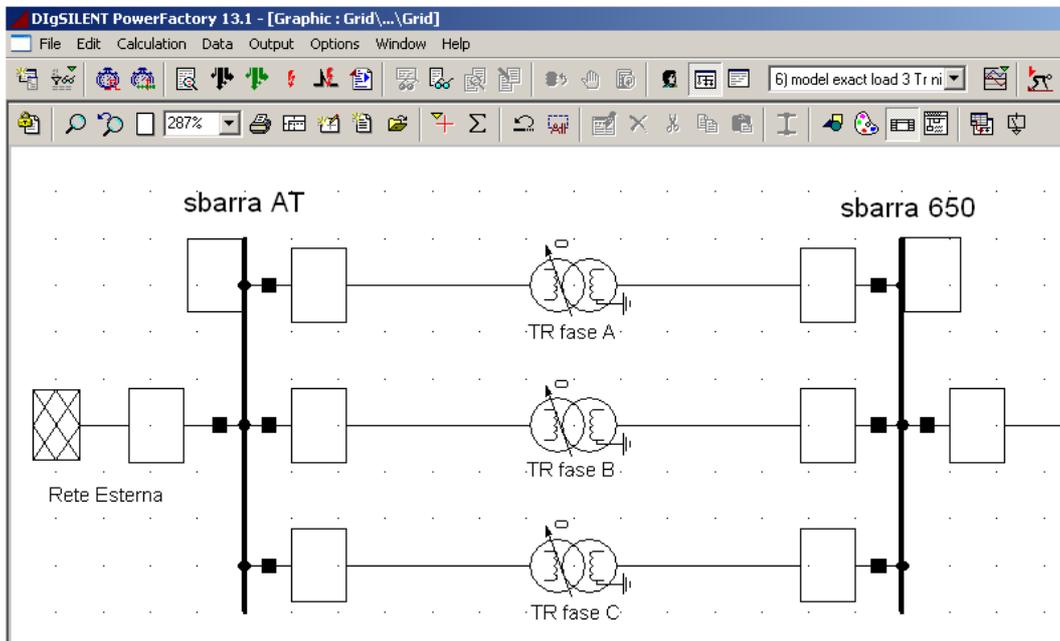
Il trasformatore funzionerà adesso con il suo regolatore di tensione.

Qualora si desiderasse costruire un trasformatore con un regolatore che controlli e corregga le tensioni su tutte e tre le fasi, un modo sarebbe quello di costruire tre trasformatori monofase tra gli stessi nodi ed equipaggiarli con un regolatore (che come già detto può controllare soltanto una tensione, sia essa di fase oppure concatenata).

La prima cosa da fare sarà quella di costruire nella libreria un tipo per il trasformatore monofase introducendo anche i dati per il dimensionamento del regolatore di tensione.

Il secondo passo sarà quello di entrare nello schema unifilare, inserendo tre trasformatori monofase tra i nodi che avrebbero ospitato il trasformatore trifase. Il terzo passo sarà quello di selezionarli uno ad uno e far sì che nel campo “Type” venga puntato il tipo di trasformatore costruito nella libreria di progetto. In tale modo, si è sicuri che i tre trasformatori saranno identici (tale procedura è, a dire il vero, consigliabile in tutti quei casi in cui in maniera ricorsiva bisogna introdurre gli stessi dati per gli stessi componenti). L’ultimo passo sarà quello di entrare nella cartella riguardante il regolatore di ogni trasformatore e modificare il nome della fase sotto controllo (nel campo “Phase”) e far sì che ciascuna delle fasi sia controllata da un trasformatore.

Lo schema unifilare del trasformatore con regolatore di tensione su tre fasi è mostrato in Fig.31.

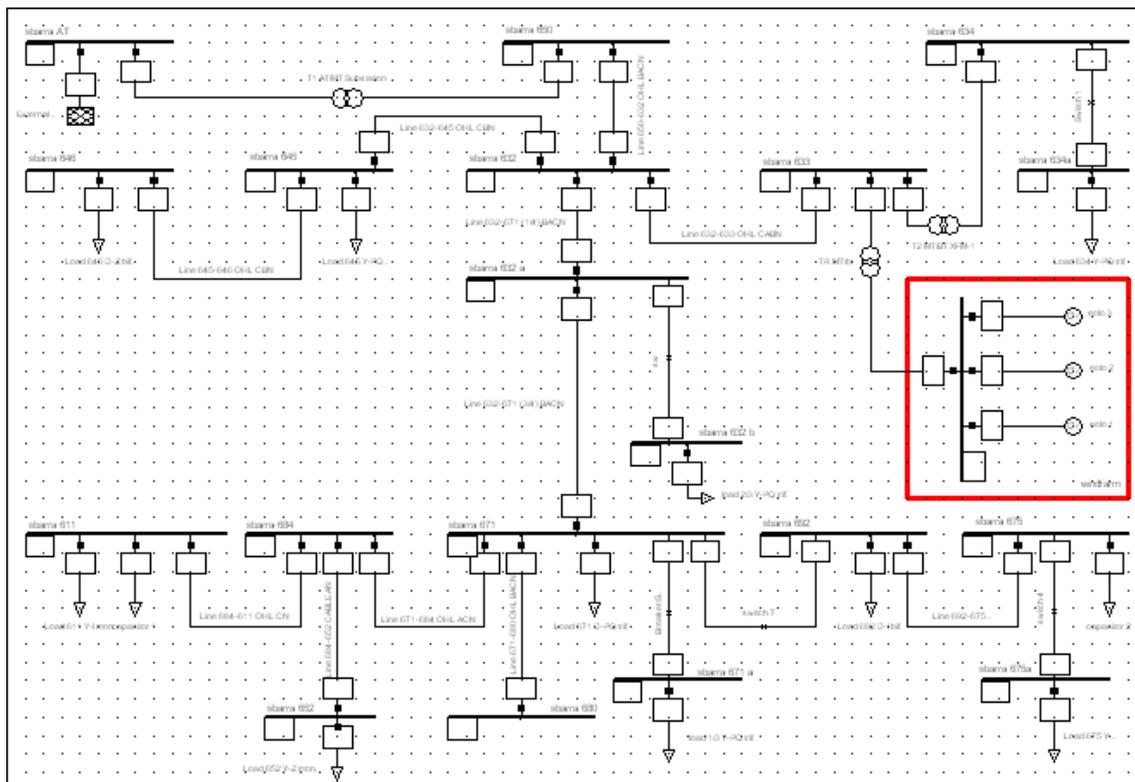


**Fig.189: Dettaglio dello schema unifilare con regolatore trifase**

### **Paragrafo 5.5: Le prove sulla rete in Media Tensione**

Le reti di distribuzione sono generalmente esercite in configurazione radiale passiva, per cui i flussi di potenza sono diretti dalla stazione AT/MT ai carichi. L'introduzione della generazione distribuita nei sistemi di distribuzione, tradizionalmente passivi, può richiedere una revisione delle procedure di progettazione e di gestione delle reti stesse. Una prima conseguenza dell'introduzione della generazione distribuita, indipendentemente dalla tipologia del generatore, è l'alterazione dei flussi di potenza attiva e reattiva. Questo discorso ha delle ripercussioni sul controllo di tensione, sulle perdite in rete e sulla selettività delle protezioni.

Nella Fig.32 viene riportato lo schema unifilare della rete in Media Tensione oggetto di studio. In tale schema si può notare la presenza di un impianto di generazione distribuita.

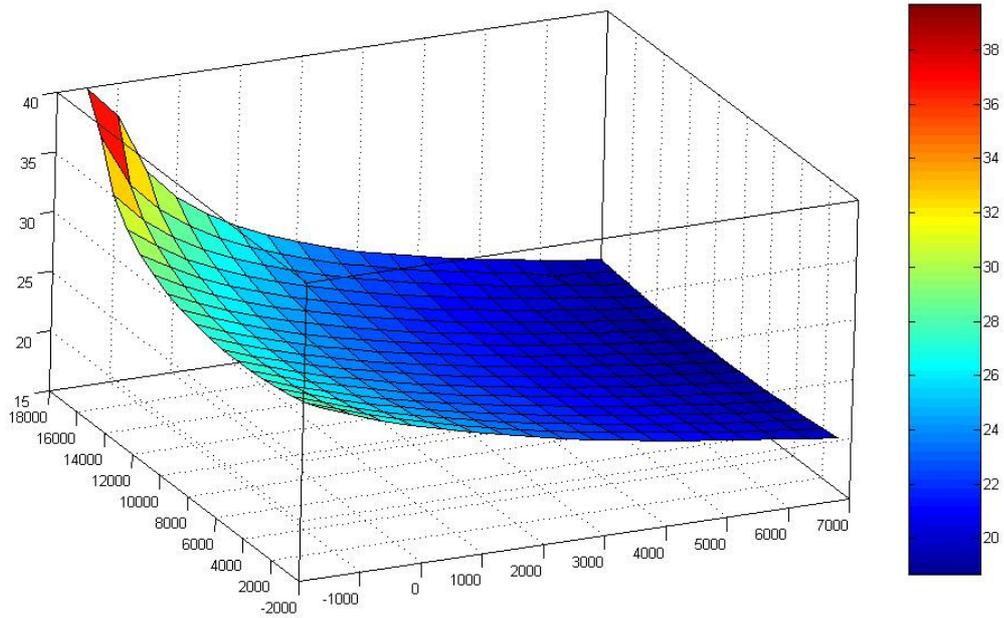


**Fig. 190: Dettaglio dello schema unifilare della rete MT**

In tale rete è stato inserito un impianto di generazione distribuita, nel riquadro rosso, costituito da tre generatori eolici dalla potenza di 3 MW ciascuno.

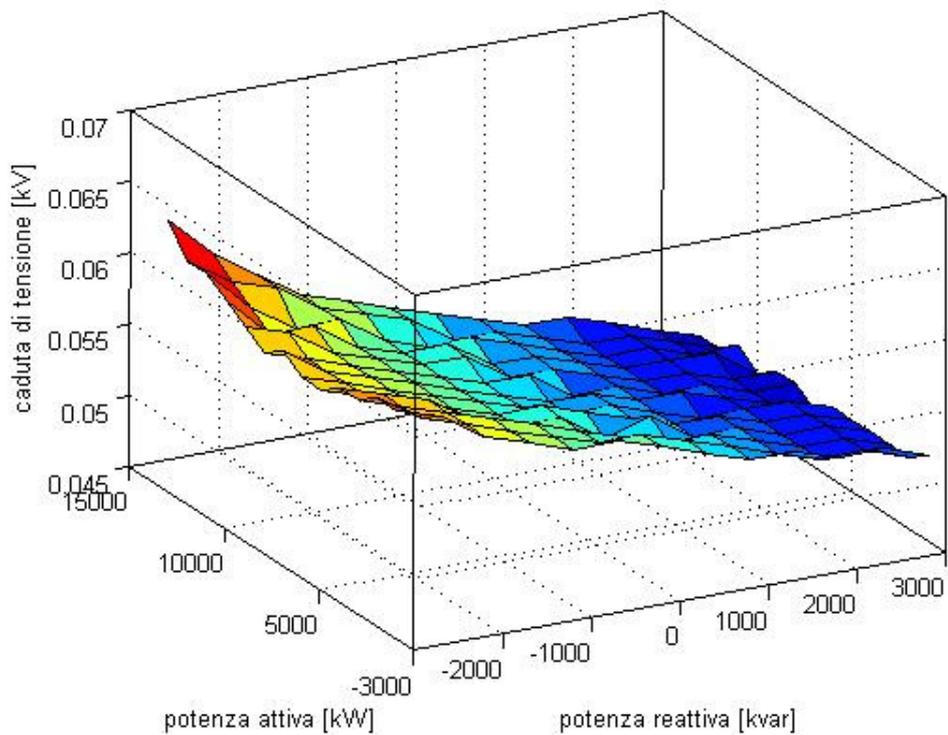
Verranno eseguite su tale rete due tipi di prove. Il primo tipo saranno delle simulazioni di load flow, tese a verificare la dipendenza delle perdite di potenza e della caduta di tensione lungo una linea scelta arbitrariamente. Il secondo tipo di simulazioni serviranno invece a verificare quale contributo apportano gli impianti di generazione distribuita alle correnti di corto circuito.

Le simulazioni di load flow verranno eseguite impostando un determinato valore della potenza attiva e facendo in seguito variare la potenza reattiva. Nella Fig.33 è riportato l'andamento della perdita di potenza, espressa in kW, lungo una linea. In tale figura si può notare come, per un determinato valore della potenza attiva della generazione distribuita, le perdite di potenza in linea diminuiscono all'aumentare della potenza reattiva verso valori positivi.



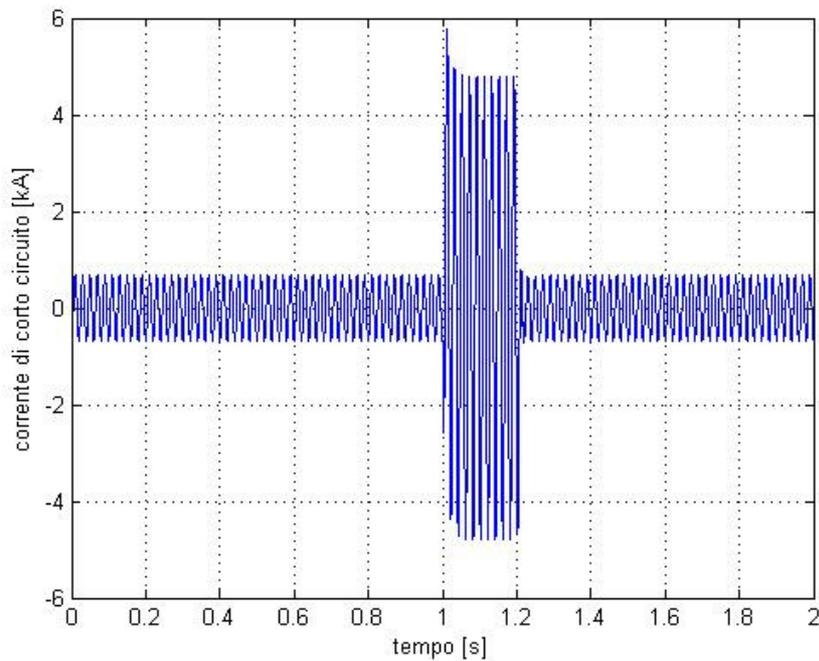
**Fig.191: Andamento della perdita di potenza in linea**

Nella Fig.34 è invece riportato l'andamento della caduta di tensione, espressa in kV, sempre lungo la stessa linea.



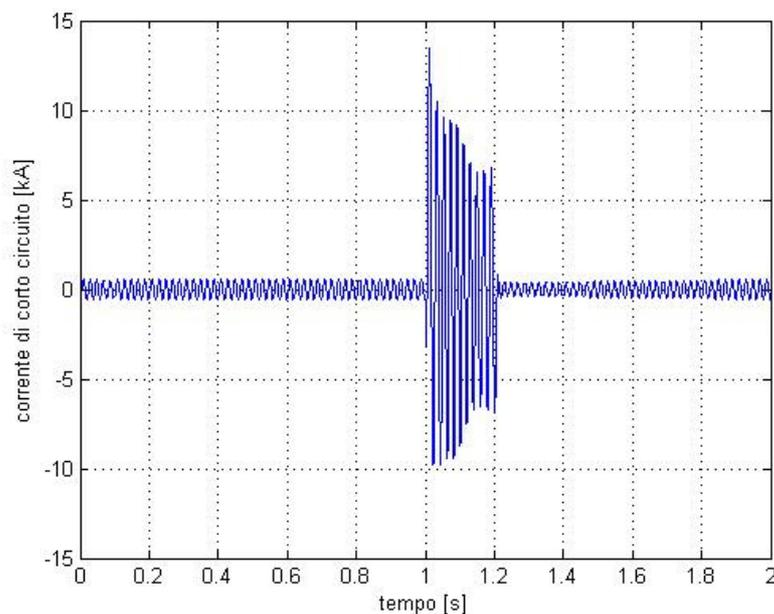
**Fig.192: caduta di tensione in linea**

Il secondo tipo di simulazioni che verrà condotto, sulla rete in Media Tensione, è nel dominio del tempo. Si ipotizzerà la stessa tipologia di guasto, con la differenza però che il guasto si estingue. Quest'ultima prova verrà eseguita una prima volta in assenza di generazione distribuita con il risultato riportato nella Fig.35.



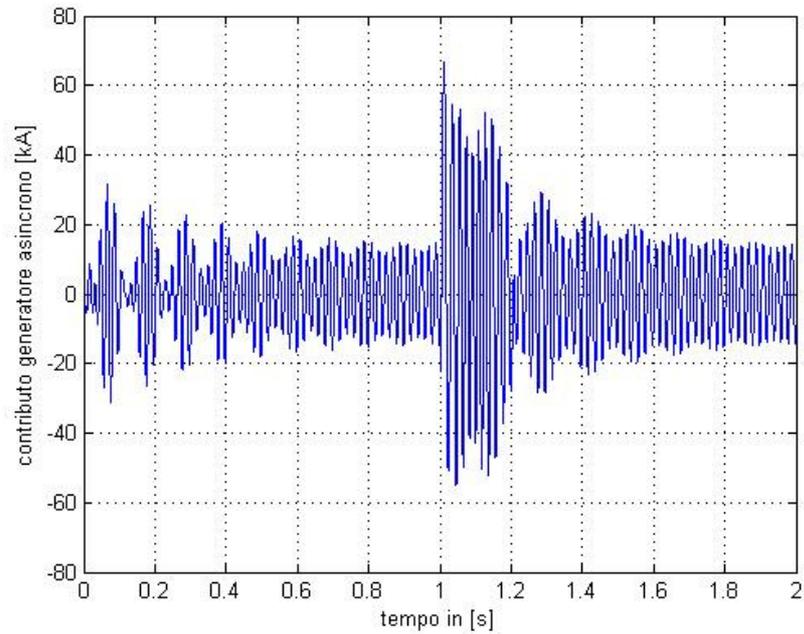
**Fig.35: Andamento della corrente di guasto senza generazione distribuita**

La seconda volta si eseguirà la stessa simulazione comprendendo l'impianto di generazione distribuita ed ottenendo il risultato come in Fig.36.



**Fig.36: Andamento della corrente di guasto in presenza di generazione distribuita**

Può essere notato come la presenza della generazione distribuita influenzi i picchi delle correnti di corto circuito più che gli andamenti stessi. Un'ultima simulazione verrà eseguita ai capi della generazione distribuita, costituita anche da macchine rotanti, e vedere così il contributo delle macchine rotanti alla corrente di guasto, come in Fig.37.



**Fig.37: contributo del generatore asincrono al corto circuito**

## **Bibliografia**

### **Capitolo 1:**

1)Manual DIgSILENT Power Factory 13.1.260.

### **Capitolo2:**

1)J.G. Slootweg, H. Polinder, W.L. Kling, ” Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator”, IEEE, 0-7803-7173-9/01, 2001, pagg.644-649.

2)Vestas Wind Systems, “Advanced Grid Optino 2”.

3)J.G. Slootweg, S.W.H. Haan, H. Polinder, W.L. Kling, “General Model for Representing Variable Speed Wind Turbine in Power system Dynamic Simulation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, no.1, February 2003, pagg.144-151 .

4)S.Corsi, M.Pozzi, “Control Systems of Wind Turbine Generators an Italian Experience”, 0-7803-7989-6/03, 2003, IEEE, pagg.1970-1976.

5)S.Suryanarayanan, A.Dixit, “On the dynamic of the Pitch Control Loop in Horizontal\_Axis Large Wind Turbines”,0-7803-9098-9/05, 2005, IEEE, pagg.686-690.

6)M.C. Jischke, “On the Aerodynamics of Windmill Blades”, Prok. Okla. Acad. Sci. 56: 121-124, 1976

### **Capitolo 3-4-5:**

1)C.Bossi, F.Sanson, M.Scagliotti, E.Tassi, “Generazione Distribuita: Tecnologie, Opportunità e Benefici”, art.4°/2001, Cesi Spa.

2)A.Agustoni, M.Brenna, R.Faranda, E.Tironi, C.Pinella, G.Simioli, “Constraints for the Interconnection of the Distributed Generation in Radial Distribution Systems”, art. 5°/2002, “Ricerca di Sistema”, Cesi.

3)A.Agustoni, M.Brenna, R.Faranda, E.Tironi, G.Simioli, “Distributed Generation Control Methodologies and Network Reconfiguration: Effects on Voltage Profile”, art. 10°/2002, “Ricerca di Sistema”, Cesi.

4)C.Bossi, R.Cicoria, B.Delfino, F.Fornari, S.Massucco, F.Silvesrto, “Problematiche e Ruolo della Generazione Distribuita nell’Evoluzione del Sistema Elettrico Italiano”, art. 13/2003, “Ricerca di Sistema”, Cesi.

5)G.Celli, R.Cicoria, B.Colombo, R.Faranda, M.Lissandrin, F.Pilo, S.Poretta, L.Sfondrini, E.Tironi, G.Valtorta, “La Generazione Distribuita e le Tendenze

dell'Evolutione della Rete di Distribuzione", art16/2003, 2/2, Cesi, AEI, ENERCOM, ABB, Enel distribuzione, Politecnico di Milano, Università di Cagliari.

6) M. Brenna, R. Faranda, "Ottimizzazione di Potenza Attiva e Reattiva della Generazione Distribuita per Ridurre le Perdite e Migliorare i Profili di Tensione", L'Energia Elettrica- Volume 81(2004)- "Ricerche".