



# MANUALE

*di*

## *Macchine Elettriche*

Accesso rapido a calcoli, dimensionamenti, perdite e rendimenti di  
macchine elettriche in corrente alternata

Edizione 3.1  
Novembre 2005

Novatekno S.r.l.  
Via Volturno, 47 - Mestre (VE)  
Tel. 041-5344537 / Fax. 041-5342425  
[www.novatekno.it](http://www.novatekno.it)

### *Indice*

1. Elettrotecnica Generale
2. Corrente Alternata (potenze ed altre espressioni)
3. Trasformatore
4. Elementi di Meccanica
5. Motori in Corrente Alternata
6. Motori Asincroni Trifasi

Attenzione : edizione in fase preparatoria e non ancora definitiva : fare attenzione in quanto potrebbero esserci errori, anche di battitura.

Per commenti e suggerimenti : [marco.dalpra@novatekno.it](mailto:marco.dalpra@novatekno.it)

## Parte 1° - Elettrotecnica Generale

### Leggi Fondamentali

<b>Definizione</b>	<b>Espressione</b>	<b>Unità di Misura</b>
Legge di Ohm	$R = \frac{V}{I}$	ohm - $\Omega$
Potenza su carico resistivo. Anche indicata con Pj per indicare che si tratta di perdite per effetto Joule	$P = R I^2$	watt - W
Potenza in Corrente Continua	$P = V I$	watt - W

### Riporto in Temperatura

Per riportare il valore di una resistenza presa a 20°C ad una temperatura “ $\theta$ ” :

$$R_{\theta} = R_{20} \frac{234,5 + \theta}{234,5 + 20}$$

Ad esempio per riportare il valore di una resistenza su un motore presa a 20°C e riportata alla temperatura di lavoro 70°C.

## Parte 2° - Corrente Alternata

### Espressione di una f.e.m. sinusoidale

Valore all'istante “t”	$v(t) = \sqrt{2} V_{\max} \sin(\omega t)$
Valore Efficace di una tensione (quello che si misura con gli strumenti tradizionali)	$V = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$

### ANGOLO di SFASAMENTO

Per convenzione l'angolo di sfasamento tra tensione (di alimentazione) e corrente (assorbita dal carico) è calcolato nel modo che segue :

$$\varphi = \Phi_V - \Phi_I$$

<b>angolo <math>\varphi</math></b>	<b>Tipo di carico</b>
tra 0 e 90°	Induttivo (RL)
tra 0 e -90°	Capacitivo (RC)

**TRIANGOLO delle POTENZE**

<b>Definizione</b>	<b>Espressione</b>	<b>U. M.</b>
Potenza Apparente	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	VA
Potenza Attiva	$P = S \cos \varphi$	W
Potenza Reattiva	$Q = S \sin \varphi$ $Q = P \tan \varphi$	var
Tangente	$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$	-
Angolo	$\varphi = \arctang \frac{Q}{P}$	gradi

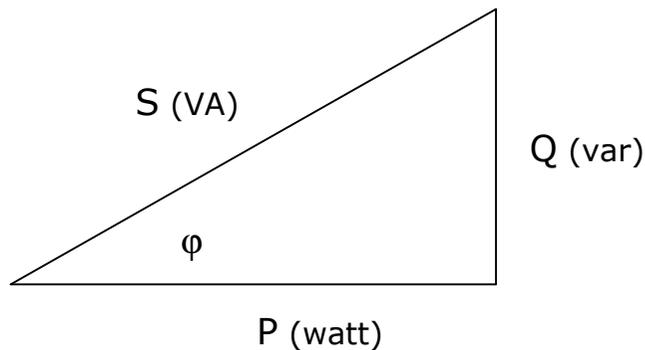


Figura : il Triangolo delle potenze (monofase & trifase)

**LEGGE di Ohm – Circuiti Trifasi**

<b>Descrizione</b>	<b>Espressione</b>	<b>U.m.</b>
Potenza Apparente	$S = 3 Z I^2$	VA
Potenza Attiva	$P = 3 R I^2$	W
Potenza Reattiva	$Q = 3 X I^2$	var
Angolo di sfasamento	$\varphi = \arctang \frac{X}{R}$	

**POTENZA - Circuiti MONOFASE**

<b>Definizione</b>	<b>Espressione</b>	<b>U. M.</b>
Potenza Apparente	$S = VI$	VA
Potenza Attiva	$P = VI \cos \varphi$	W
Potenza Reattiva	$Q = VI \sin \varphi$	var

**POTENZA - Circuiti TRIFASI**

<b>Definizione</b>	<b>Espressione</b>	<b>U. M.</b>
Potenza Apparente	$S = \sqrt{3} V I$	VA
Potenza Attiva	$P = \sqrt{3} V I \cos \varphi$	W
Potenza Reattiva	$Q = \sqrt{3} V I \sin \varphi$	var
Corrente	$I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos \varphi}$	A
Fattore di potenza (f.p.)	$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V I}$	-
Angolo (dal fattore di potenza)	$\varphi = \arccos (\text{f.p.})$	gradi

**RIFASAMENTO**

<b>Definizione</b>	<b>Espressione</b>	<b>U. M.</b>
Angolo di sfasamento ammesso per impianti rifasati	$\varphi \leq 25^\circ$	
Fattore di potenza ammesso per impianti rifasati	$\cos \varphi \geq 0,9$	
Potenza Reattiva massima ammessa per impianti rifasati	$Q_{\max} = P \tan 25^\circ$	var
Potenza Rifasante	$Q_c = Q - Q_{\max}$	var
Reattanza capacitiva di rifasamento (Trifase)	$X_c = 3 \frac{V^2}{Q_c}$	ohm
Condensatore di rifasamento	$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$	F
Corrente sul condensatore	$I = \frac{Q_c}{\sqrt{3} V}$	A

**Parte 3° - Trasformatore Trifase**

**Caratteristiche Fondamentali**

Descrizione	Espressione	U.m.
Potenza Nominale	$S_n = \sqrt{3} V_{1n} I_1 = \sqrt{3} V_{20} I_2$	VA
Tensione al primario	$V_1$	V
Tensione al secondario	$V_2$	V
Tensione al secondario a vuoto	$V_{20}$	V
Potenza Assorbita	$P_1 = P_2 + Perdite$	W
Potenza Resa	$P_2 = \sqrt{3} V_2 I_2 \cos \varphi_2$	W
Rendimento (vedere anche in seguito)	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	
Corrente Nominale al Primario	$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{1n}}$	A
Corrente Nominale al secondario	$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{20}}$	A

Trasformatore : **BILANCIO ENERGETICO**

Descrizione	Espressione	U.m.
Potenza Assorbita	$P_1 = P_2 + P_{fe} + P_{cu}$	W
Perdite nel Ferro (*)	$P_{fe} = \left( \frac{V_1}{V_{1n}} \right)^2 P_0$	W
Grado di Carico	$\alpha = \frac{I_2}{I_{2n}}$	
Perdite a vuoto	$P_0 = \sqrt{3} V_{1N} I_0 \cos \varphi_0$	W
Perdite nel Rame	$P_{cu} = \alpha^2 P_{cc}$	
<b>Bilancio complessivo delle potenze</b>	$P_1 = P_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}$	
<b>Rendimento Convenzionale</b>	$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}}$	
(dalle Norme CEI)	$P_2 = \sqrt{3} V_2 I_2 \cos \varphi_2$	
Grado di carico al rendimento massimo	$\alpha_{max} = \sqrt{\frac{P_0\%}{P_{cc}\%}}$	

\*NOTA : Tipicamente si assume  $V_1 = V_{1n}$  , quindi  $P_{fe} = P_0$ .

Trasformatore : **PERDITE a VUOTO**

Descrizione	Espressione	U.m.
Perdite nel Ferro	$P_{fe} = P_i + P_{cp}$	W
Perdite per Isteresi	$P_i$	W
Perdite per Correnti Parassite	$P_{cp}$	W
Perdite a vuoto	$P_0 = \sqrt{3} V_{1N} I_0 \cos \varphi_0$	W
Corrente attiva a vuoto	$I_a = I_0 \cos \varphi_0$	A
Corrente Magnetizzante	$I_\mu = I_0 \sin \varphi_0$	A
Rapporto tra le correnti	$I_\mu \gg I_a$	
Fattore di potenza a vuoto	$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} V I_0}$	
Resistenza equivalente delle perdite nel ferro	$R_o = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} I_a}$	$\Omega$
Perdite a vuoto (dal rendimento)	$P_0 = \frac{P_2}{\eta} - P_2 - \alpha^2 P_{cc}$	W

Trasformatore : **PERDITE in CORTO CIRCUITO**

Descrizione	Espressione	U.m.
Perdite in corto circuito da Pcc percentuale	$P_{cc} = S_n \frac{P_{cc}\%}{100}$	W
Perdite nel Ferro	$P_{fe} \cong 0$ (in quanto la $V_1 \cong 0$ )	W
Perdite in corto circuito equivalenti al primario	$P_{cc} = \sqrt{3} V_{1cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc}$	W
	$P_{cc} = 3 R_{1cc} I_{1n}^2$	W
equiv. al secondario	$P_{cc} = 3 R_{2cc} I_{2n}^2$	W
Fattore di potenza in cortocircuito	$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}\%}{V_{cc}\%} = \frac{100 P_{cu}}{V_{cc}\% S_n}$	
	$\cos \varphi_{cc} = \frac{R_{1cc}}{Z_{1cc}} = \frac{R_{2cc}}{Z_{2cc}}$	
	$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{1cc} I_{1n}} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{2cc} I_{1n}}$	
Tensione di c.c. al Primario	$V_{1CC} = V_{1N} \frac{V_{cc}\%}{100}$	V
Tensione di c.c. al Secondario	$V_{2CC} = V_{20} \frac{V_{cc}\%}{100}$	V

Trasformatore : **Caratteristiche interne al Primario**

<b>Descrizione</b>	<b>Espressione</b>
Resistenza Equivalente al primario	$\mathbf{R}_{1cc} = R_1 + R_2 m^2$
Impedenza al Primario	$\mathbf{Z}_{1cc} = \frac{V_{1CC}}{\sqrt{3} I_{1N}}$

**Caratteristiche interne al Secondario**

<b>Descrizione</b>	<b>Espressione</b>
Impedenza al Secondario	$\mathbf{Z}_{2cc} = \frac{V_{2CC}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{V_{CC} \%}{100} \frac{V_{20}^2}{S_n}$
Resistenza equivalente al secondario	$\mathbf{R}_{2cc} = \frac{P_{CC}}{3 I_{2n}^2}$
	$\mathbf{R}_{2cc} = \frac{P_{CC} \%}{100} \frac{V_{20}^2}{S_n}$

Trasformatore :

**ASPETTI COSTRUTTIVI delle Perdite nel Ferro**

<b>Descrizione</b>	<b>Espressione</b>
Dipendenza dalla tensione al primario	$\mathbf{Pfe} = k V_1^2$
Espressione generalizzata	$\mathbf{Pfe} \cong \frac{V_1^2}{(4,44 N_1 A_{fe})^2} \left[ \frac{a}{f} + b \delta^2 \right] \text{Vol}_{fe}$
Dipendenza dal peso del nucleo	$\mathbf{Pfe} = c B_M^2 \text{Peso ferro}$
Flusso Massimo determinato dalla tensione al primario	$\Phi_M = \frac{V_1}{4,44 f N_1}$
Perdite per isteresi	$P_i = a f B_M^2 \text{Vol}_{fe}$
Perdite per correnti parassite (di Foucault)	$P_{cp} = b (\delta f B_M)^2$
Note	f = frequenza $\delta$ = spessore lamierini

Trasformatore : **CADUTA di TENSIONE**

Le seguenti formule valgono nella condizione in cui il trasformatore alimenta un carico induttivo.

<b>Assoluta</b>	$\Delta V = V_{20} - V_2$ $\Delta V = \sqrt{3} I_2 (R_{2cc} \cos \varphi_2 + X_{2cc} \sin \varphi_2)$
<b>Percentuale</b>	$\Delta V\% = \alpha V_{cc\%} (\cos \varphi_{cc} \cos \varphi_2 + \sin \varphi_{cc} \sin \varphi_2)$
Formula semplificata	$\Delta V\% \cong \alpha V_{cc\%} (\cos^2 \varphi_2 + \sin^2 \varphi_2)$

Tenere conto che  $\cos \varphi_2 = \cos \varphi$  del carico :

**Rapporti Primario / Secondario**

Rapporto Spire	$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$	
Rapporto di Trasformazione	$K = \frac{V_1}{V_{20}}$	

Trasformatore :

**CONDIZIONI di FUNZIONAMENTO PARTICOLARI**

**1. Tensione di alimentazione Superiore a quella nominale**

- il flusso aumenta in proporzione con l'aumento della tensione
- l'induzione aumenta in proporzione
- le perdite nel ferro aumentano in proporzione quadratica
- la corrente magnetizzante aumenta, dato che il trasformatore dissipa più energia nel ferro, ed aumenta la sua distorsione
- la f.e.m. al secondario aumenta proporzionalmente, e quindi ciò comporta un aumento della potenza erogata al carico.

**2. Tensione di alimentazione Inferiore a quella nominale :**

- il flusso diminuisce in proporzione alla tensione
- l'induzione diminuisce in proporzione
- le perdite nel ferro diminuiscono in proporzione quadratica con la tensione
- la corrente magnetizzante diminuisce, dato che il trasformatore dissipa meno energia nel ferro
- la f.e.m. al secondario diminuisce.

Tensione al primario	Variazione di $P_{fe}$	Variazione di $I_0$
$V_1 > V_{1n}$	aumenta	aumenta
$V_1 < V_{1n}$	diminuisce	diminuisce

### 3. Frequenza Superiore a quella nominale

- il flusso diminuisce in quanto è inversamente proporzionale alla frequenza
- in egual modo diminuisce l'induzione
- le perdite nel ferro diminuiscono leggermente, in quanto :
  - Le perdite per isteresi diminuiscono
  - Le perdite per correnti parassite restano costanti
- la corrente magnetizzante diminuisce, e diminuisce la distorsione della sua forma d'onda.
- le Reattanze di dispersione aumentano, facendo aumentare le cadute di tensione all'interno del trasformatore, soprattutto se il carico è molto induttivo.

### 4. Frequenza Inferiore a quella nominale

- il flusso magnetico aumenta in quanto inversamente proporzionale alla frequenza, ed aumenta l'induzione ;
- le perdite nel ferro diminuiscono leggermente, in quanto :
  - Le perdite per isteresi aumentano
  - Le perdite per correnti parassite restano costanti
- aumenta la corrente di magnetizzazione, ed aumentano le sue componenti armoniche (la 3° e la 5°);
- le Reattanze di dispersione diminuiscono, facendo diminuire le cadute interne.

Frequenza al primario	Variazione di $P_{fe}$	Variazione di $I_0$
$f > f_n$	leggera diminuzione	diminuisce
$f < f_n$	leggero aumento	aumenta

## Parte 4° - Elementi di Meccanica

<b>Definizione</b>	<b>Espressione</b>	<b>U. M.</b>
<b>Potenza Nominale</b>	$P_n$	<i>kW</i>
Velocità effettiva del rotore	$n$	<i>Giri/min</i>
Velocità Angolare (effettiva)	$\omega = \frac{2\pi n}{60}$	<i>Rad/sec</i>
<b>Coppia Nominale</b> resa all'asse da un motore (valida per tutti i motori, sia AC che DC)	$C_n = \frac{P_n}{\omega}$	<i>N m</i>
Velocità nominale o sincrona	$n_1$	<i>Giri/min</i>
Velocità Angolare sincrona (del c.m.r.)	$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$	<i>Rad/sec</i>
<b>Coppia Trasmessa</b> (dallo statore al rotore)*	$C_t = \frac{P_t}{\omega_1}$	<i>N m</i>

(\*)  $P_t$  è la Potenza Trasmessa dal c.m.r. (vedere oltre)

**Coppia Persa per Attrito e Ventilazione**

$C_n = C_t - C_m$ $C_m = \frac{P_m}{\omega}$	<p><math>P_m</math> = Perdite meccaniche per attrito e Ventilazione</p> <p><math>C_m</math> = Coppia persa a causa delle perdite meccaniche</p> <p><math>C_n</math> = Coppia Nominale (o coppia resa)</p> <p><math>C_t</math> = Coppia Trasmessa (dal c.m.r.), anche detta Coppia Lorda</p>
--	---

**NOTA : Le Pompe idrauliche**

Dalla portata e dalla prevalenza (altezza) di una pompa idraulica si trova la potenza necessaria per muovere il fluido (acqua) :

$P = Q g h$ $P_n = 1,25 P (*)$	<p>Q = Portata in Litri /secondo</p> <p><math>g = 9,8 \text{ m/s}^2</math></p> <p>h = altezza in metri</p>
--------------------------------	--

(\*) Si considera una maggiorazione del 25% per tenere conto delle perdite di carico e del rendimento effettivo della pompa.

**Parte 5° - Motori in Corrente Alternata**

**Campo Magnetico Rotante**

La velocità di rotazione del campo magnetico rotante, detta anche velocità Sincrona, si calcola con la seguente espressione :

$n_1 = \frac{60 f}{2p} = \frac{120 f}{p} \text{ (giri/min)}$	<p>p : numero di poli</p> <p>2p : numero di coppie polari</p> <p>f : frequenza (ad es. 50 Hz)</p>
--	---

**Tabella fondamentale delle velocità dei motori trifasi a 50 Hz**

Numero di Poli	Coppie Polari	Velocità (giri/min.)
2	1	3000
4	2	1500
6	3	1000
8	4	750
10 *	5	600
12 *	6	500
ecc..	..	...

\* Oltre gli 8 poli non sono motori standard in commercio.

## Potenza

Definizione	Espressione	U. M.
<b>Potenza Nominale</b> (resa all'asse) : è la potenza indicata sulla targa del motore	$P_n$	<i>kW</i>
<b>Potenza Assorbita</b> (dalla rete elettrica)	$P_a = \frac{P_n}{\eta}$	<i>kW</i>
	$P_a = \sqrt{3} V_n I_n \cos \varphi$	<i>kW</i>

<b>Rendimento</b>	$\eta = \frac{P_n}{P_a}$	
Esempio	$\eta = 0,915 = 91,5\%$	

## Parte 6• - Motori Asincroni Trifasi

### Scorrimento

Indicando con  $n_1$  la velocità di rotazione del campo magnetico rotante, e con  $n$  quella effettiva del rotore si ha :

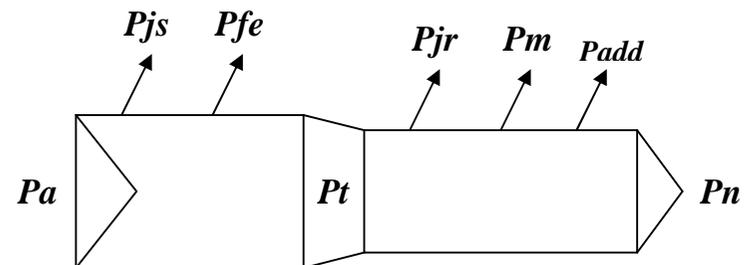
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \qquad n = n_1 - s n_1$$

### Frequenza Rotorica

Rapporto tra le frequenze

$$f_2 = s f_1$$

### Bilancio Energetico a carico



$$P_a = P_{fe} + P_{js} + P_{jr} + P_m + P_{add} + P_n$$

**POTENZA TRASMESSA**

Potenza Trasmessa [vista da lato alimentazione]	$P_t = P_{ass} - P_{fe} - P_{js}$
Potenza Trasmessa [vista da lato asse]	$P_t = P_{jr} + P_m + P_{add} + P_n$

**PERDITE a CARICO**

Descrizione	Espressione
Perdite nel Ferro	$P_{fe}$ $P_{fe} = P_{isteresi} + P_{correnti\ parassite}$
Dipendenza delle Perdite nel ferro dalla tensione e frequenza di statore	$P_{fe} = V^2 K = V^2 \left( \frac{K_1}{f} + K_2 \right)$
Perdite nel rame, o Joule, di statore (Rs resistenza a stella)	$P_{js} = 3 R_s I_n^2$
Perdite nel rame di rotore	$P_{jr} = s P_t$
Perdite Meccaniche	$P_m$ $P_m = P_{atrito} + P_{ventilazione}$
Perdite Addizionali	$P_{add} = 0,5\% \text{ di } P_n \text{ o } P_t$

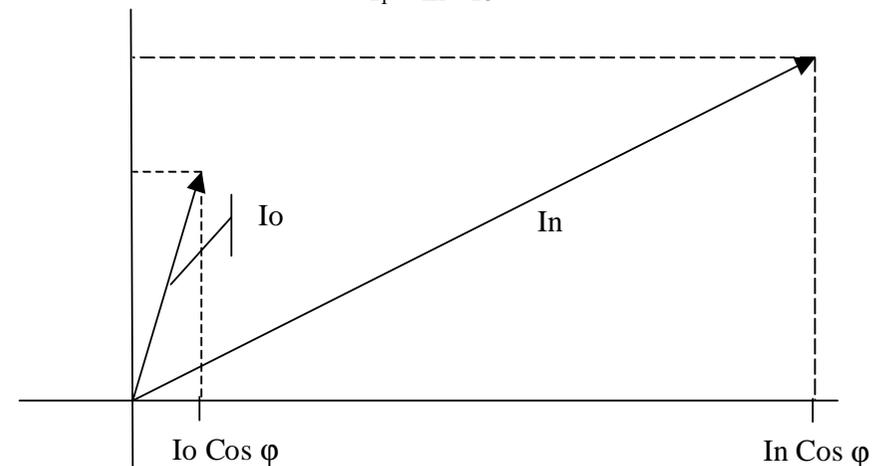
**Motore Asincrono : BILANCIO ENERGETICO a VUOTO**

Descrizione	Espressione
Perdite in base alla corrente assorbita	$P_0 = \sqrt{3} V I_0 \cos \varphi_0$
Causa delle perdite a vuoto	$P_0 = P_{jso} + P_{fe} + P_m$
Perdite nel rame di statore	$P_{jso} = 3 R_s I_0^2$
Perdite nel rame di rotore	$P_{jro} = 0$ (trascurabili)

**Corrente di Statore**

La corrente dello statore è composta da 2 correnti, quella utile per erogare potenza meccanica e quella dovuta alle perdite a vuoto, quindi per trovare la  $I_1$  è necessario fare una sottrazione vettoriale :

$$I_1 = I_n - I_0$$



<i>Componenti Attive</i>	<i>Componenti Reattive</i>
Ina = In cos φ Ioa = Io cos φo	Inr = In sen φ Ior = Io sen φo
I <sub>1a</sub> = Ina – Ioa	I <sub>1r</sub> = Inr – Ior
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$	

### **Corrente al Rotore**

La corrente che circola nello rotore dipende dalla corrente che lo statore gli “trasmette”, da calcolarsi mediante il rapporto di trasformazione, qui indicato con k :

$$I_2 = k I_1$$

### **Motore Asincrono :**

#### **ALIMENTAZIONE a TENSIONE RIDOTTA**

Dato che la coppia è direttamente proporzionale al quadrato della tensione, si avrà una conseguente riduzione anche della potenza, applicando la seguente proporzione :

$$P_a : V_n^2 = P_{rid} : V_{rid}^2$$

### **Resistenza Statorica**

Formula per calcolare la potenza dissipata dallo statore (perdite nel rame o perdite Joule) misurando la resistenza statorica :

$$P_{js} = 3/2 R_s I^2$$

La R<sub>s</sub> si intende la resistenza statorica misurata su due morsetti del motore con tutti gli avvolgimenti collegati (valida indifferentemente sia a stella che a triangolo).

### **COPYRIGHT - Proprietà del Documento**

Questo documento è stato redatto da Marco Dal Prà, perito industriale, tecnico presso la ditta Novatekno Srl di Mestre - Venezia.

#### ***Cosa si può fare***

Il documento può essere liberamente utilizzato e distribuito per scopi didattici sia da parte di studenti che di docenti di scuole pubbliche di ogni grado, e di corsi di specializzazione pubblici.

Può essere liberamente stampato per uso personale.

#### ***Cosa non si può fare***

Il documento non può essere replicato, su altri siti internet, mailing list, pubblicazioni cartacee (riviste) e cd-rom, ciò indipendentemente dalle finalità.

E' proibito utilizzarlo a scopo di lucro, come ad esempio da parte di società private che a qualsiasi titolo tengano corsi di aggiornamento e/o di specializzazione.

Per tali finalità è possibile prendere accordi che dovranno essere formulati in forma scritta da entrambe le parti.

#### ***Esclusione di Responsabilità***

I contenuti del presente documento sono utilizzabili così come sono.

Nonostante i controlli fatti prima di renderlo di pubblico dominio nel sito internet della ditta Novatekno Srl, **non** è possibile assicurare che il documento sia esente da errori e/o omissioni. **Nessuna responsabilità** può essere attribuita all'autore del documento per l'utilizzo dello stesso.

#### ***Note***

Gli eventuali marchi citati nel presente documento sono di proprietà dei relativi produttori.

#### ***Aggiornamenti***

Il presente documento non viene aggiornato periodicamente (ad esempio a cadenze fisse), ma può venir aggiornato dall'autore a sua discrezione e senza alcun preavviso. Ad esempio l'autore può decidere di effettuare un aggiornamento sulla base di libere segnalazioni fatte dai lettori.

Gli eventuali aggiornamenti saranno messi a disposizione nel sito internet della Novatekno Srl, alla pagina *download*.

L'edizione del documento è indicata nella prima pagina.