



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

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

Parte 1° - Elettrotecnica Generale

Leggi Fondamentali

Definizione	Espressione	Unità di Misura
Legge di Ohm	$R = \frac{V}{I}$	ohm - Ω
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 “ θ ” :

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

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 :

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

angolo φ	Tipo di carico
tra 0 e 90°	Induttivo (RL)
tra 0 e -90°	Capacitivo (RC)

TRIANGOLO delle POTENZE

Definizione	Espressione	U. M.
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

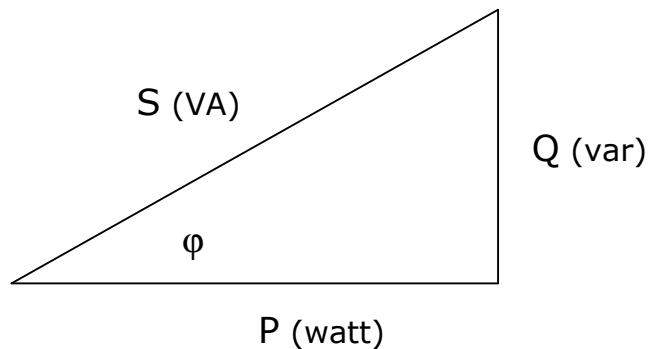


Figura : il Triangolo delle potenze (monofase & trifase)

LEGGE di Ohm – Circuiti Trifasi

Descrizione	Espressione	U.m.
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

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

POTENZA - Circuiti TRIFASI

Definizione	Espressione	U. M.
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

Definizione	Espressione	U. M.
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	$P_{cu} = \alpha^2 P_{cc}$	
Bilancio complessivo delle potenze	$P_1 = P_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}$	
Rendimento Convenzionale	$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}}$	
(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	$R_o = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} I_a}$	Ω
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**

Descrizione	Espressione
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

Descrizione	Espressione
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

Descrizione	Espressione
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	$\mathbf{P_i} = a f B_M^2 \text{Vol}_{fe}$
Perdite per correnti parassite (di Foucault)	$\mathbf{P_{cp}} = b (\delta f B_M)^2$
Note	f = frequenza δ = spessore lamierini

Trasformatore : **CADUTA di TENSIONE**

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

Assoluta	$\Delta V = V_{20} - V_2$ $\Delta V = \sqrt{3} I_2 (R_{2cc} \cos \varphi_2 + X_{2cc} \sin \varphi_2)$
Percentuale	$\Delta V\% = \alpha V_{cc\%} (\cos \varphi_{cc} \cos \varphi_2 + \sin \varphi_{cc} \sin \varphi_2)$
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

Definizione	Espressione	U. M.
Potenza Nominale	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>
Coppia Nominale 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>
Coppia Trasmessa (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>P_m = Perdite meccaniche per attrito e Ventilazione</p> <p>C_m = Coppia persa a causa delle perdite meccaniche</p> <p>C_n = Coppia Nominale (o coppia resa)</p> <p>C_t = 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>$g = 9,8 \text{ m/s}^2$</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.
Potenza Nominale (resa all'asse) : è la potenza indicata sulla targa del motore	P_n	kW
Potenza Assorbita (dalla rete elettrica)	$P_a = \frac{P_n}{\eta}$	kW
	$P_a = \sqrt{3} V_n I_n \cos \varphi$	kW

Rendimento	$\eta = \frac{P_n}{P_a}$	
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 :

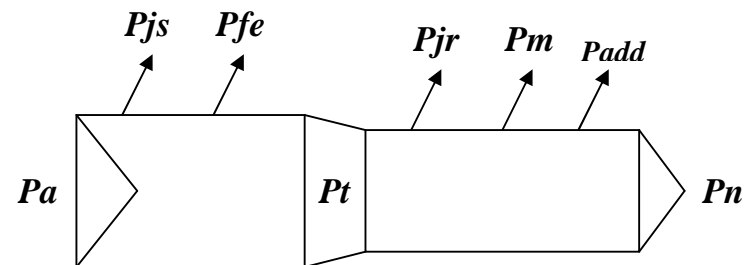
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \qquad n = n_1 - s n_1$$

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} <i>P_{fe} = P isteresi + P correnti parassite</i>
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 (R _s 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 <i>P_m = P attrito + P ventilazione</i>
Perdite Addizionali	$P_{add} = 0,5\% \text{ di } P_n \text{ o } P_t$

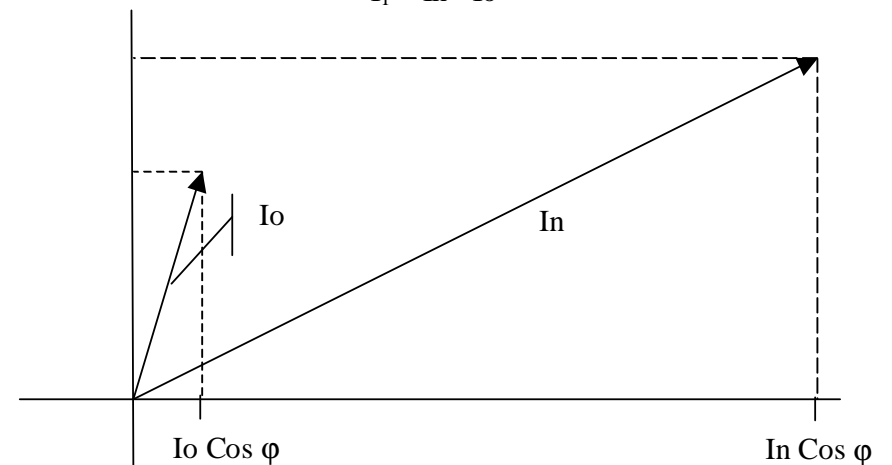
Motore Asincrono : BILANCIO ENERGETICO a VUOTO

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 I₁ 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 _{1a} = Ina – Ioa	I _{1r} = 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_s 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.