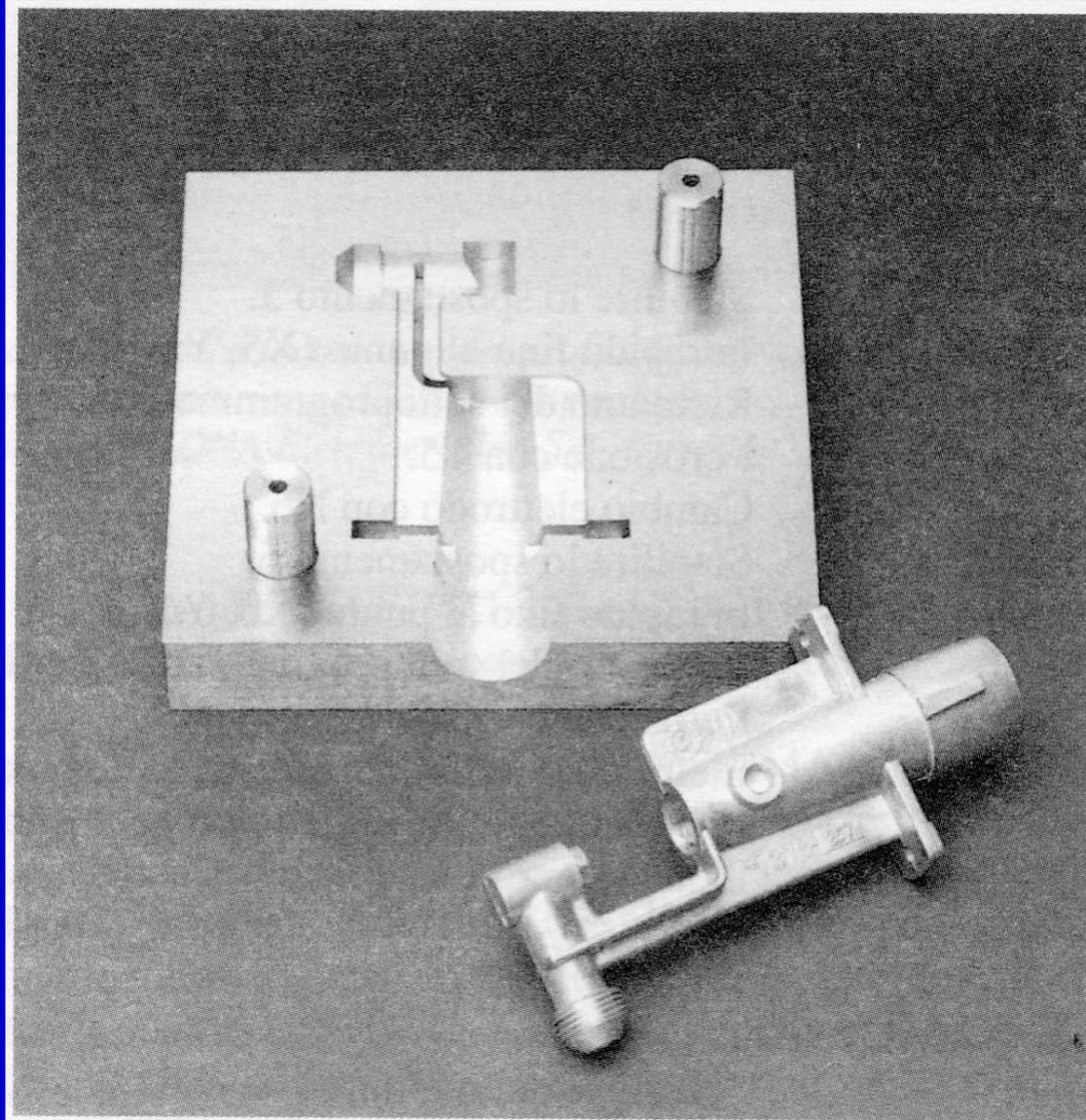


Esercizio di stretching



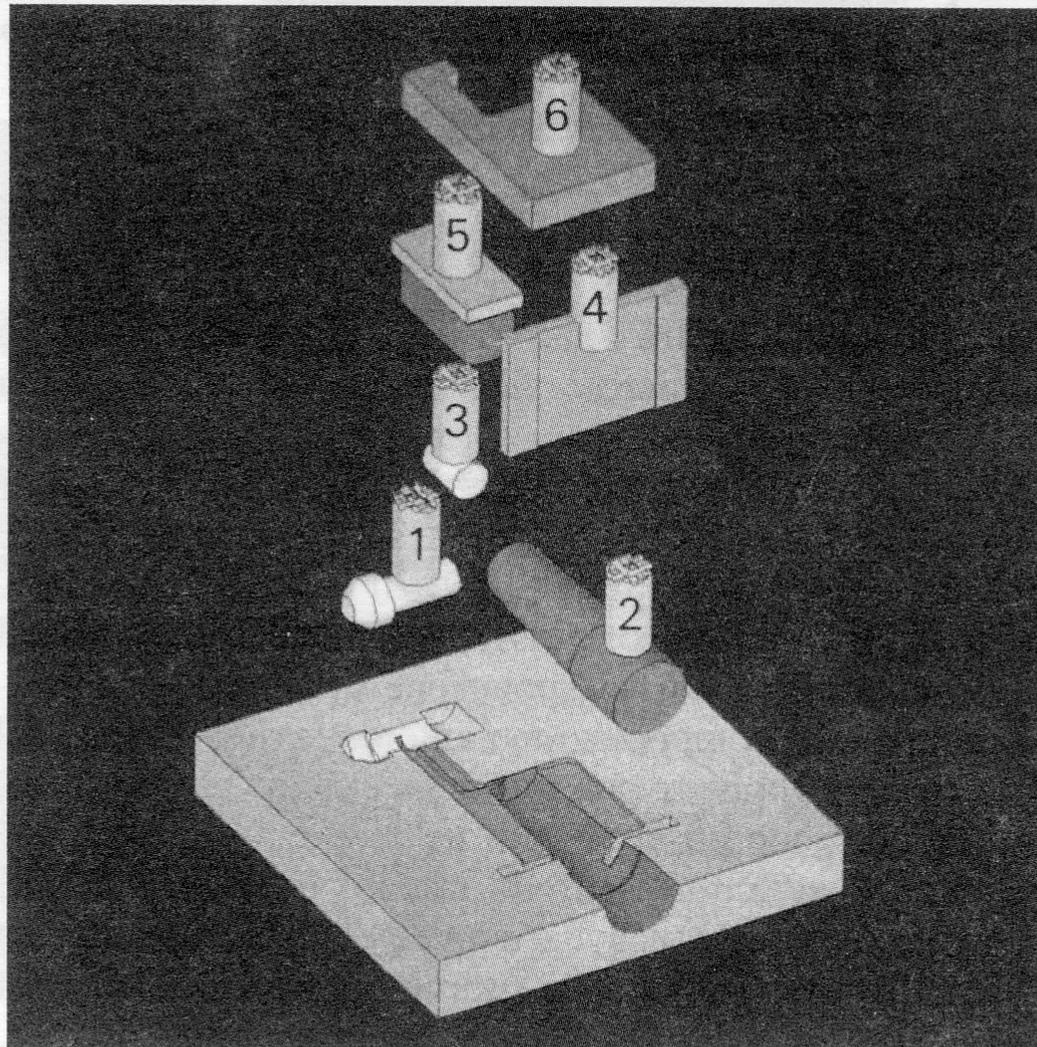


Figura 12.7 - Elettrodi componenti (T1, T2, T3, T4, T5, T6) necessari per la costruzione di uno stampo. (ONA Electroerosion S.A., Durango - Bizkaia, Spagna).

Le macchine per EDM possono funzionare anche in modalità di misura

Il loro funzionamento è simile alla macchina di misura, si avvicinano al pezzo da lavorare, viene imposta una bassa ddp, quando passa corrente interrompo il moto degli assi e rilevo la misura

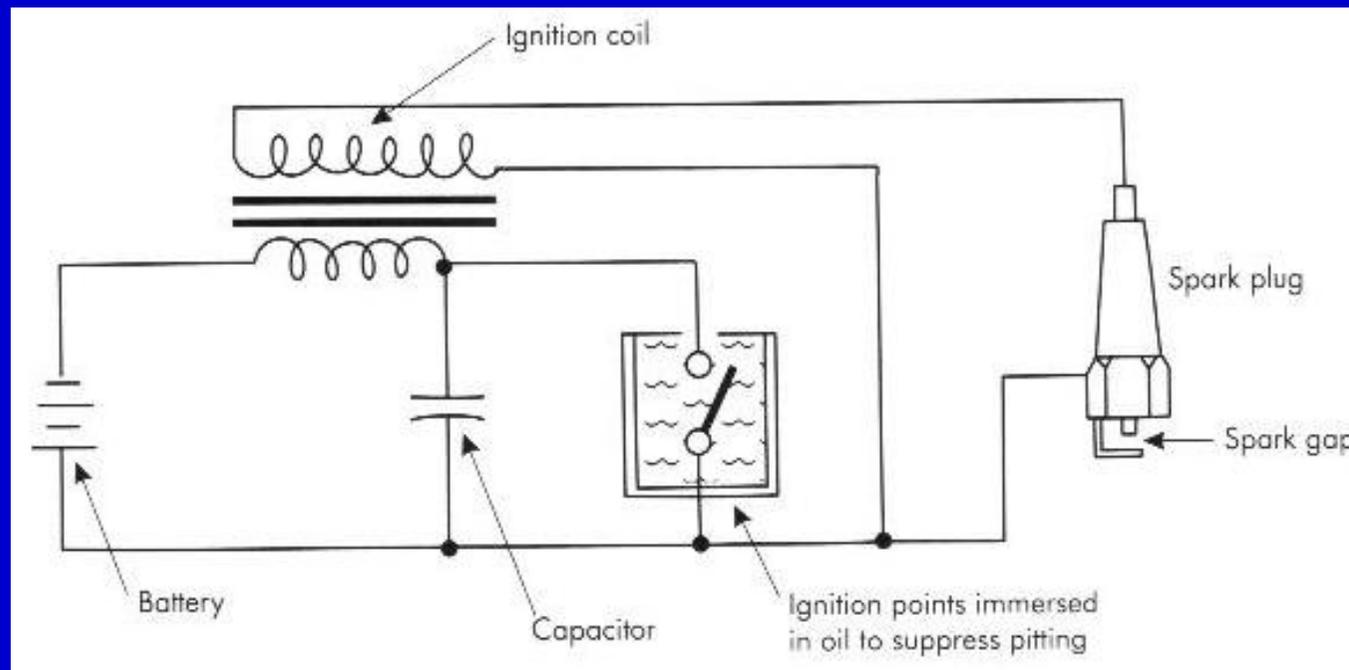
I circuiti di controllo delle scintille nelle macchine per EDM

History of EDM

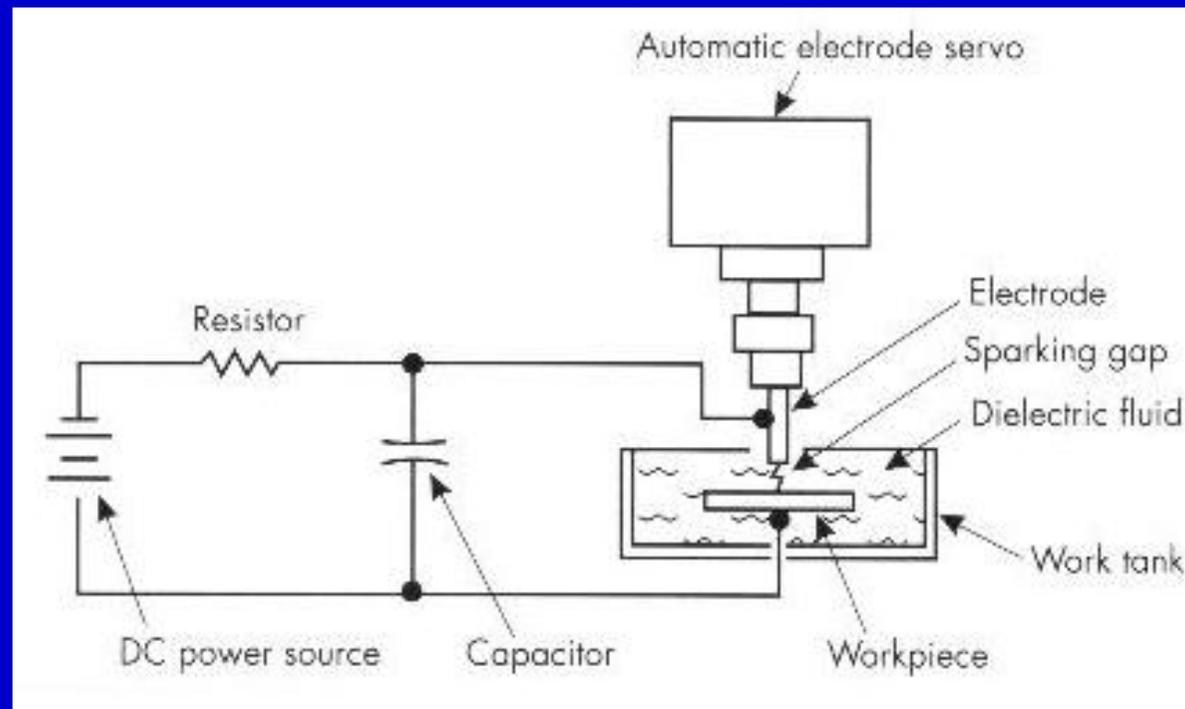
- 1770 English scientist Priestley observes erosive effects of electrical discharges.
- Ca. 1910 Potential for manufacturing process realized.
- 1943 Lazarenko brothers perfect process of spark erosion (Lazarenko Circuit).
- 1950's EDM's appear in American Industry

EDM in the U.S.S.R.

- In 1941, Dr. Boris Lazarenko and Dr. Natalya Lazarenko were assigned to experiment with methods to preserve the life of tungsten electrical contacts in automotive-engine, distributor-breaker points. The experimentation was relatively unsuccessful, however resulted in further experimentation with spark erosion.



- The Lazarenkos continued experimentation with tungsten and spark erosion, eventually developing a spark-machining process in 1943. This system's process became known as a resistor-capacitor (RC) circuit for obvious reasons. The Lazarenko EDM became the basis for machines all over the world and the R-C process is still used today.



Lazarenko

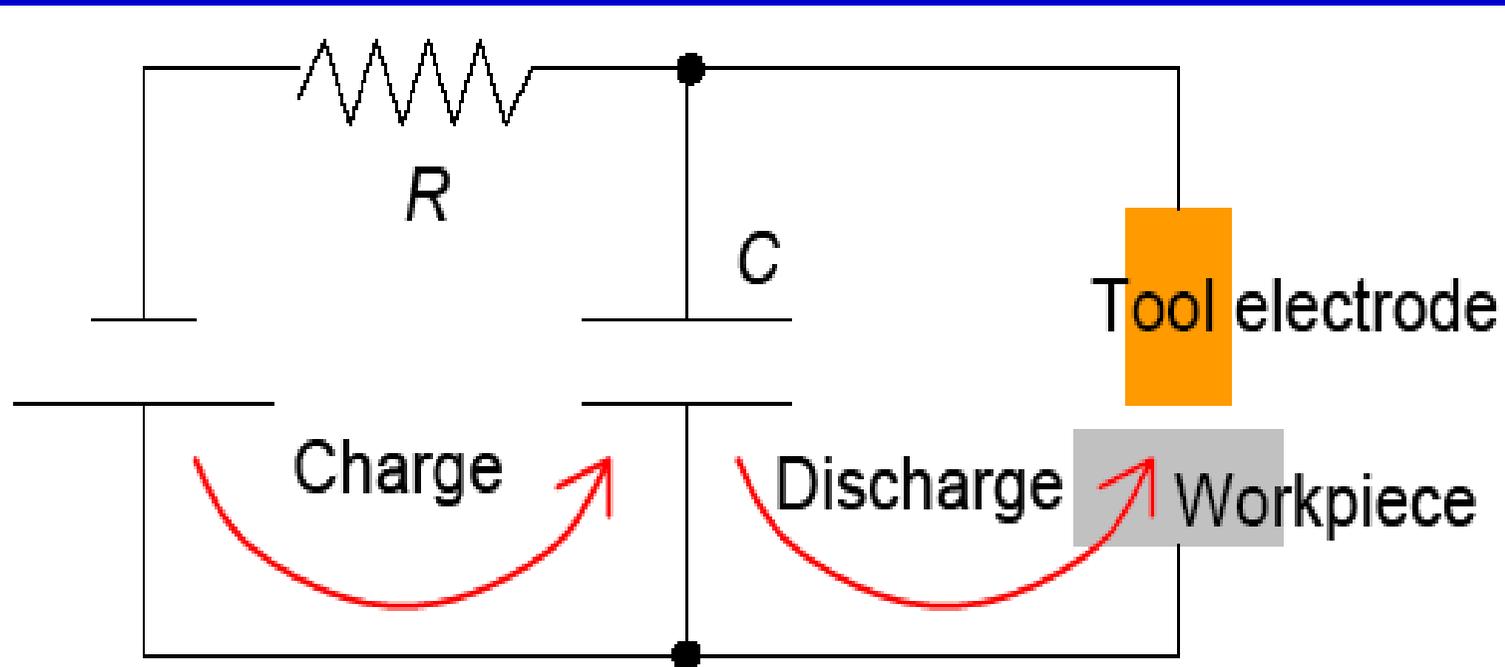
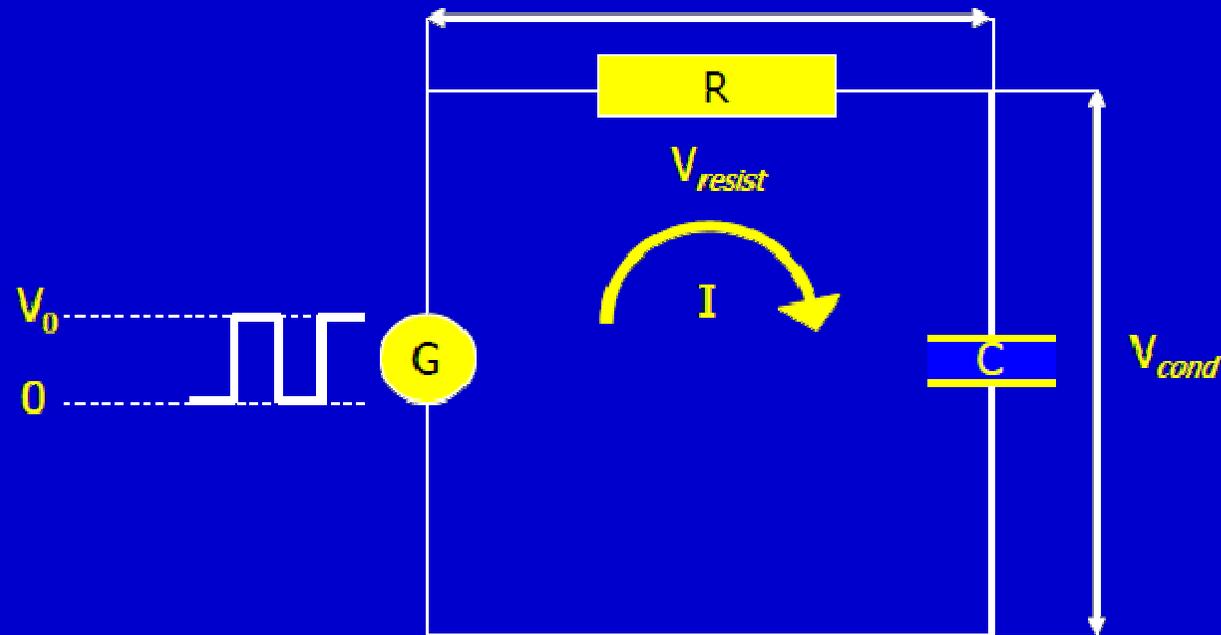


Figure 4: Relaxation type pulse generator.

Circuito RC con onda quadra



↗ Fase di carica

$$V_{cond}(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \frac{Q_0}{C} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \frac{Q(t)}{C}$$

$$V_{resist}(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = RI_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = RI(t)$$

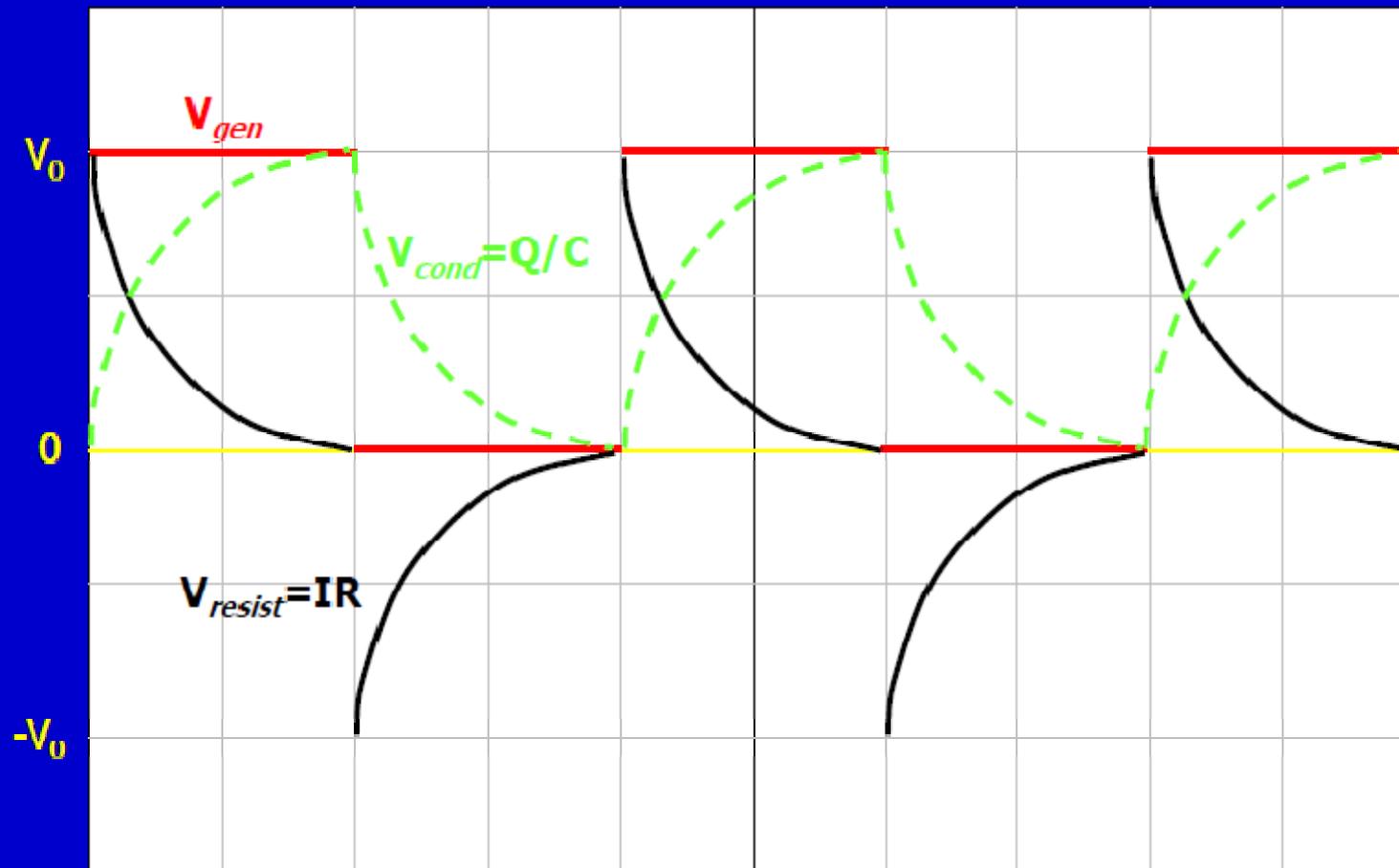
$$\tau = RC$$

↘ Fase di scarica

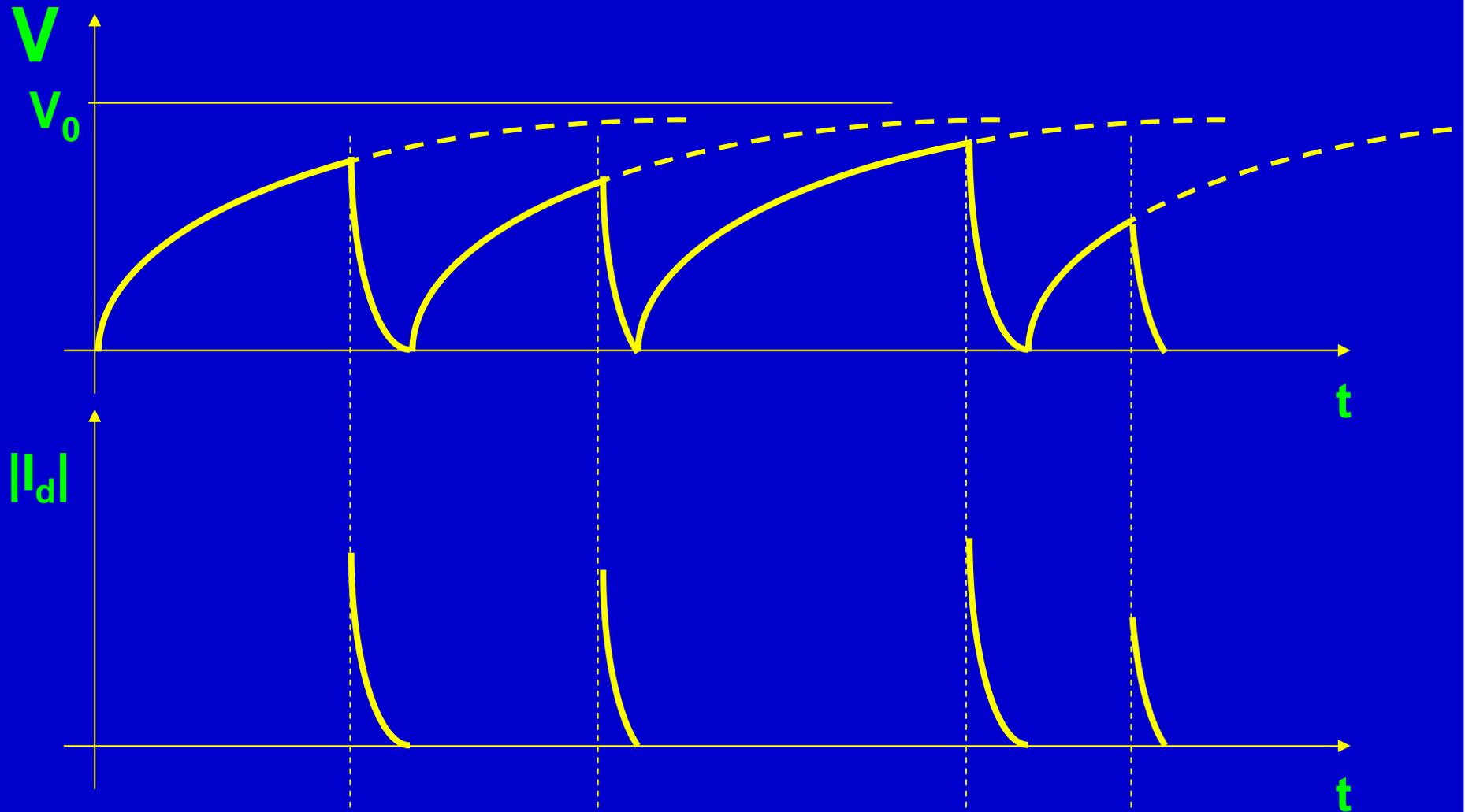
$$V_{cond}(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{Q_0}{C} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{Q(t)}{C}$$

$$V_{resist}(t) = -V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = -RI_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = -RI(t)$$

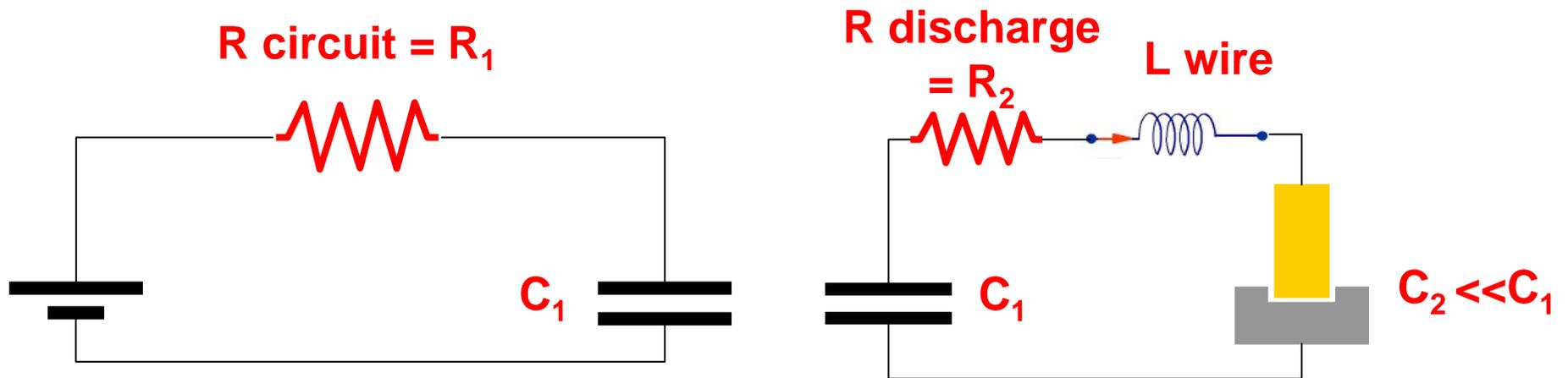
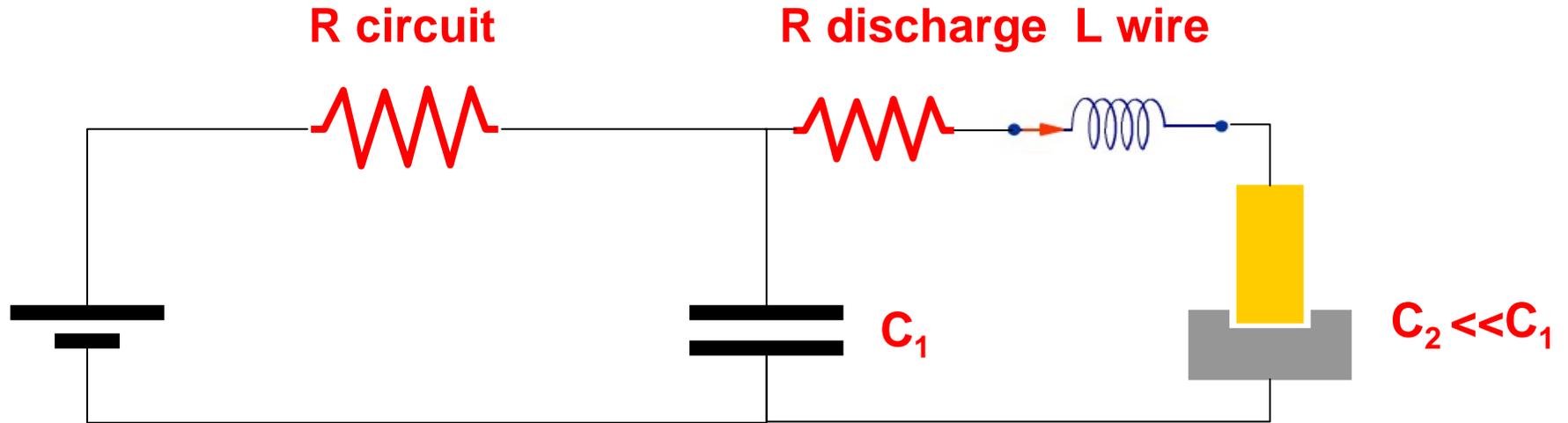
Andamenti della tensione e della corrente in un circuito RC



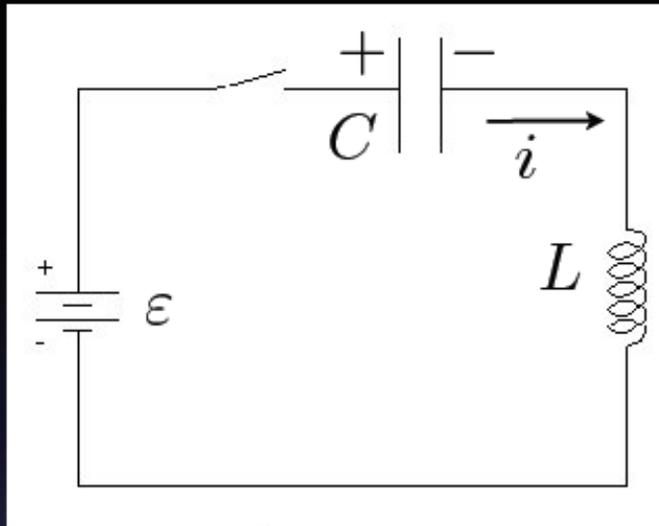
Generatore ad impulsi a rilassamento



Circuiti reali (1)



Circuito LC con generatore di fem costante



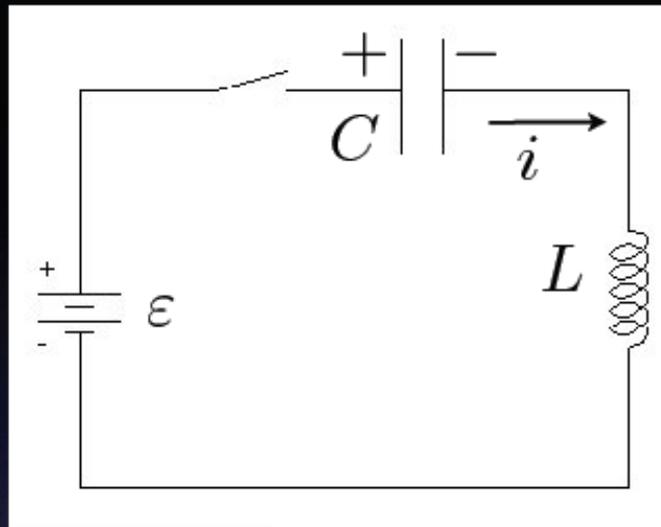
Conservazione della carica elettrica:

$$\frac{dQ}{dt} = i$$

Applicando la seconda legge di Kirchhoff

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{Q}{C} = \varepsilon$$

Circuito LC con generatore di fem costante



Conservazione della carica elettrica:

$$\frac{dQ}{dt} = i$$

Applicando la seconda legge di Kirchhoff

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{Q}{C} = \varepsilon$$

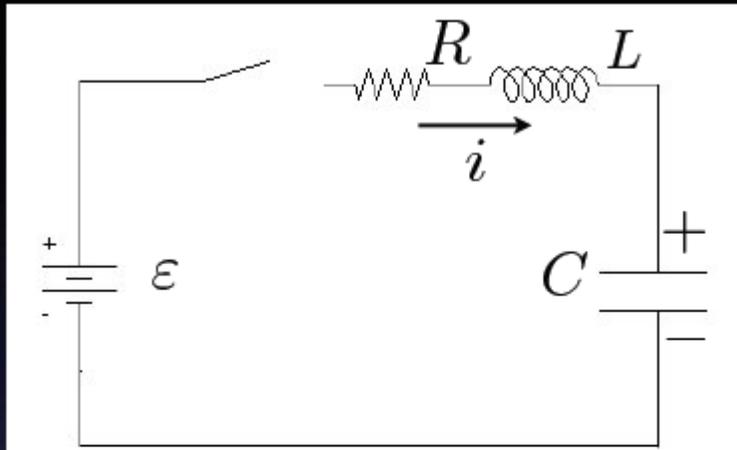
Questa equazione è formalmente identica a quella dell'oscillatore meccanico posto in un campo di forze costante (molla appesa in verticale):

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + kz = mg$$

la frequenza delle oscillazioni resta invariata, ma cambia la configurazione di equilibrio:

$$Q_{eq} = \varepsilon C$$

Caso generale di oscillatore smorzato: circuito RLC

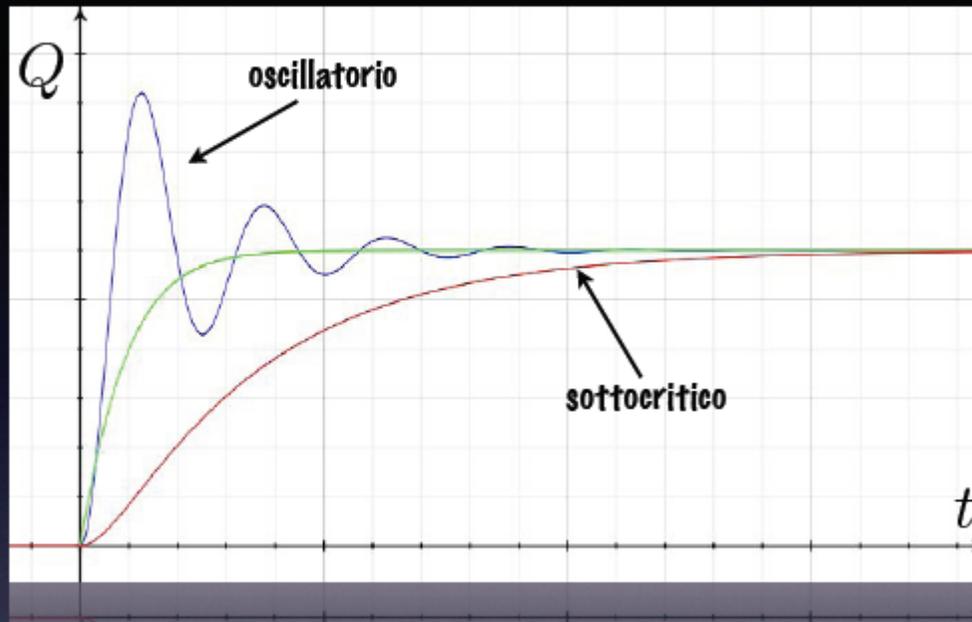


$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = \varepsilon$$

in funzione del valore dello smorzamento si individuano tre casi:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{L}{R^2 C} < \frac{1}{4} & \text{sottocritico} \\ \frac{L}{R^2 C} = \frac{1}{4} & \text{critico} \\ \frac{L}{R^2 C} > \frac{1}{4} & \text{oscillatorio} \end{array} \right.$$

Caso generale di oscillatore smorzato: circuito RLC



Solo nel terzo caso si hanno oscillazioni:

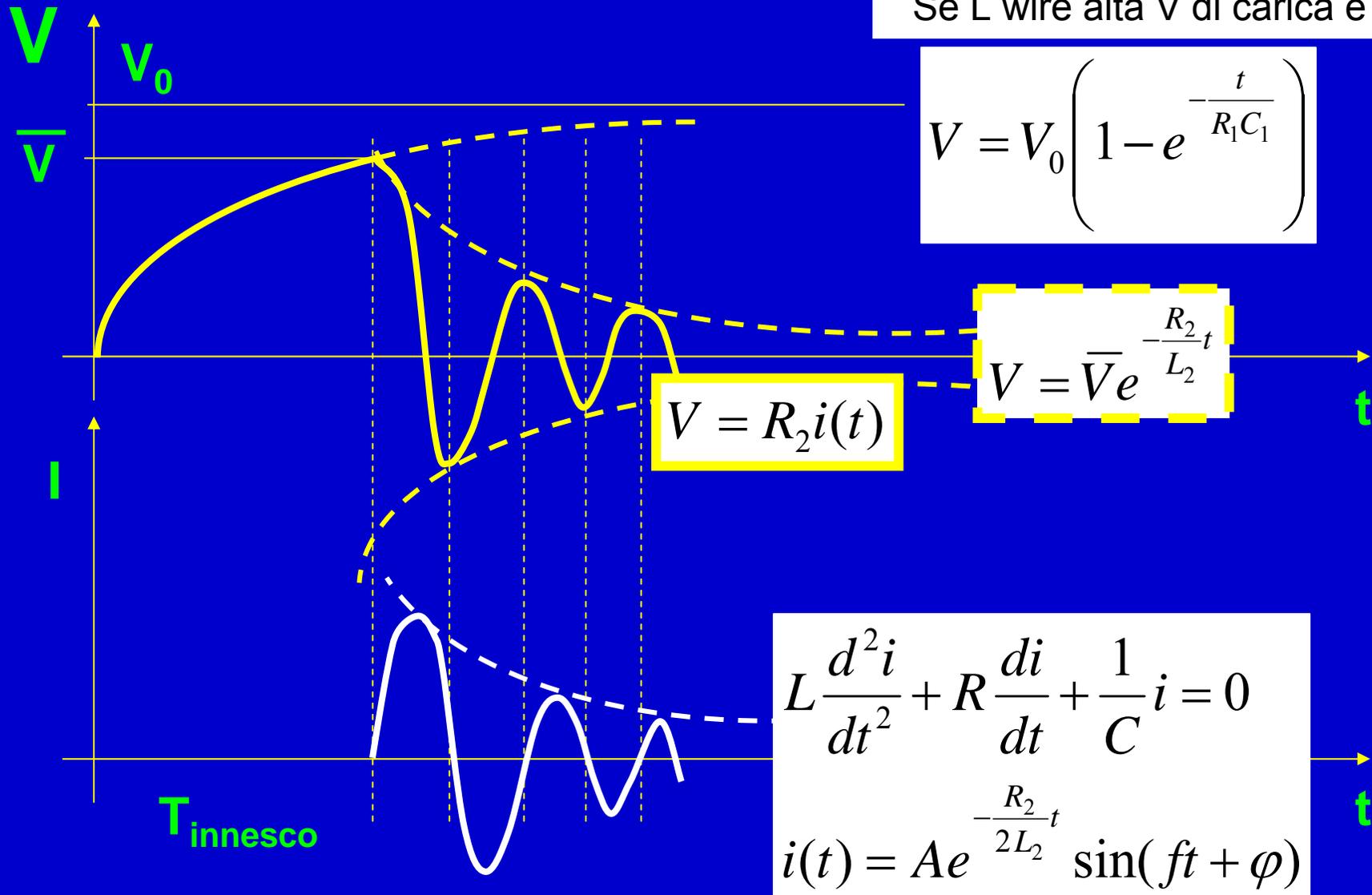
$$\frac{L}{R^2 C} > \frac{1}{4}$$

La soluzione generale dell'equazione omogenea (generatore assente) nel caso oscillatorio è:

$$Q = Ae^{-\frac{R}{2L}t} \cos(\omega' t + \varphi) \quad \omega'^2 = \frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2$$

La pulsazione del circuito smorzato è diversa da quella del caso non smorzato! Vi si riduce nel caso di $R=0$

Diagrammi della tensione e della corrente



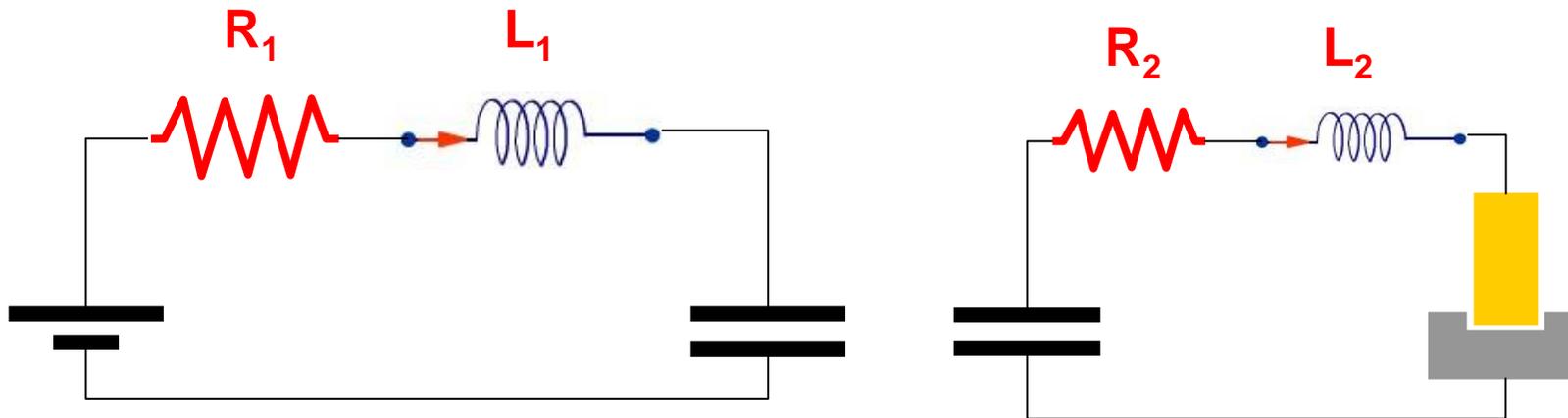
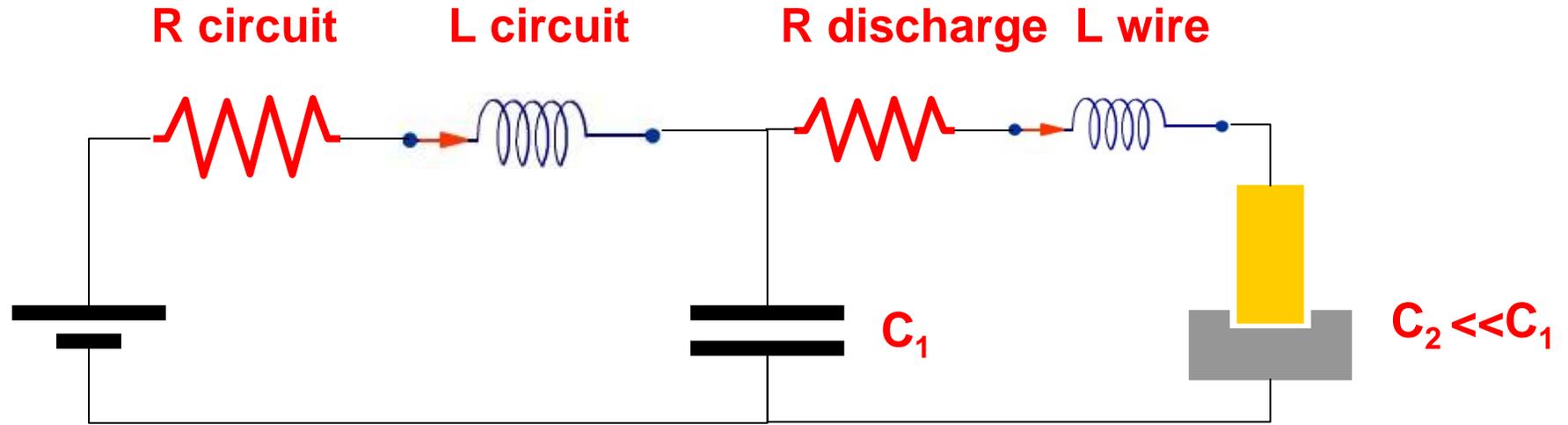
Considerazioni

- \overline{V} dipende dal gap
- Energia disponibile
 $U = \frac{1}{2} C_1 \overline{V}^2$ con \overline{V} tensione di scarica
- Il circuito $C_1 R_2 L_2$ è un RCL oscillante con frequenza

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} - \frac{R_2^2}{4L_2}}$$

La corrente è oscillante e quindi pezzo ed utensile sono alternativamente positivi e negativi, passo da sgrossatura a finitura e così via. Non posso giocare sulla polarità.

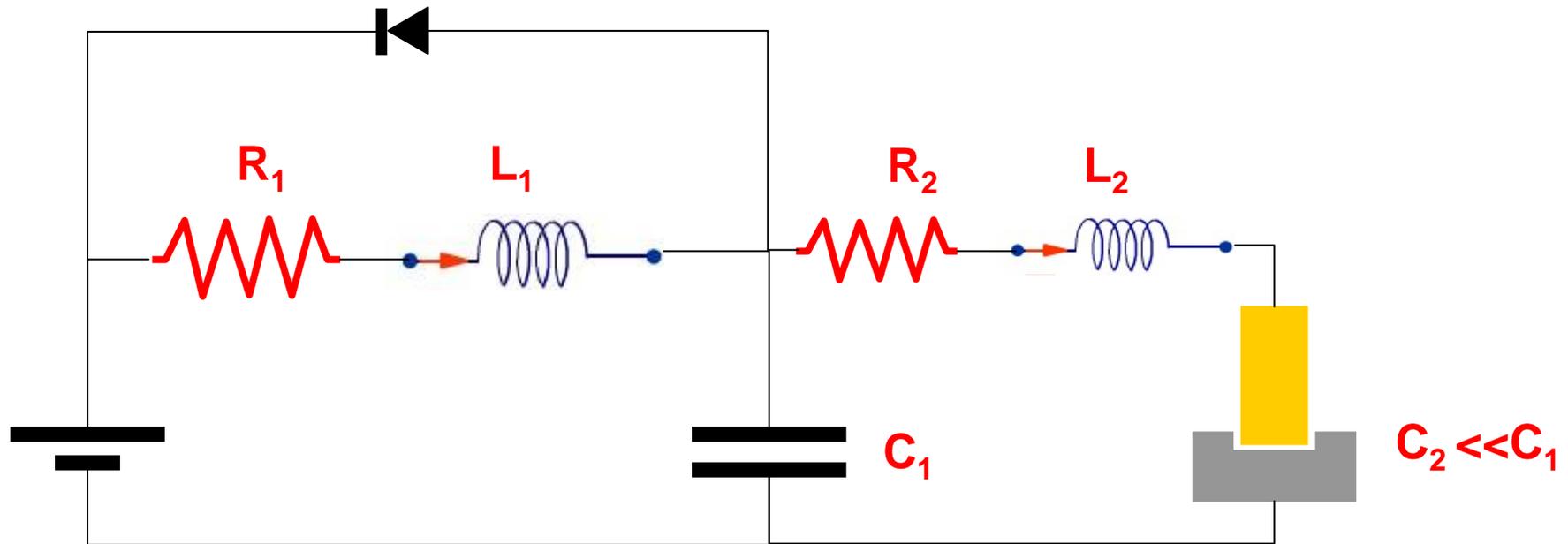
Circuiti reali (2)



Conseguenze all'introduzione di L_1

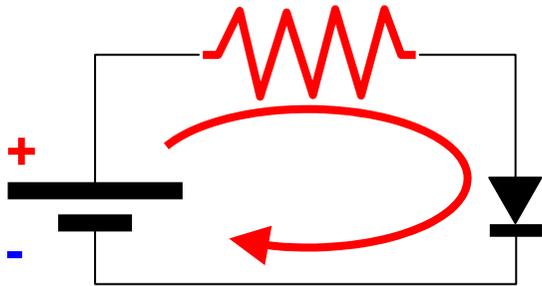
- Anche la prima maglia è oscillante. La tensione non varia più come prima, ma quando V raggiunge V_0 passa ancora corrente perché L_1 si oppone alla variazione di i . Così si raggiunge $2V_0$ sul condensatore e i smette di circolare.
- In questo modo anche se ci sono piccole variazioni della tensione di innesco ho piccole variazioni del T di innesco, ma V cresce molto c'è maggiore possibilità di avere scariche con energia diversa tra loro che causerebbe problemi es. sulla finitura superficiale disomogenea.

Circuiti reali (2)

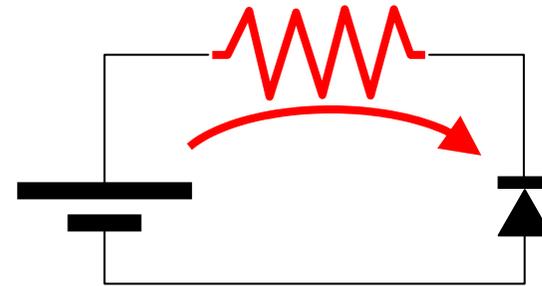


Quando $V < V_0$ il diodo è come se fosse un circuito aperto, quando V supera V_0 il diodo entra in conduzione e mantiene V su C_1 al valore V_0

Come funziona un diodo



Il diodo si comporta come una piccola resistenza. La corrente è elevata.

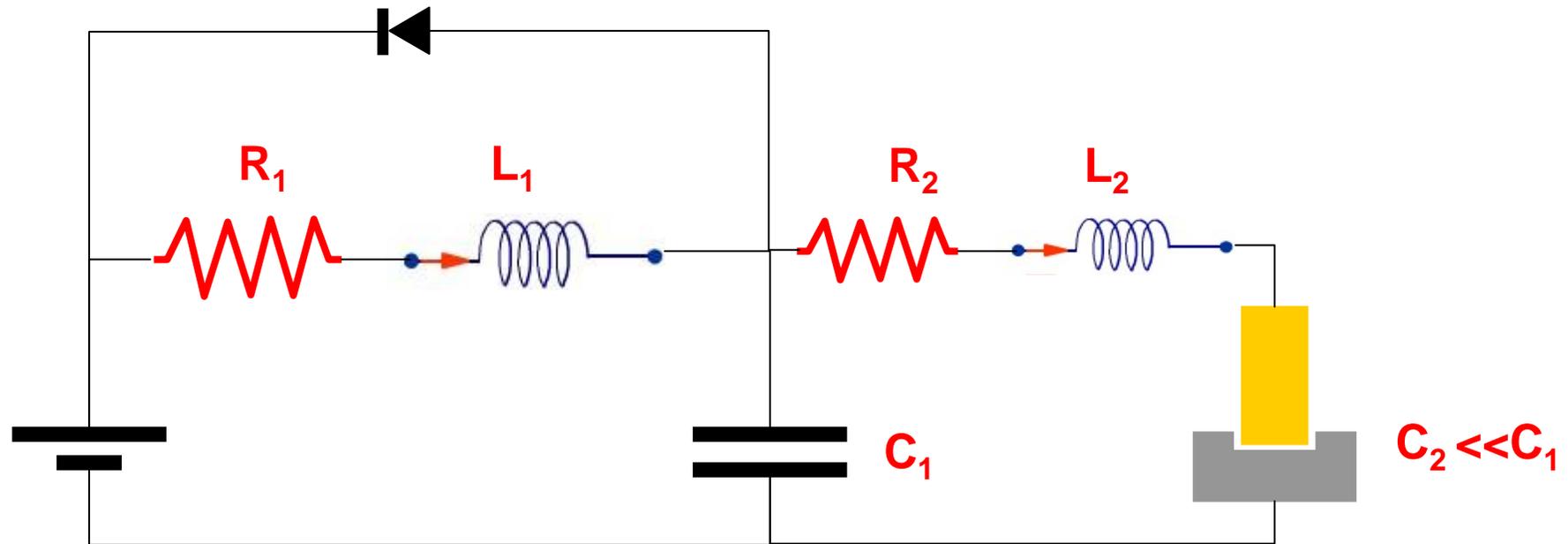


Il diodo si comporta come un interruttore aperto. Non c'è passaggio di corrente.

Il diodo è un componente elettronico passivo non lineare a due terminali (bipolo), la cui funzione ideale è quella di permettere il flusso di corrente elettrica in una direzione e di bloccarla nell'altra, la qual cosa viene realizzata ponendo dei vincoli alla libertà di movimento e di direzione dei portatori di carica.

Il simbolo circuitale del diodo esprime chiaramente questa funzione: il triangolo indica la direzione che permette il flusso di corrente elettrica considerato convenzionalmente dal polo positivo a quello negativo, mentre la sbarra ne indica il blocco.

Circuiti reali (2)



Quando $V < V_0$ il diodo è come se fosse un circuito aperto, quando V supera V_0 il diodo entra in conduzione e mantiene V su C_1 al valore V_0

Conseguenze dell'impiego del diodo

- Limitare la tensione ad un valore stabilito regola la potenza di ogni scarica ed in particolare se nel circuito di Lazarenko o con L1 senza diodo ho $V = V + 20\%V$ risulta che essendo $W = 1/2 * C(1,2V)^2$
- $W = 1/2 * 1,44 * CV^2$ ovvero $W = W + 44\%W$
- Scariche fortemente disomogenee

→ soluzione: interruttori elettronici

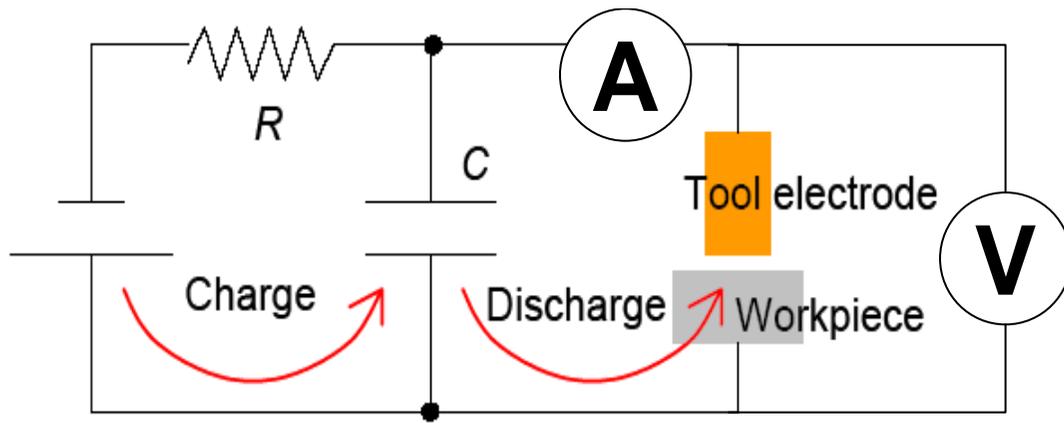
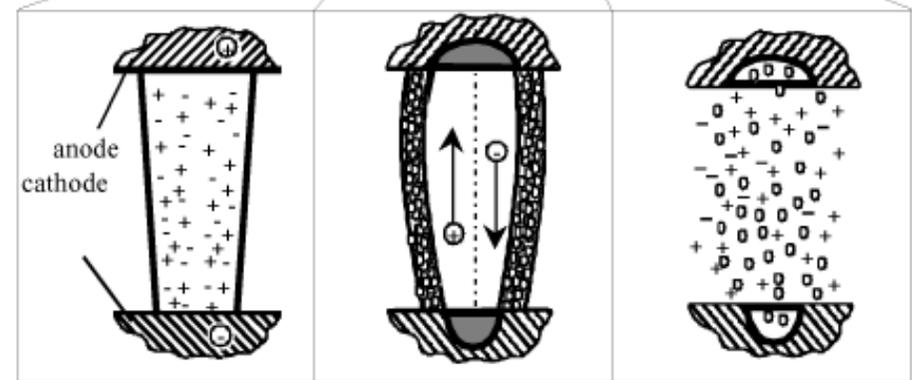
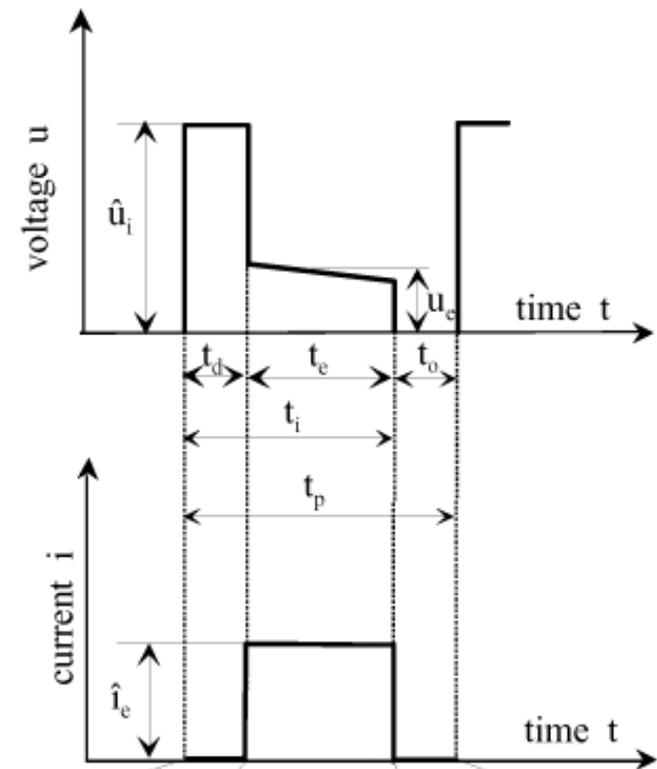


Figure 4: Relaxation type pulse generator.



Ignition phase +
Plasma channel
formation

Phase of discharge

End of pulse

Figure 2. The phases of an electric discharge in EDM (König and Klocke, 1997).

$U_i =$ tensione a vuoto

$U_e =$ tensione di scarica,
è la caduta sulla R_2

$I_e =$ corrente di scarica

$$W = U_e I_e t_e$$

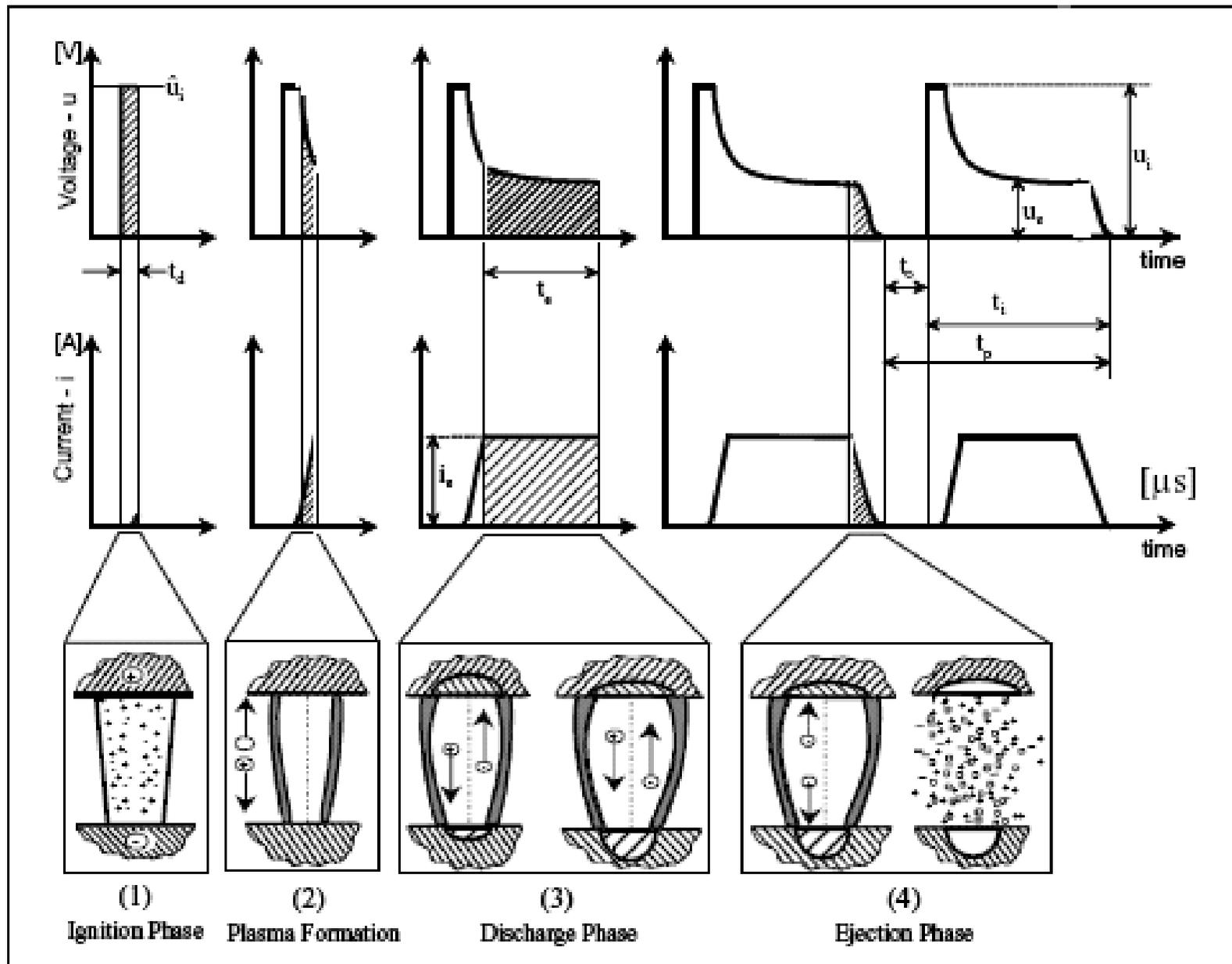


Figure 2. The phases of an electrical discharge in EDM (König & Klocke, 1997).

TENSIONE

t_p = periodo

t_i = impulso

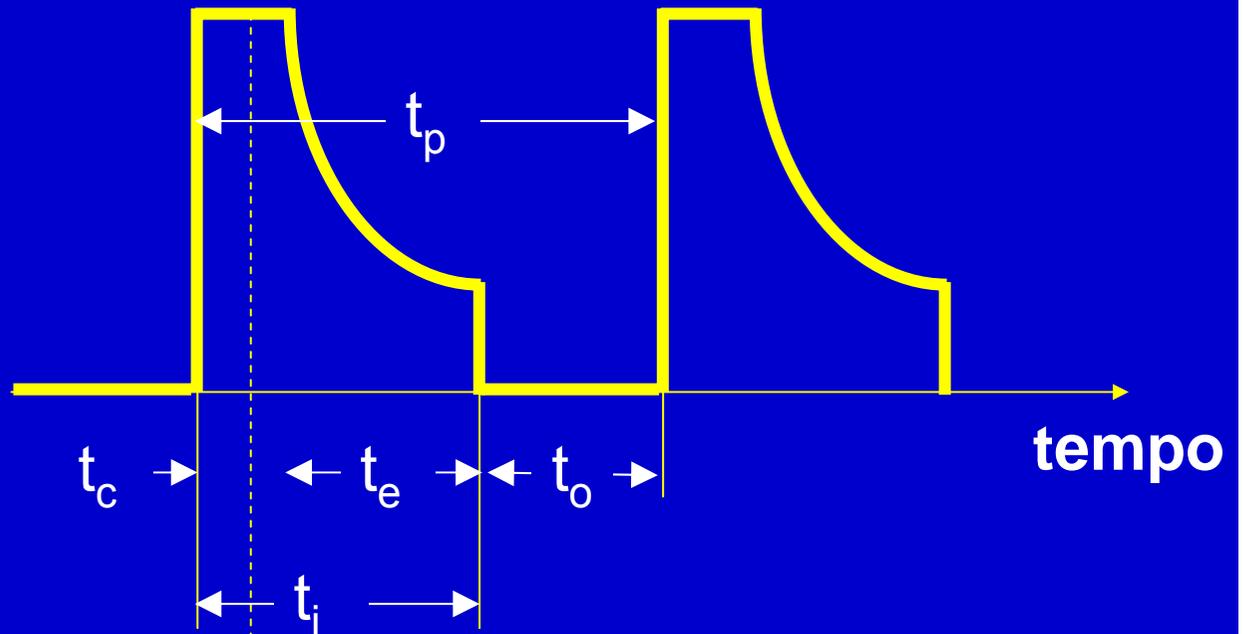
t_c = ritardo iniziale

t_e = scarica

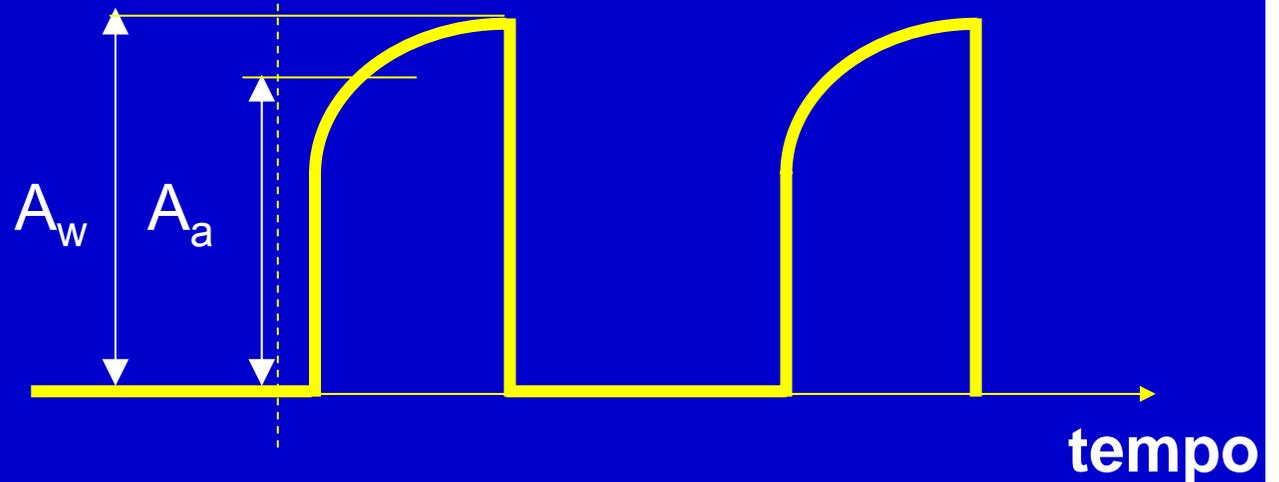
t_o = intervallo

A_w = amperaggio di esercizio

A_a = amperaggio medio



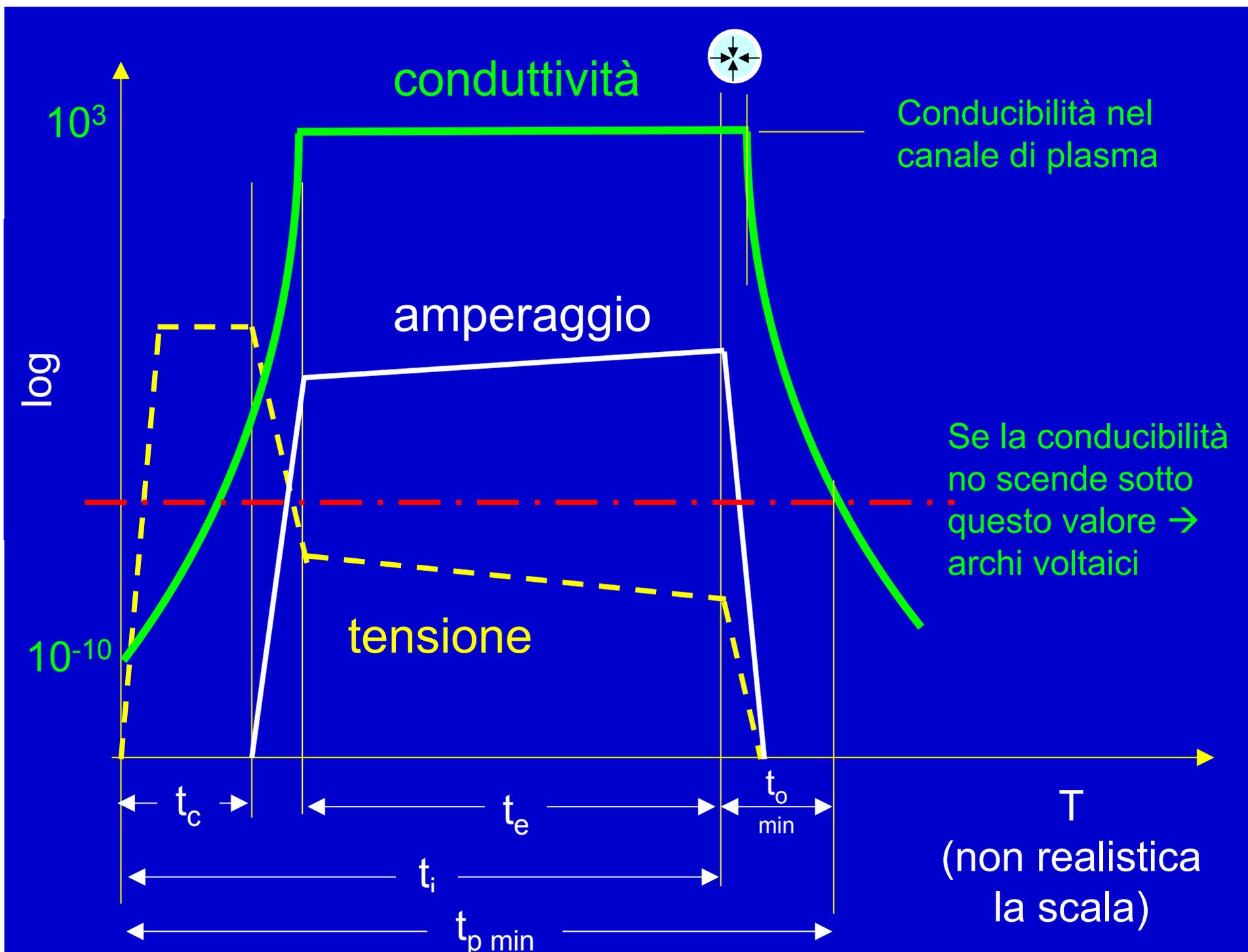
CORRENTE



Ordini di grandezza

- t_p = alcuni millisecondi
- t_o = alcuni **microsecondi** (5-25 μ s)
- $t_d \approx t_o$
- t_i = alcuni millisecondi

- A = 20-100A
- V = 20-100V (casi limite 300V)



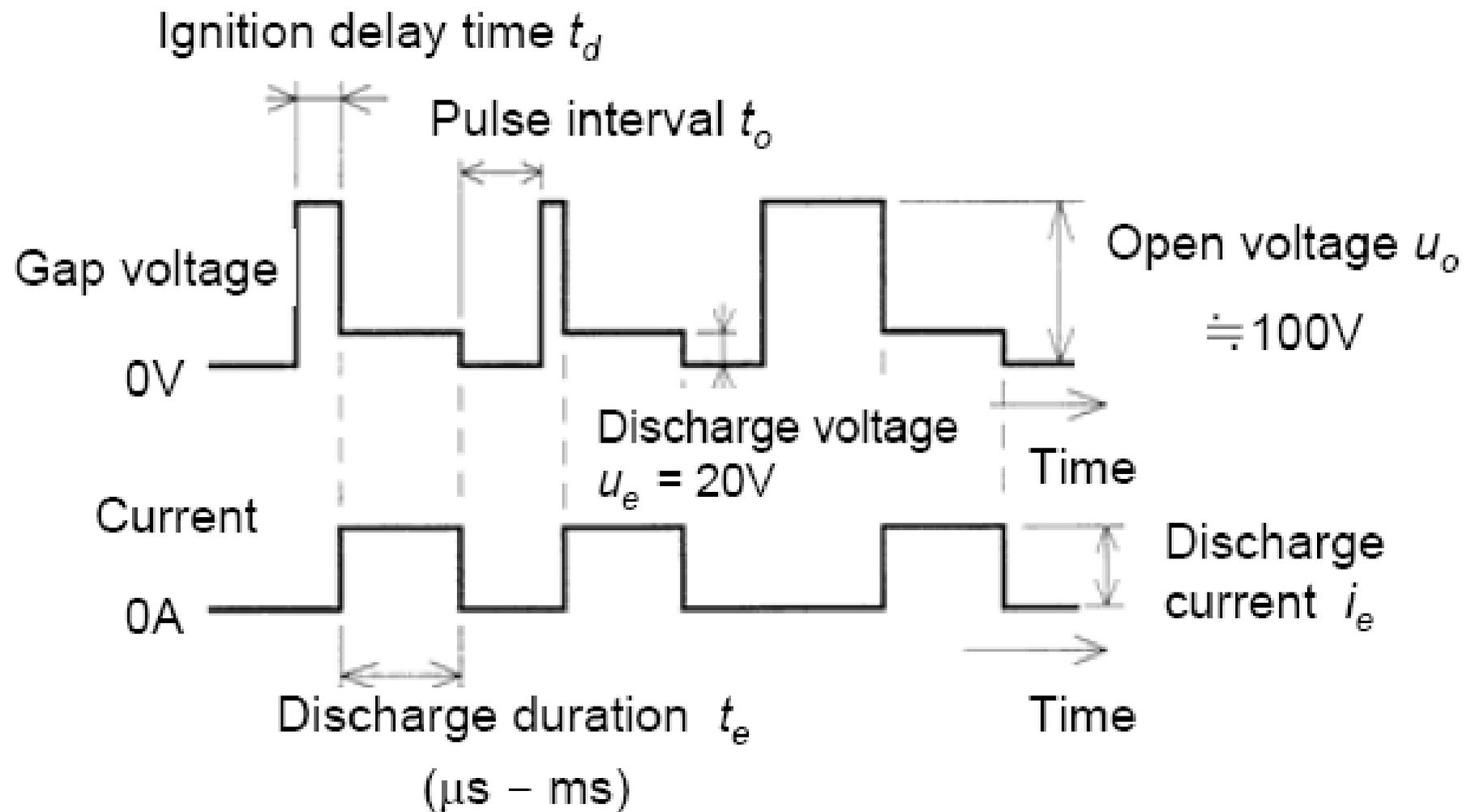


Figure 6: Gap voltage and current waveforms.

Attenzione: controllo diretto sul t_e !!

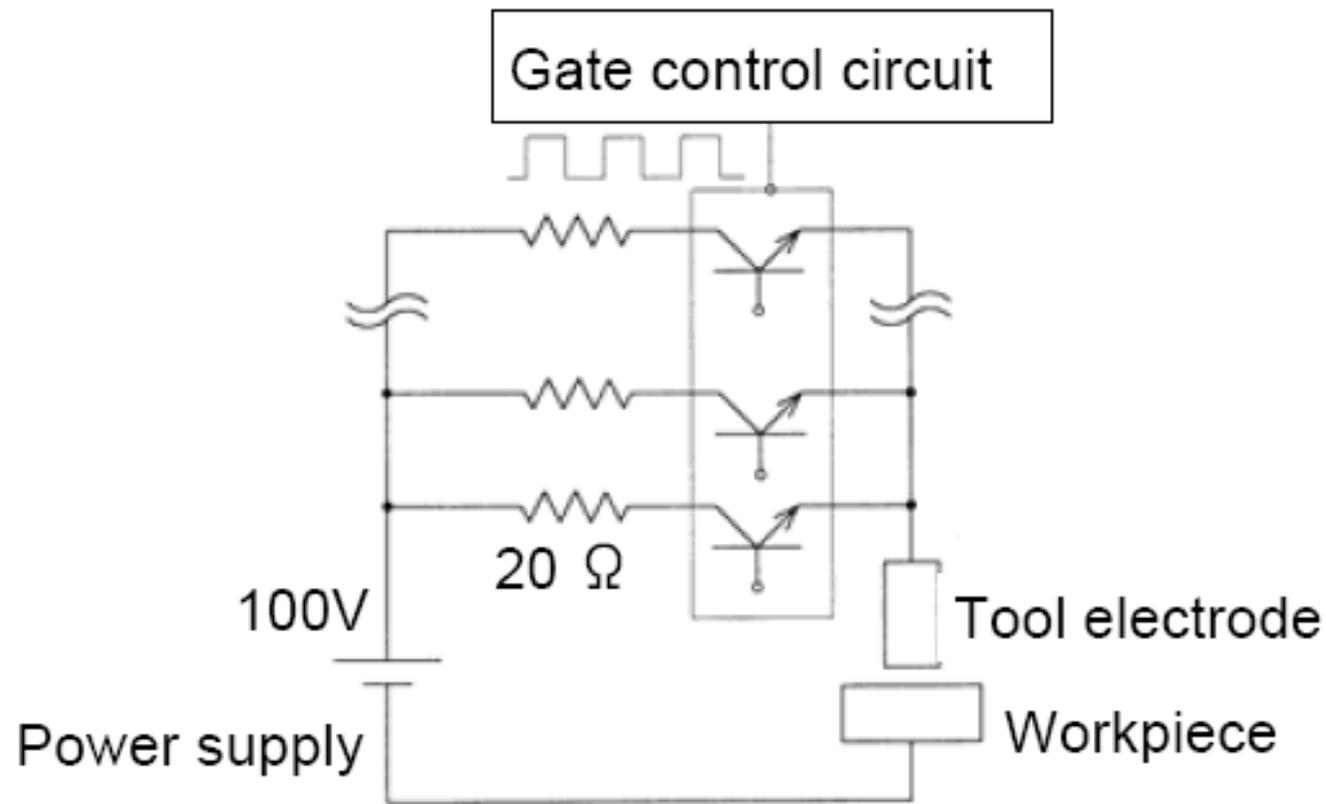


Figure 5: Transistor type pulse generator.

Figure 6 shows voltage and current waveforms measured at the gap, which are typical in sinking EDM operations. When the transistors are switched on, the open voltage u_0 , 100V in the case of Figure 5, is applied between the tool electrode and workpiece, but discharge does not occur immediately but occurs after the ignition delay time, t_d . This is because dielectric breakdown “physically” needs a statistical time lag in which initial electrons are accelerated to generate the electron avalanche

Come avviene il controllo

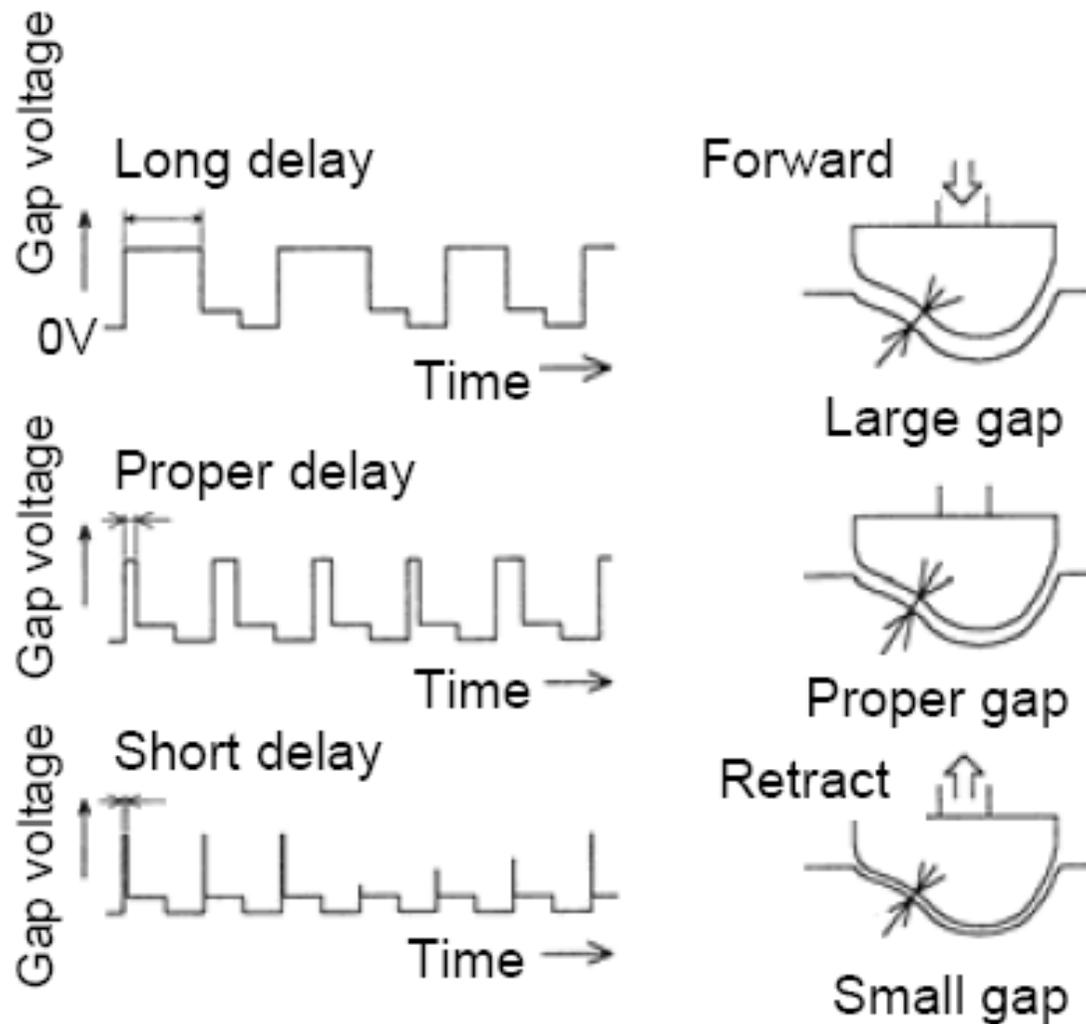


Figure 7: Principle of servo feed control.

Polarità

- Sgrossatura si lavora con Utensile + pezzo-
- Finitura Elettrodo - Pezzo +, lavoro solo nella prima parte della scarica dove ho un bombardament prevalentemente di elettroni. L'MRR diminuisce drasticamente ma migliora la finitura superficiale

Gap tensione e MRR

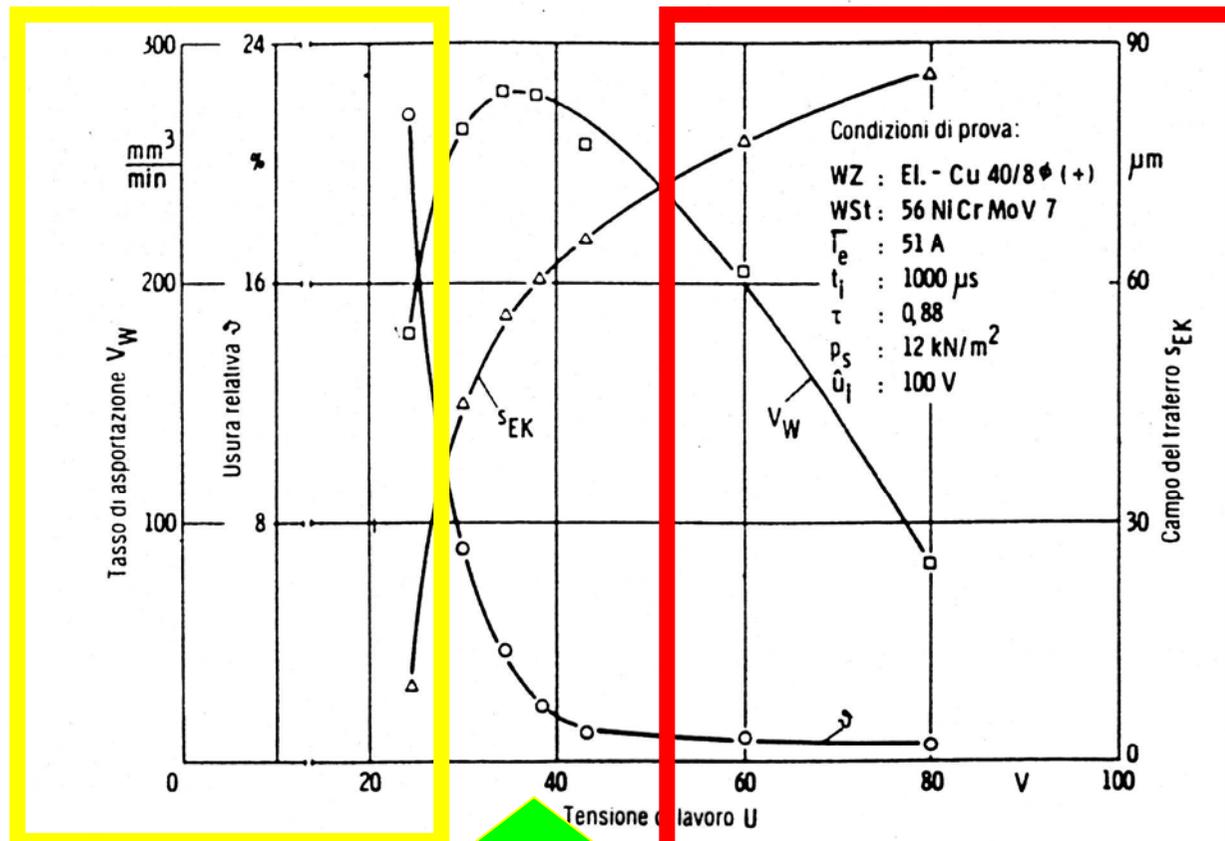


Fig. 2-17 - Tasso di asportazione, usura relativa e campo del traferro in funzione della tensione di lavoro. WZ = utensile, WSt = pezzo.

V troppo bassa

Gap piccolo

Cortocircuiti e scariche non corrette

MRR basso

Usura Utensile elevata

Osservate la caduta dell'usura%
La salita dell'MRR

Aumenta la Tensione
Aumenta il traferro e così i tempi di ritardo e precipita l'MRR

Corrente di scarica vs MRR e Tool wear

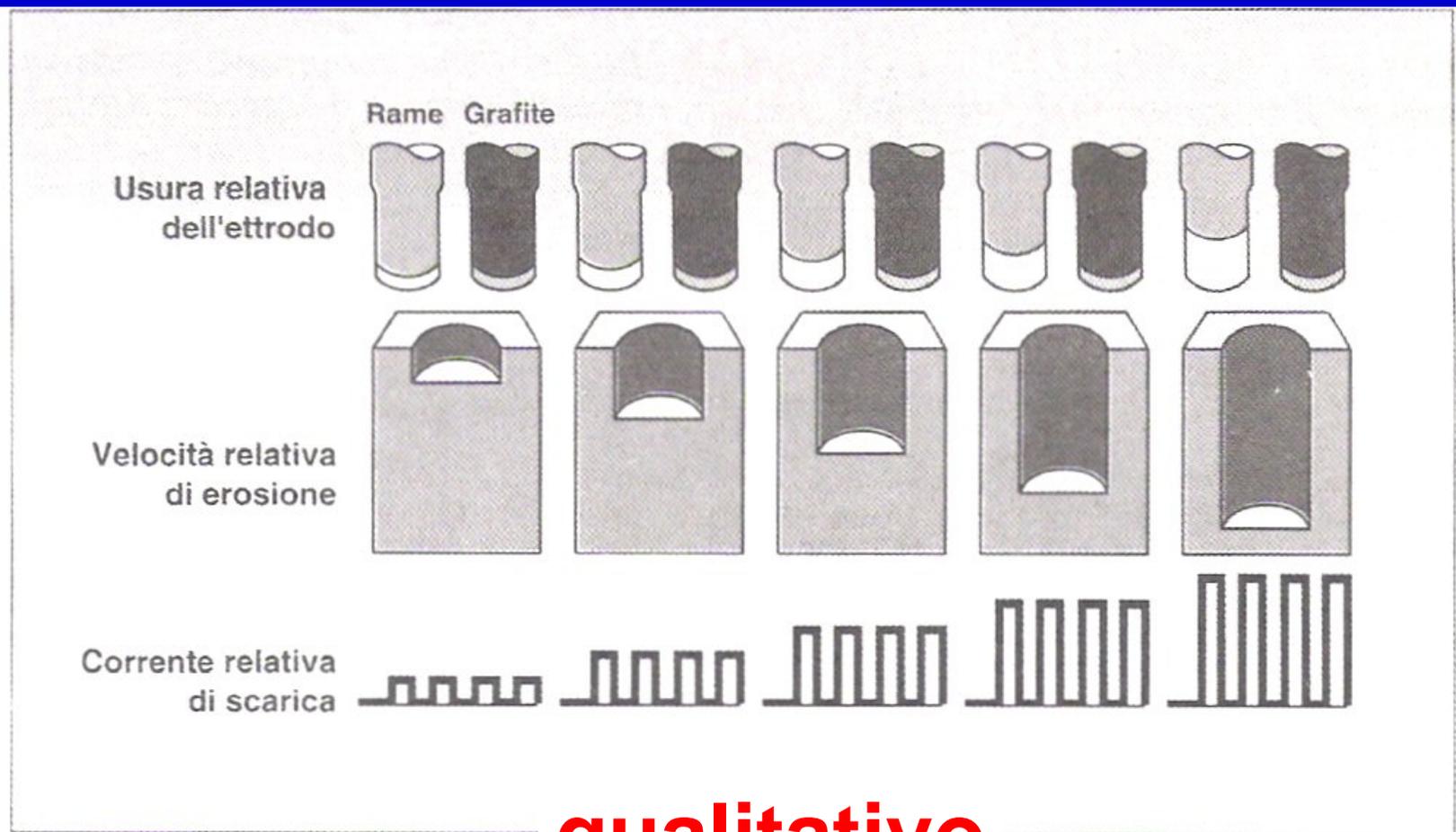


Figura 13.25 - Rapporto tra corrente di scarica, velocità di erosione e usura dell'elettrodo utensile. All'aumentare della corrente corrisponde un'accelerazione della velocità di erosione e, con gli elettrodi in rame, un aumento dell'usura dell'elettrodo utensile. Con gli elettrodi in grafite, l'usura è più contenuta.

Corrente di scarica vs MRR e Tool wear

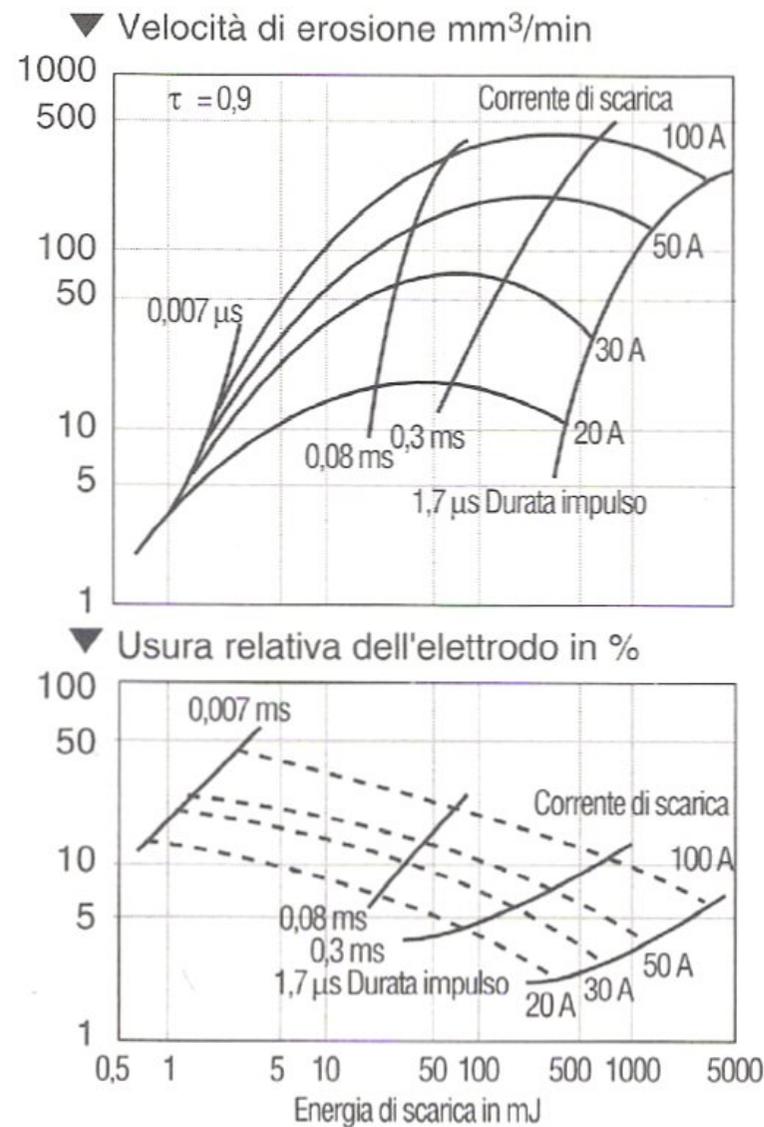


Figura 13.26 - I due grafici evidenziano la variazione della velocità di erosione e dell'usura dell'elettrodo utensile in funzione dell'energia di scarica. Una corrente di scarica maggiore determina una maggiore velocità di erosione, mentre a ogni livello di corrente vi è una particolare energia a cui corrisponde la più alta velocità di erosione. Un più elevato amperaggio determina una più rapida usura dell'elettrodo utensile, ma questo diminuisce al crescere dell'energia di scarica.

quantitativo

T-ON vs MRR e Tool wear

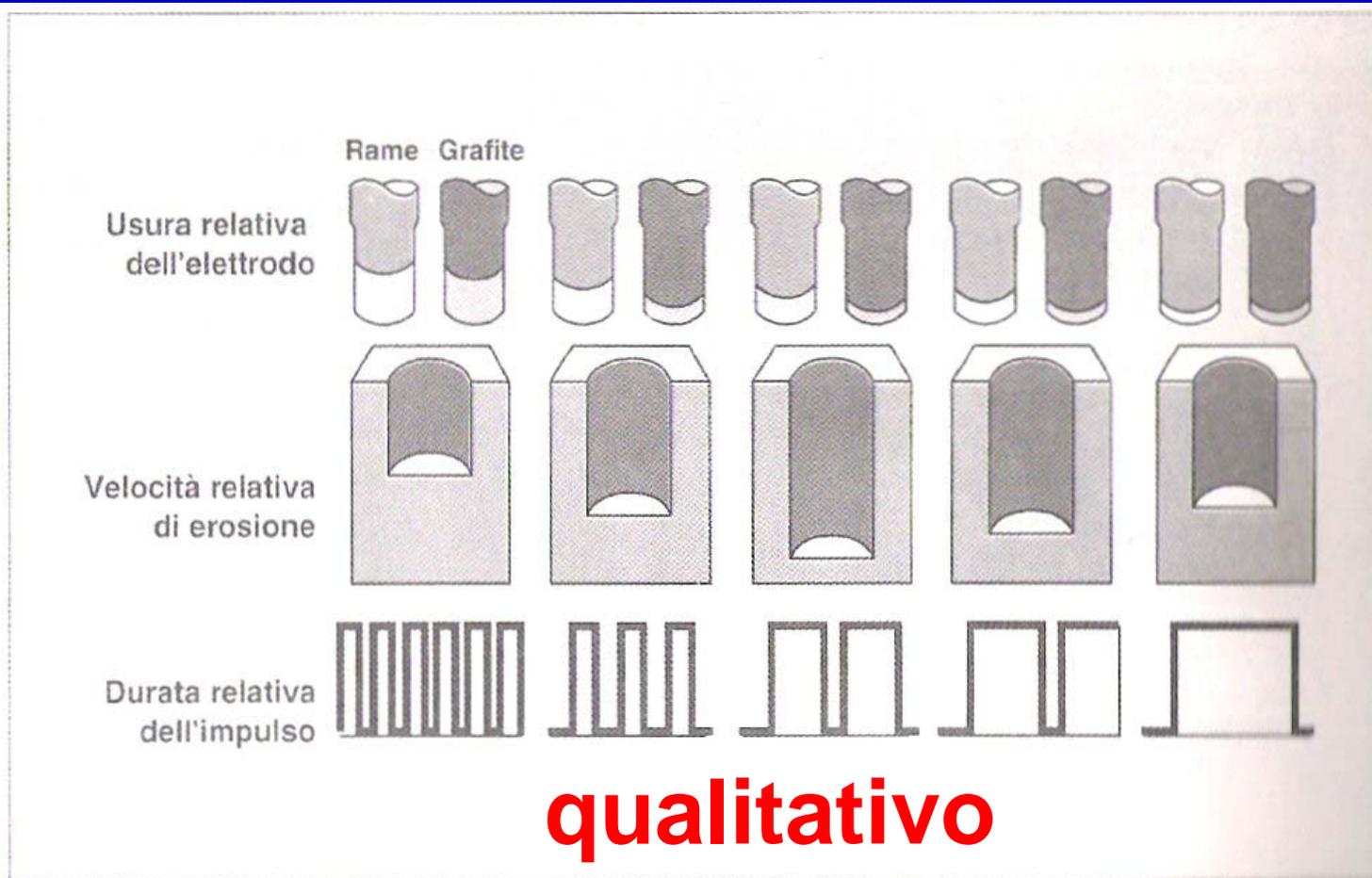


Figura 13.27 - Rapporto tra durata dell'impulso, velocità di erosione e usura dell'elettrodo. Appare evidente che esiste una durata ottimale dell'impulso ai fini della massima velocità di erosione. L'usura dell'elettrodo utensile diminuisce con l'aumentare della durata dell'impulso ed è minore sia nella grafite sia nel rame.

T-ON vs MRR e Tool wear

quantitativo

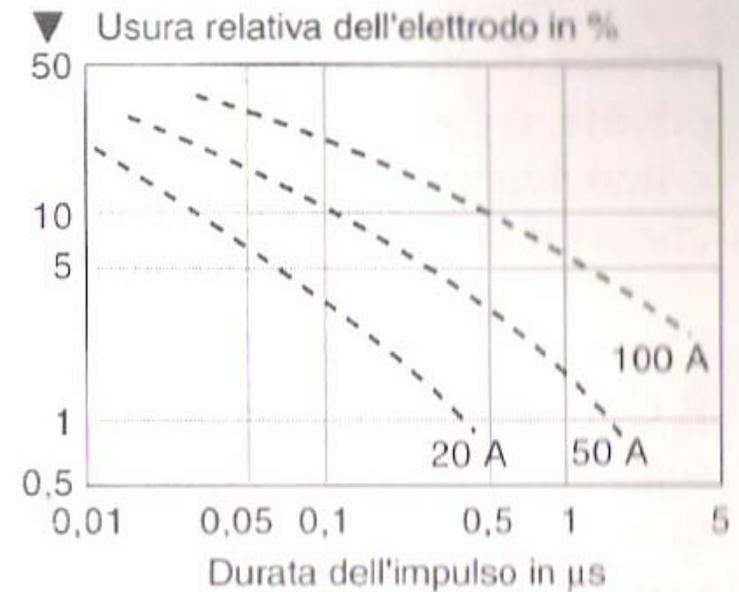
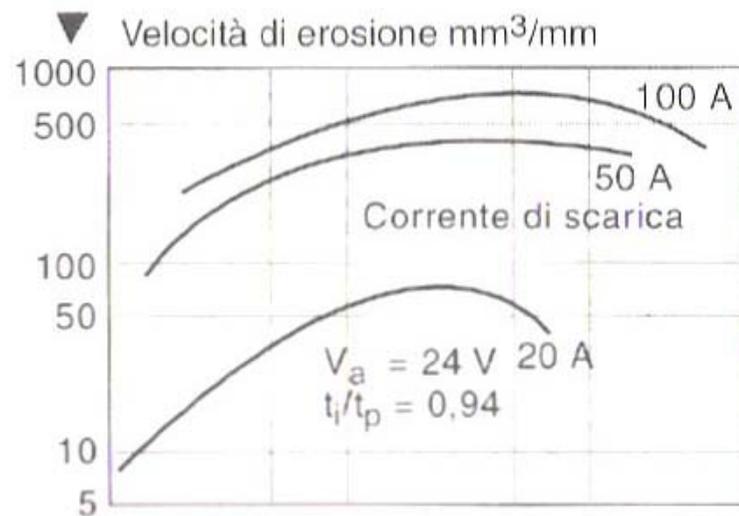


Figura 13.28 - I due grafici mostrano la maniera in cui amperaggi diversi influenzano il comportamento illustrato nella figura 13.27.

T-OFF vs MRR e Tool wear

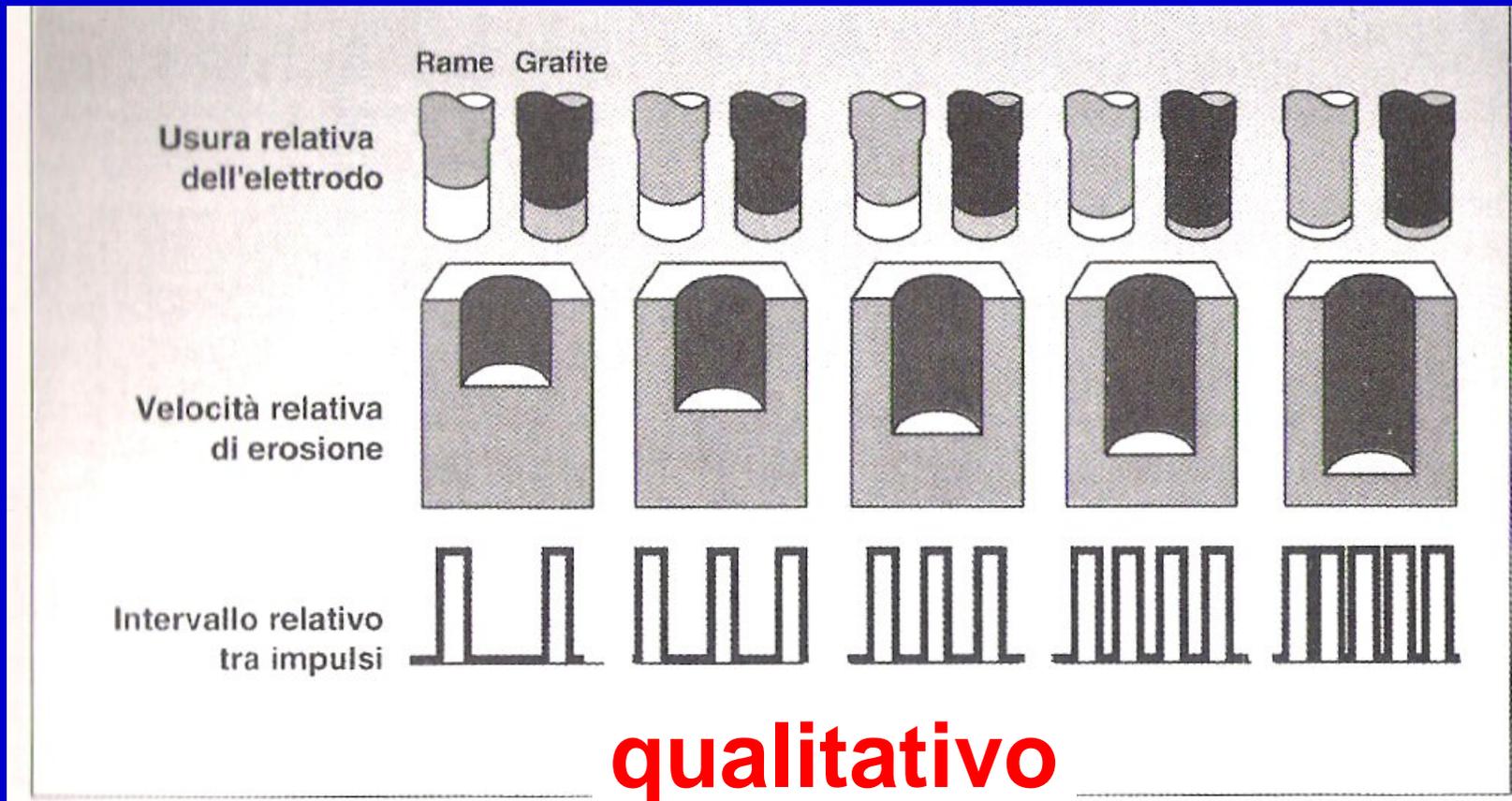


Figura 13.29 - Rapporto tra intervallo degli impulsi, velocità di erosione e usura dell'elettrodo utensile. Al diminuire della durata dell'intervallo, aumenta la velocità di erosione e diminuisce l'usura dell'elettrodo. L'usura degli elettrodi in rame è nettamente superiore a quella degli elettrodi in grafite.

MRR, tool wear vs spark energy

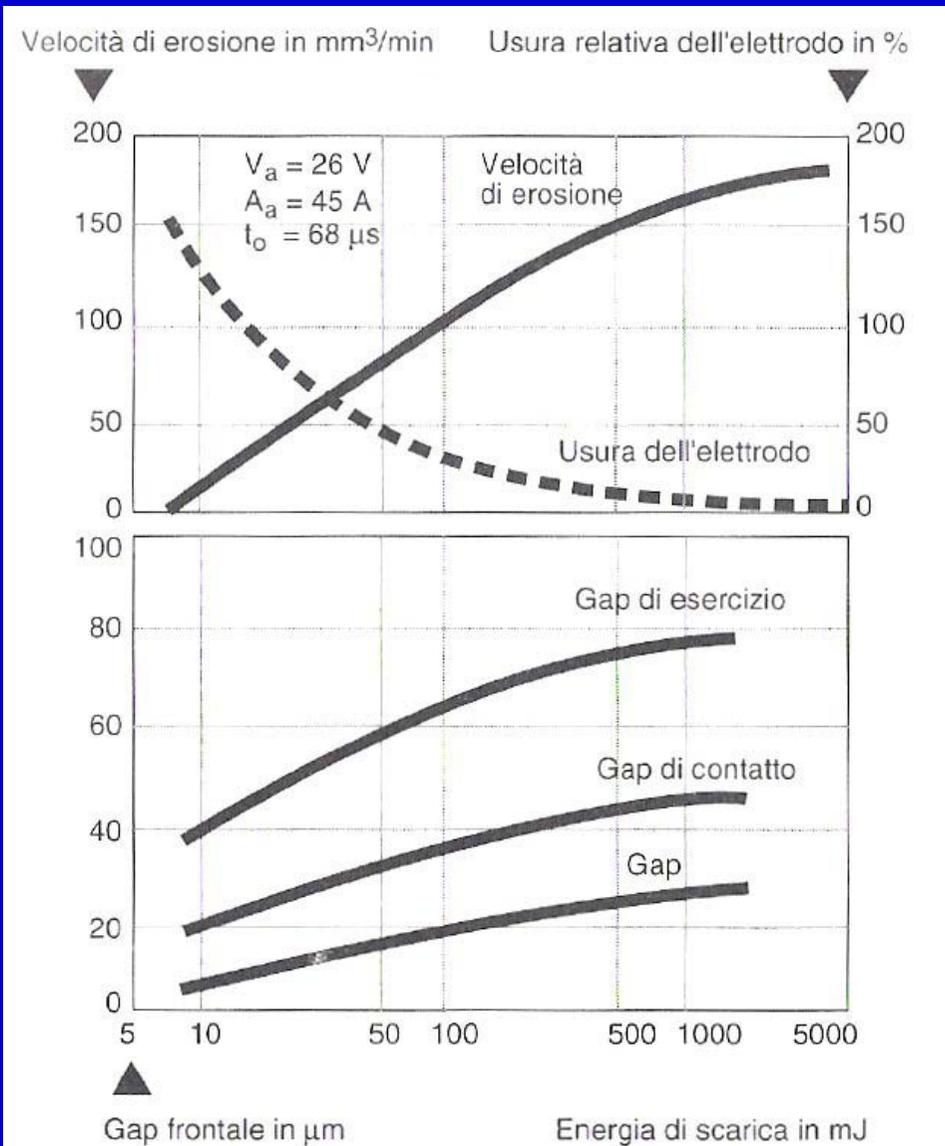
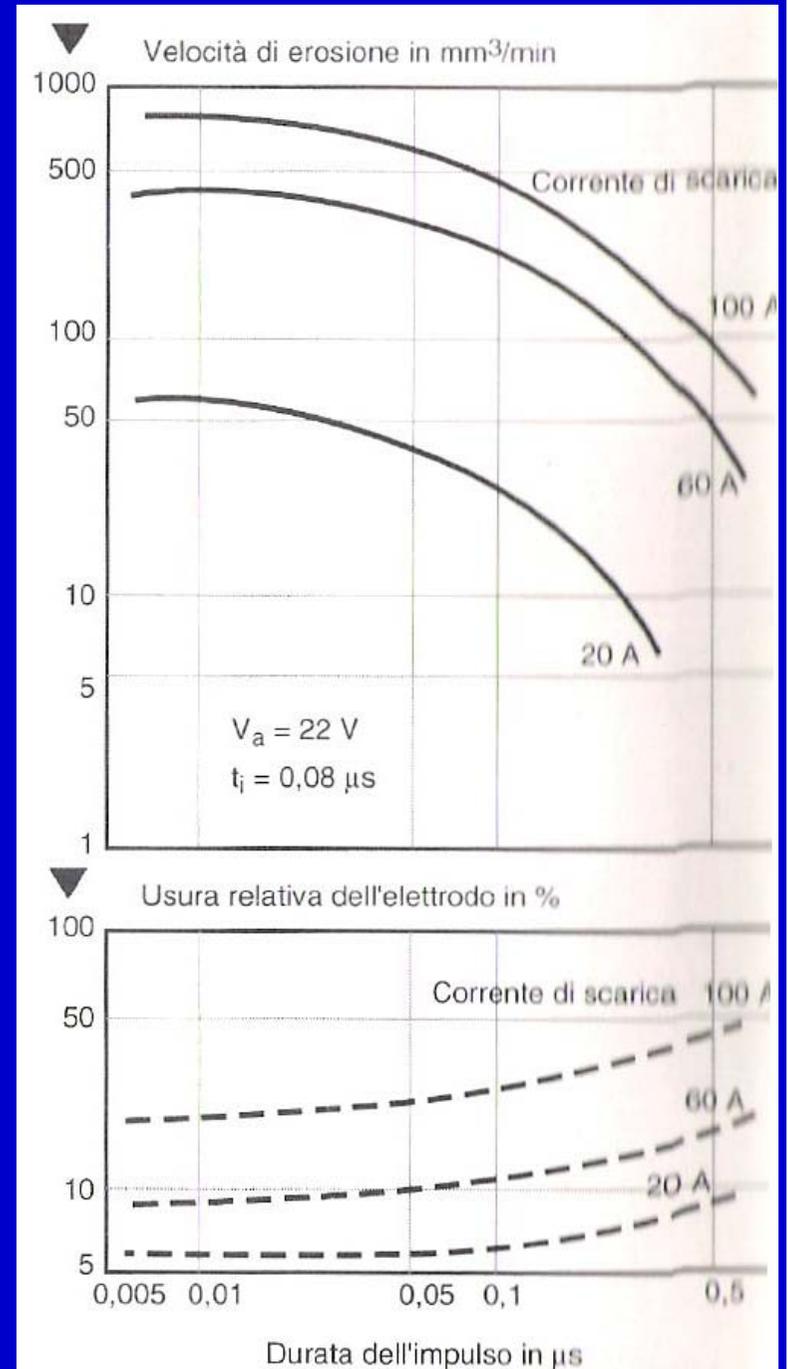


Figura 13.31 (a sinistra) - Il grafico rappresenta come variano velocità di erosione, usura dell'elettrodo utensile e Gap in relazione all'energia di scarica. La tensione a vuoto (circuito aperto) è 60 volt, la pressione di flussaggio è 0,5 bar.

MRR, tool wear vs T-ON

Figura 13.30 (a destra) - I grafici evidenziano il rapporto tra intervallo fra gli impulsi, velocità di erosione e usura dell'elettrodo utensile in relazione a diversi amperaggi di scarica.



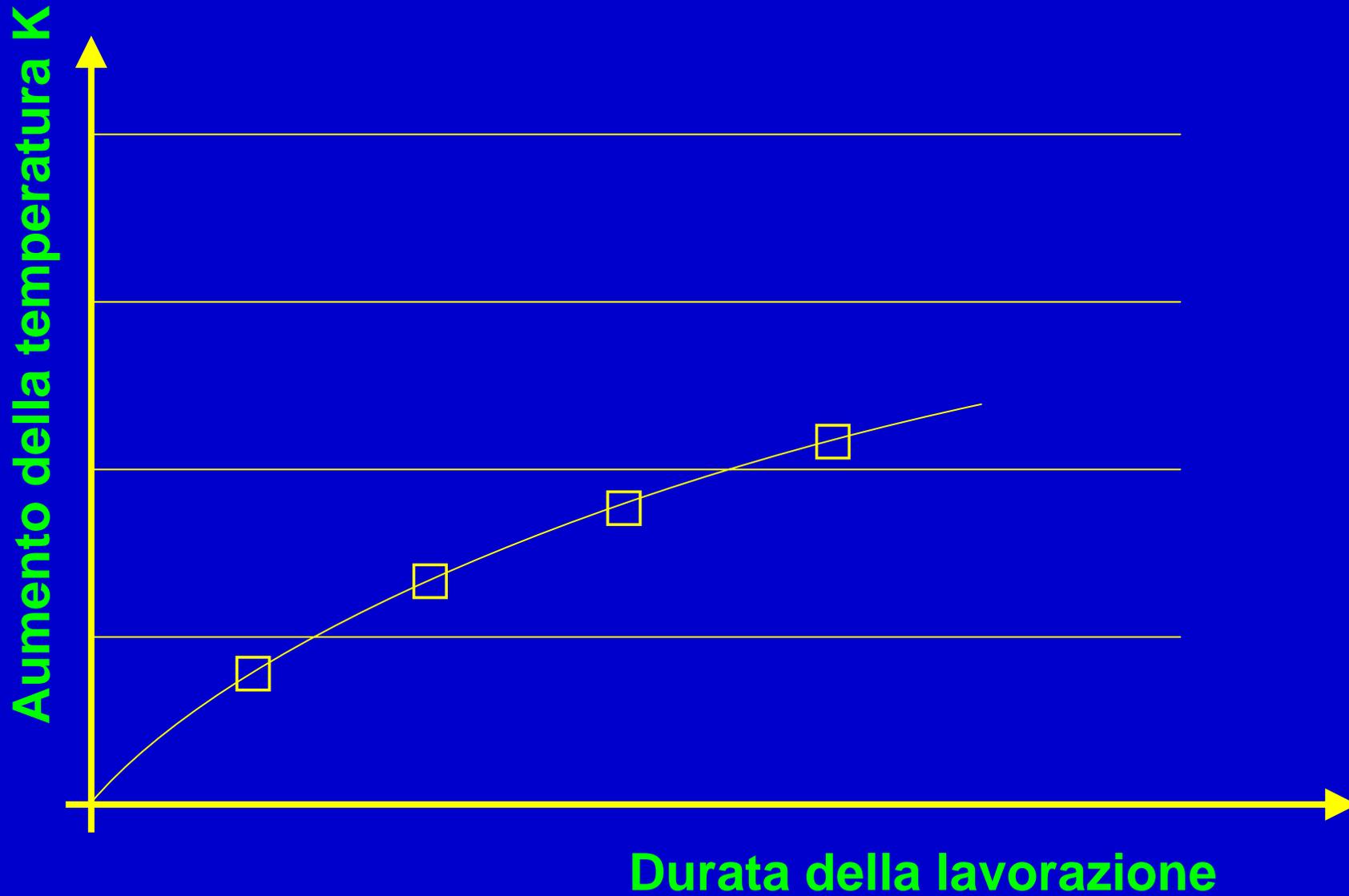
Tempo di lavorazione e T dielettrico

| Simbolo | Durata impulso t_i | Intervallo tra gli impulsi t_0 | Portata cm^3/s |
|---------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| ● | 100 | 60 | 0 |
| □ | 100 | 60 | 0,56 |
| ○ | 100 | 60 | 5,6 |
| ▲ | 100 | 60 | 28 |
| ▼ | 720 | 60 | 5,6 |
| ◇ | 720 | 320 | 5,6 |

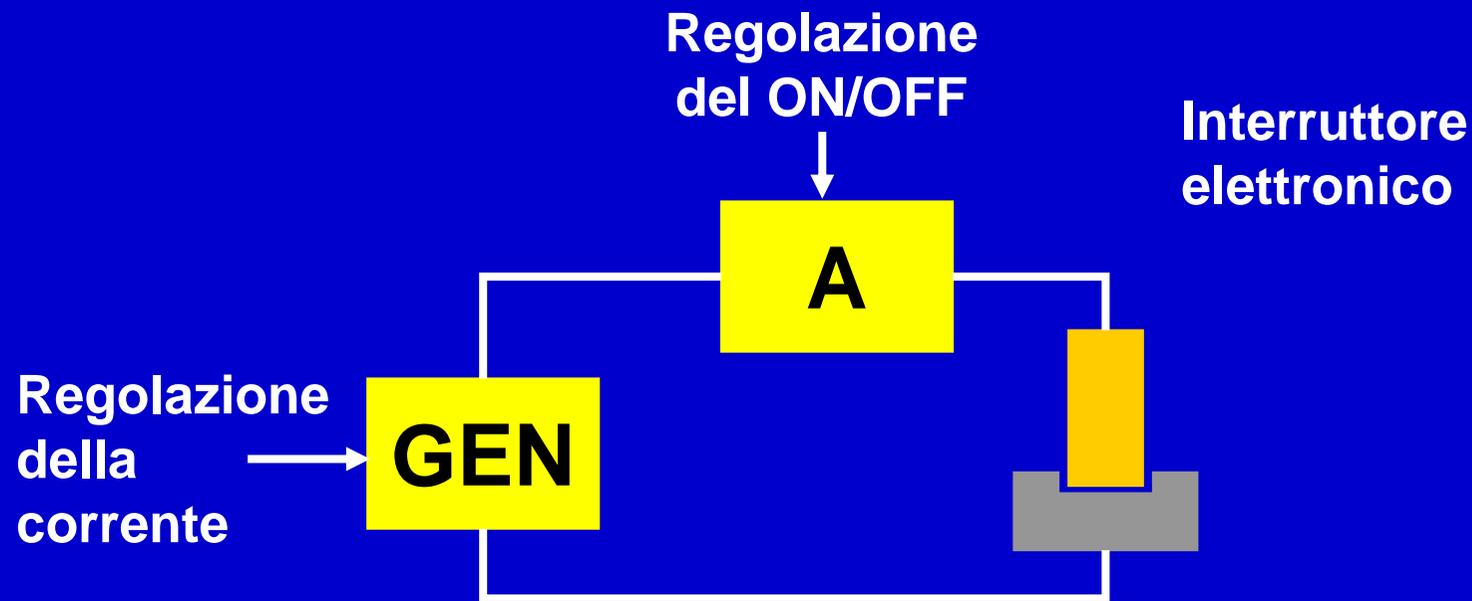
V=60V

A=10A

$T (^{\circ}\text{C})$ vs $t (\text{s})$



Il sistema di regolazione attuale

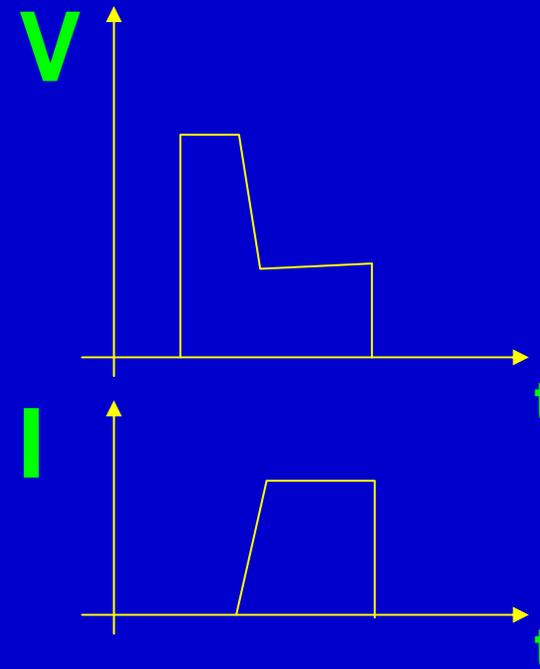
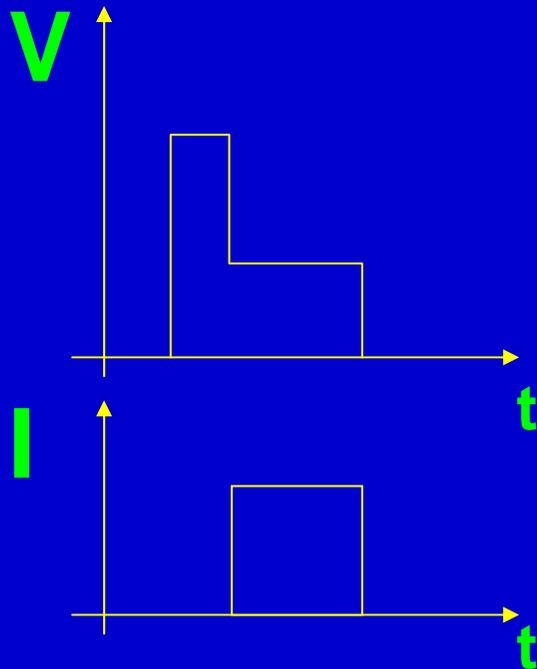


- Ton e Toff regolabili, possiamo arrivare al 90% Ton/T
- Posso far sì che la corrente non superi un certo valore
- Anche se la corrente ha lo stesso valore, potrebbe avere durate diverse perciò sono stati introdotti gli impulsi ISOENERGETICI ($V \cdot i \cdot t_e = \text{cost}$)

Impulsi ISOENERGETICI

- Quindi il generatore varia il tempo di ciascun impulso mantenendo però costante la durata della scarica, in questo modo non controllo solo il t di innesco.
- In realtà la V di innesco non è mai precisamente uguale fra scarica e scarica in quanto, variando il gap, varia V di innesco, ma se il regolatore ed il CN sono buoni mantengono un gap costante e gli impulsi rimangono ISOENERGETICI.

Ulteriori varianti



- Ho erosione dell'utensile soprattutto nella prima parte della scarica, per evitare ciò riduco la rampa della corrente. L'usura sull'utensile viene ridotta a meno dell'1%

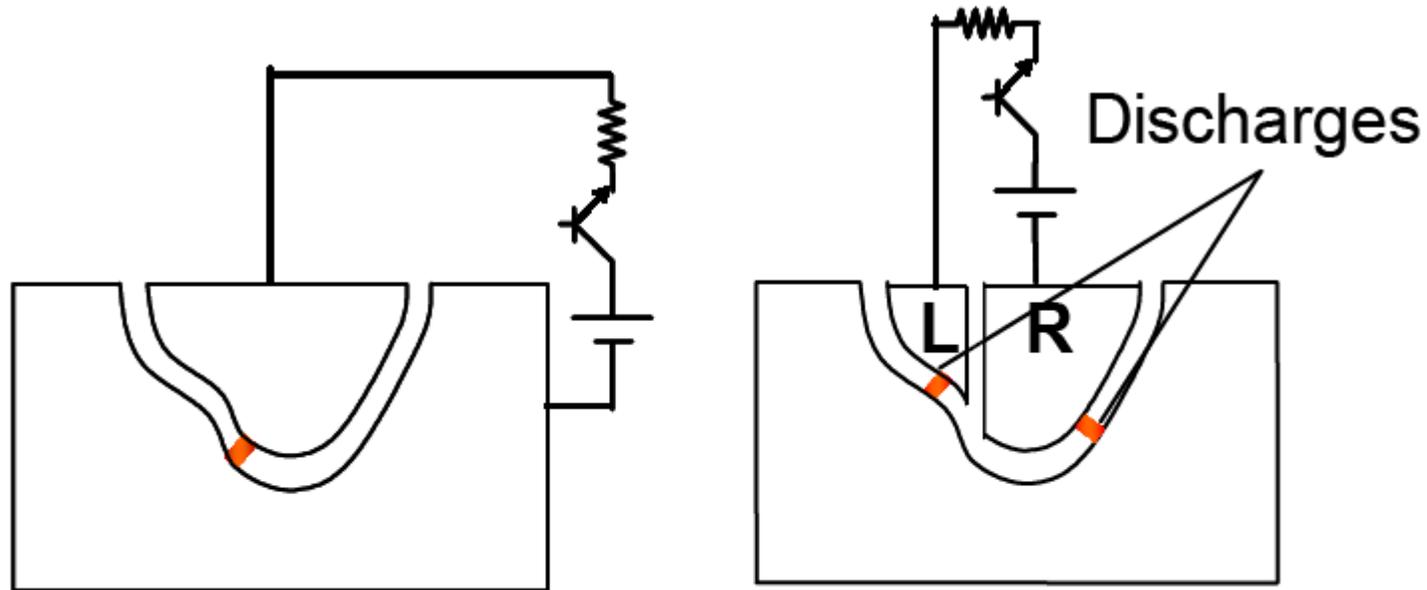
Control of discharge locations

It is essential to disperse discharge locations uniformly over the working surface.

To disperse the discharge locations, Narumiya et al. added electrically conductive fine powder into the working fluid. Now this method is widely used in the finishing stage to obtain a mirror-like surface. Nishikawa et al. found from experiment that the discharge locations can be dispersed with this method because the gap width is increased when powder is added to the working fluid.

They reported that another reason is the decrease of discharge energy due to the decrease of the inherent capacity of the discharge gap, because the surface electric charge on the electrode surfaces may increase the discharge current over the current supplied from the pulse generator if the gap is narrow especially when the discharging surface area is wide.

Multi-spark method: scheme



Conventional

Multi spark

Figure 37: Principle of multi-spark EDM method.

Multi-spark method: process

The scheme shows the basic circuit of the newly developed Multi-spark EDM method, in which two discharge points can be obtained for each pulse. The circuit is comprised of a conventional pulse generator, a workpiece and two tool electrodes, both of which are fixed onto the quill of the same EDM machine.

The removal rate and energy efficiency of the Multi-spark EDM method are considerably higher than those of conventional EDM. To balance the removal rates in both gaps, the polarity of the pulse generator is changed adaptively to equalize the gap voltages measured at both gaps.