UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Dipartimento di Ingegneria e Architettura

# Sistemi Elettrici

## Elettrotecnica

## A.A. 2024 - 2025

**Prof. Alessandro Massi Pavan – apavan@units.it**

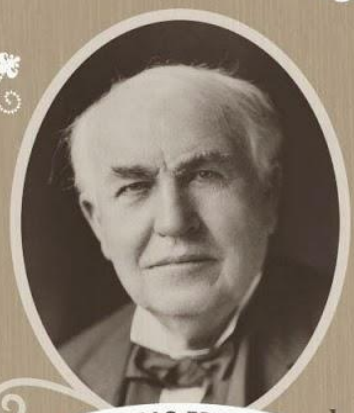
# IMPIANTO (SISTEMA) ELETTRICO

Un **impianto elettrico** (o **sistema elettrico**) è un insieme di componenti e installazioni necessario a una o più delle seguenti funzioni:

- *Produzione*
- *Conversione e Trasformazione*
- *Distribuzione*
- *Utilizzazione* dell'energia elettrica
- ...

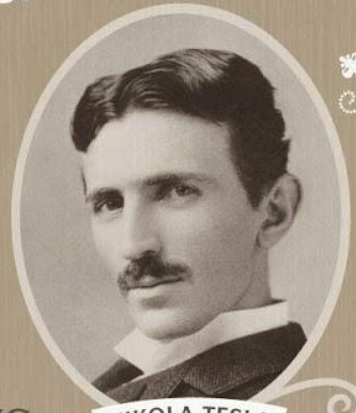
# THE CURRENT WAR

## THE TALE OF AN EARLY TECH RIVALRY



THOMAS EDISON

VS.



NIKOLA TESLA

You would have never found two geniuses so spiteful of each other beyond turn-of-the-century inventors Nikola Tesla and Thomas Edison. They worked together—and hated each other. Let's compare their life, achievements, and embittered battles.

## DC

### DIRECT CURRENT

The flow of electricity is in one direction only. The system operates at the same voltage level throughout and is not as efficient for high-voltage, long distance transmission.

Direct current runs through:

Battery-Powered Devices | Fuel and Solar Cells | Light Emitting Diodes

"[TESLA'S] IDEAS ARE SPLENDID, BUT THEY ARE UTTERLY IMPRACTICAL."

- THOMAS EDISON

## AC

### ALTERNATING CURRENT

Electric charge periodically reverses direction and is transmitted to customers by a transformer that could handle much higher voltages.

Alternating current runs through:

Car Motors | Radio Signals | Appliances

"IF EDISON HAD A NEEDLE TO FIND IN A HAYSTACK, HE WOULD PROCEED AT ONCE... UNTIL HE FOUND THE OBJECT OF HIS SEARCH. I WAS A SORRY WITNESS OF SUCH DOINGS, KNOWING THAT A LITTLE THEORY AND CALCULATION WOULD HAVE SAVED HIM 90 PERCENT OF HIS LABOR."

- NIKOLA TESLA

### LATE BLOOMER

Thomas Edison, the youngest in his family, didn't learn to talk until he was almost 4 years old.

### FALLING OUT

Edison promised Tesla a generous reward if he could smooth out his direct current system. The young engineer took on the assignment and ended up saving Edison more than $100,000 (millions of dollars by today's standards). When Tesla asked for his rightful compensation, Edison declined to pay him. Tesla resigned shortly after, and the elder inventor spent the rest of his life campaigning to discredit his counterpart.

"Genius is one percent inspiration and ninety nine percent perspiration."

-Thomas Edison

| | | |
|---|---|---|
| 1847 | BORN | 1858 |
| Milan, Ohio | BIRTHPLACE | Smiljan, Croatia |
| Wizard of Menlo Park | NICKNAME | Wizard of the West |
| Home-schooled and self-taught | EDUCATION | Studied math, physics, and mechanics at The Polytechnic Institute at Gratz |
| Mass communication and business | FORTE | Electromagnetism and electromechanical engineering |
| Trial and error | METHOD | Getting inspired and seeing the invention in his mind in detail before fully constructing it |
| DC (Direct Current) | WAR OF CURRENTS: ELECTRICAL TRANSMISSION IDEA | AC (Alternating Current) |
| Incandescent light bulb; phonograph; cement making technology; motion picture camera; DC motors and electric power | NOTABLE INVENTIONS | Tesla coil - resonant transformer circuit; radio transmitter; fluorescent light; AC motors and electric power generation system |
| 1,093 | NUMBER OF US PATENTS | 112 |
| 0 | NUMBER OF NOBEL PRIZES WON | 0 |
| 1 | NUMBER OF ELEPHANTS ELECTROCUTED | 0 |
| 1931—Passed away peacefully in his New Jersey home, surrounded by friends and family | DEATH | 1943—Died lonely and in debt in Room 3327 at the New Yorker Hotel |

### WAR OF CURRENTS OFFICIALLY SETTLED

In 2007, Con Edison ended 125 years of direct current electricity service that began when Thomas Edison opened his power station in 1882. It changed to only provide alternating current.

### NOBEL PRIZE CONTROVERSY

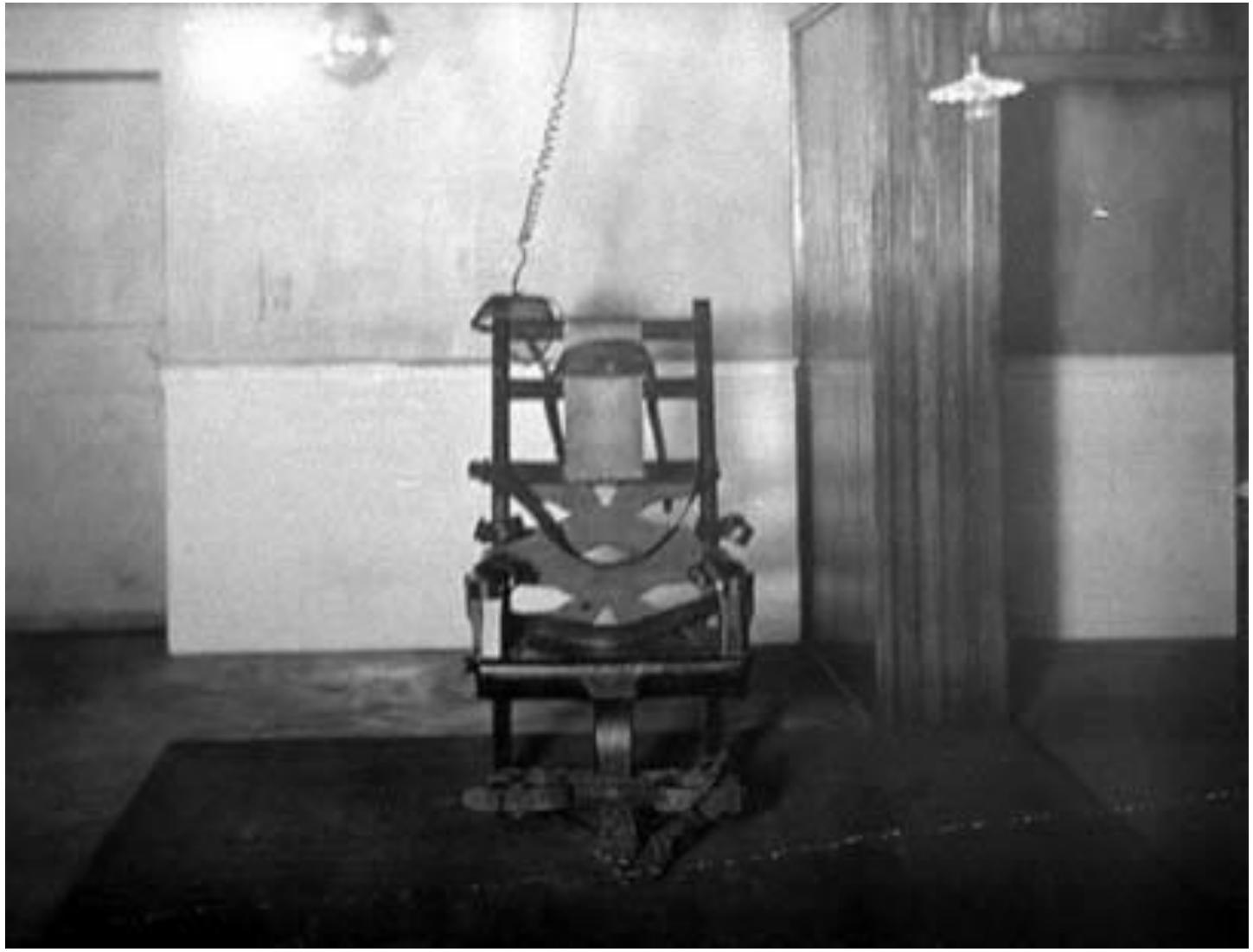
In 1915, both Edison and Tesla were to receive Nobel Prizes for their strides in physics, but ultimately, neither won. It is rumored to have been caused by their animosity towards each other and refusal to share the coveted award.

### EDISON FRIES AN ELEPHANT

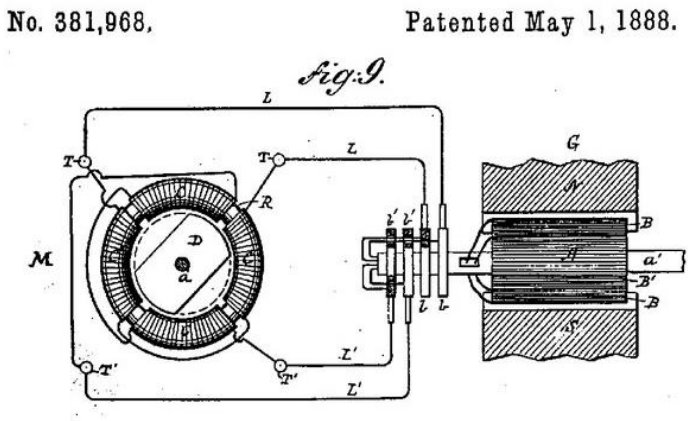
In order to prove the dangers of Tesla's alternating current, Thomas Edison staged a highly publicized electrocution of the three-ton elephant known as "Topsy." She died instantly after being shocked with a 6,600-volt AC charge.

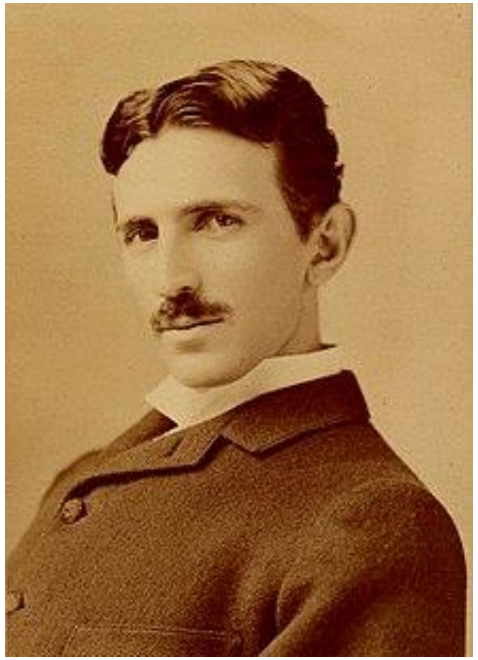
SOURCES: CHENEY, MARGARET. "TESLA: MAN OUT OF TIME" | UTH, ROBERT. "TESLA: MASTER OF LIGHTNING." | THOMASEDISON.COM | PBS.ORG | WEB.MIT.EDU | WIRED.COM

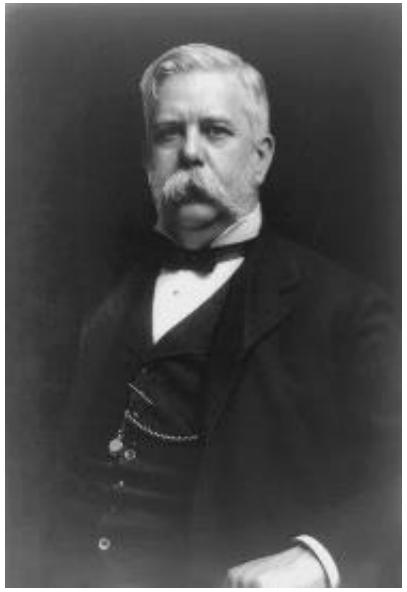
A COLLABORATION BETWEEN GOOD AND COLUMN FIVE

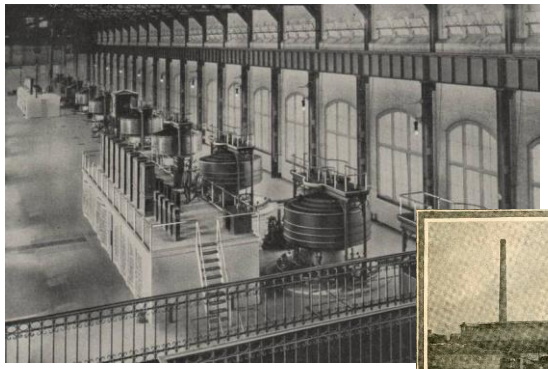


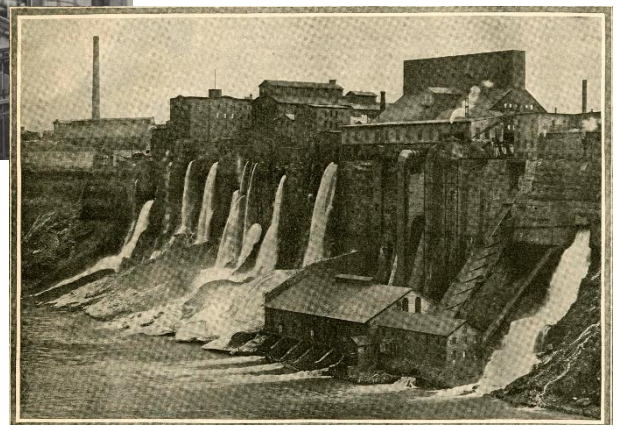
# LA CORRENTE ALTERNATA









# SISTEMI CC, 1ϕ e 3ϕ

In una linea di lunghezza *l* che alimenta un carico che assorbe una potenza *P* a una tensione *V*, le perdite per effetto Joule valgono

$$P_{CC} = 2\rho \frac{l}{S_{CC}} \left(\frac{P}{V}\right)^2$$

$$P_{1\phi} = 2\rho \frac{l}{S_{1\phi}} \left(\frac{P}{V \cos\varphi}\right)^2 \qquad P_{3\phi} = \rho \frac{l}{S_{3\phi}} \left(\frac{P}{V \cos\varphi}\right)^2$$

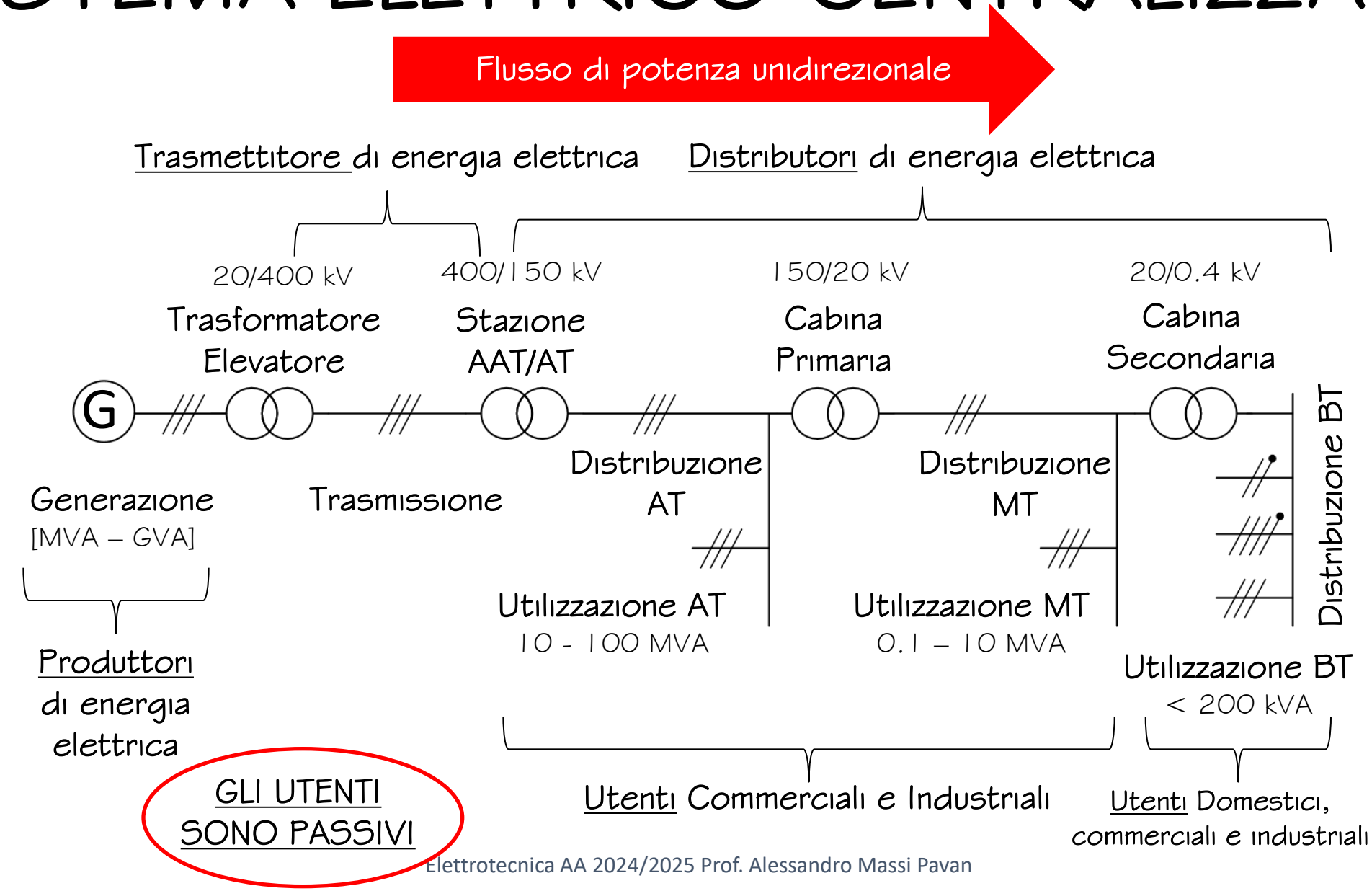
# SISTEMI CC, 1ϕ e 3ϕ

Usando lo stesso materiale conduttore, a parità di potenza trasmessa e di perdite di linea, si ricava

$$\frac{V_{cond,1\phi}}{V_{cond,3\phi}} = \frac{4}{3} \qquad \frac{V_{cond,3\phi}}{V_{cond,cc}} = \frac{3}{4\cos\varphi^2}$$

# CONFRONTO CC- 1 ϕ-3 ϕ

# SISTEMA ELETTRICO CENTRALIZZATO



# LIVELLI DI TENSIONE IN ITALIA

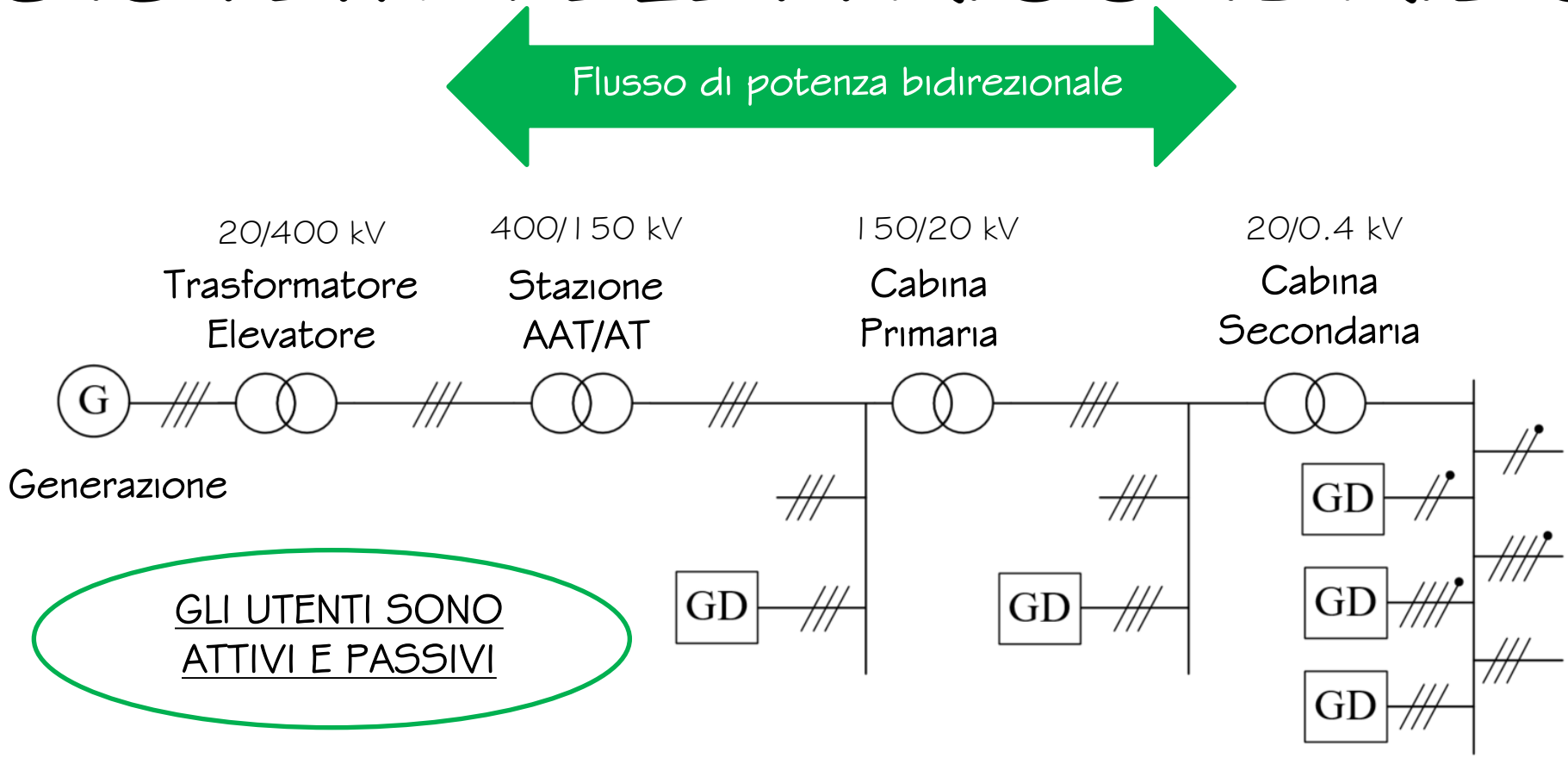
- Altissima tensione (AAT): superiore a 150 kV, tipicamente 230 e 400 kV
- Alta tensione (AT): [35 – 150 kV], tipicamente 132 e 150 kV
- Media tensione (MT): [1 - 35 kV], tipicamente 10 e 20 kV
- Bassa tensione (BT): inferiore a 1 kV, tipicamente 400 V in trifase e 230 V in monofase

# TENSIONE E POTENZA

| Potenza [MW] | Livello di tensione |
|---|---|
| ≤ 0.1 | BT |
| 0.1 – 0.2 | BT/MT |
| 0.2 – 3 (0.2 – 6)* | MT |
| 3 – 10 (6 – 10)* | MT/AT |
| > 10 | AT |

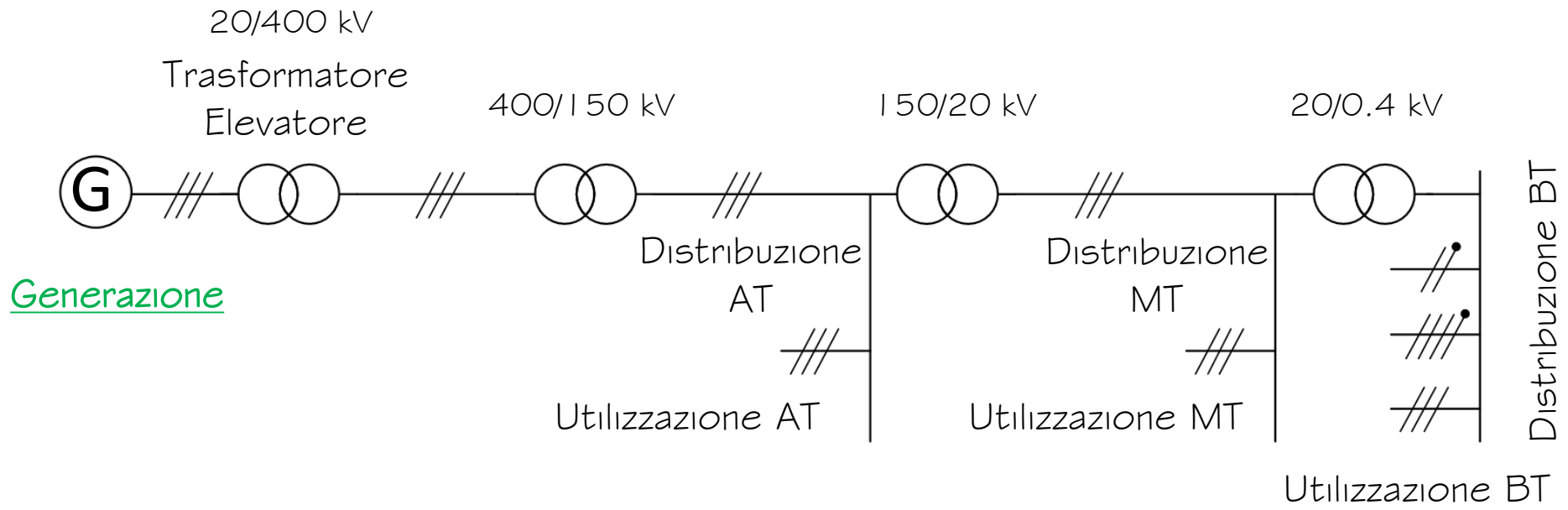
** Se produttore*

# SISTEMA ELETTRICO IBRIDO




Nel sistema ibrido gli utenti da passivi diventano passivi/attivi (prosumers) disponendo di generatori distribuiti (GD)

# SISTEMA ELETTRICO - GENERAZIONE



# SISTEMA ELETTRICO - GENERAZIONE

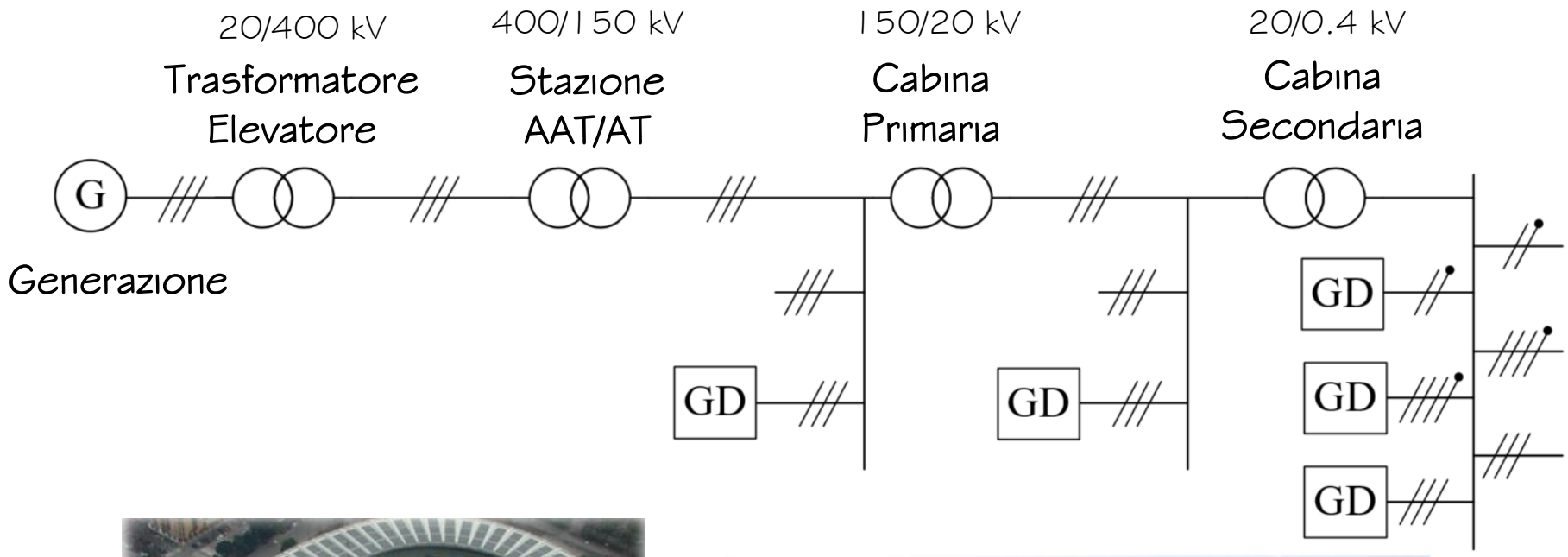
# IMPIANTI DI GENERAZIONE

- Termoelettrici a vapore (TEV) da combustibili fossili
- Termoelettrici a vapore da combustibili fissili
- Termoelettrici con turbine a gas (TG)
- A ciclo combinato gas e vapore (CC)
- Idroelettrici (II)
- Eolici
- Fotovoltaici
- Altri (biomasse, geotermico, …)

# GENERAZIONE IN ITALIA

| TECHNOLOGY | 2005 | 2020 |
|---|---|---|
| THERMAL POWER | 81% | 60% |
| HYDROPOWER | 15% | 17% |
| PHOTOVOLTAICS | 0% | 9% |
| WIND POWER | 1% | 6% |
| BIOMASS | 2% | 6% |
| GEOTHERMAL | 2% | 2% |

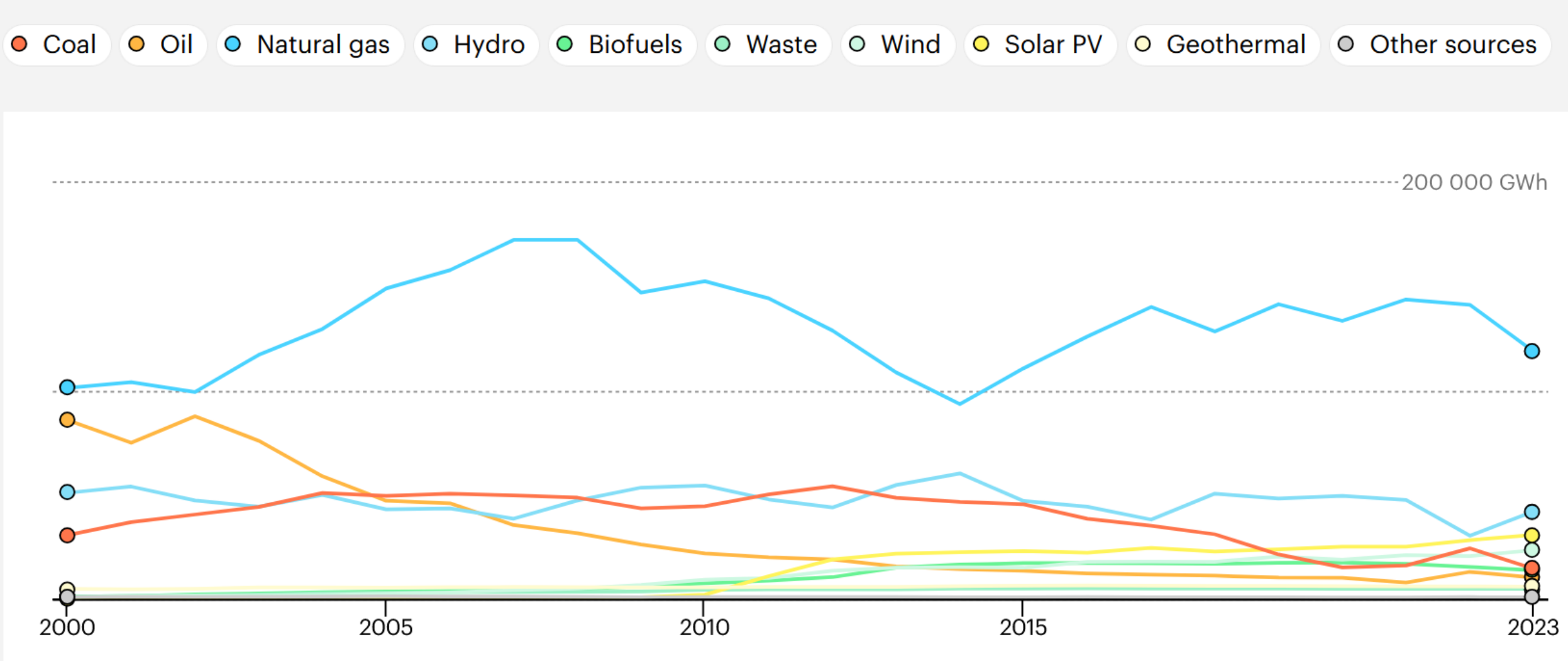
# GENERAZIONE DISTRIBUITA



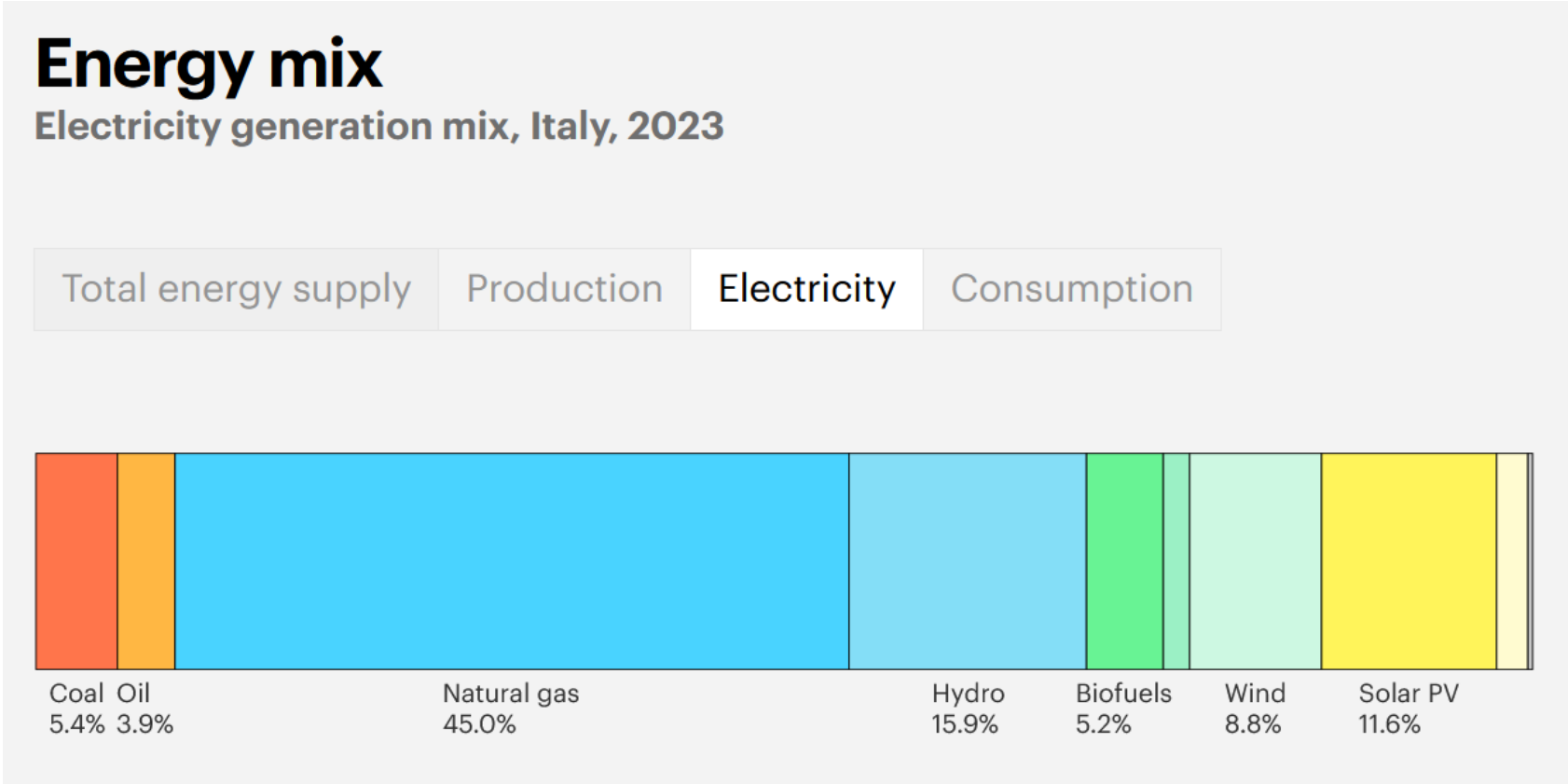
# GENERAZIONE DISTRIBUITA

- Taglia limitata (fino a 10 MVA)
- Connessa a diversi livelli di tensione
- Spesso connessa alla rete di distribuzione sul lato «utente del contatore»
- Diverse tecnologie: fotovoltaico, microturbine, celle a combustibile, turbine eoliche, motori a combustione interna
- Permette di ottenere benefici economici, tecnici e ambientali

# GENERAZIONE IN ITALIA - ENERGIA

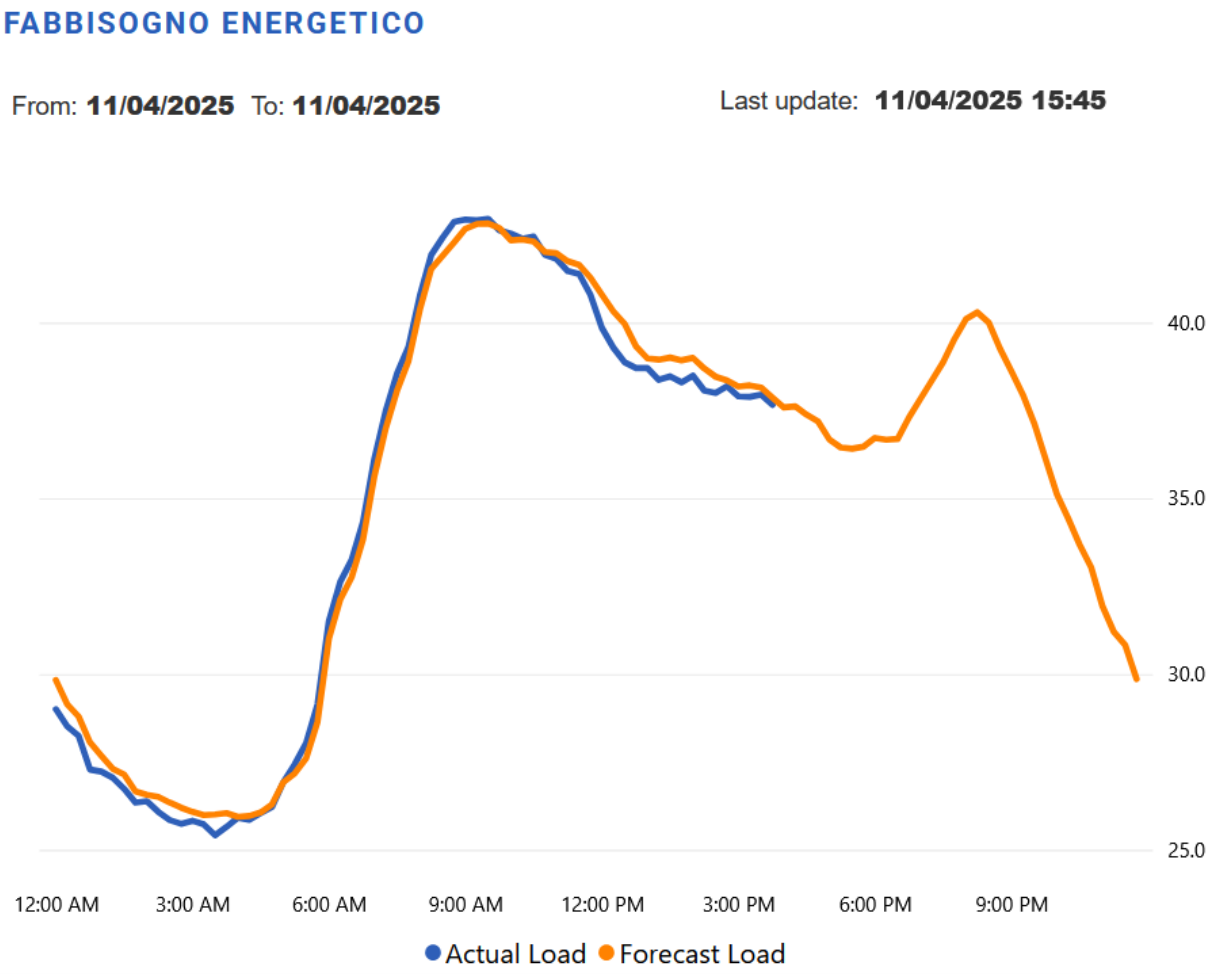


# GENERAZIONE IN ITALIA - ENERGIA

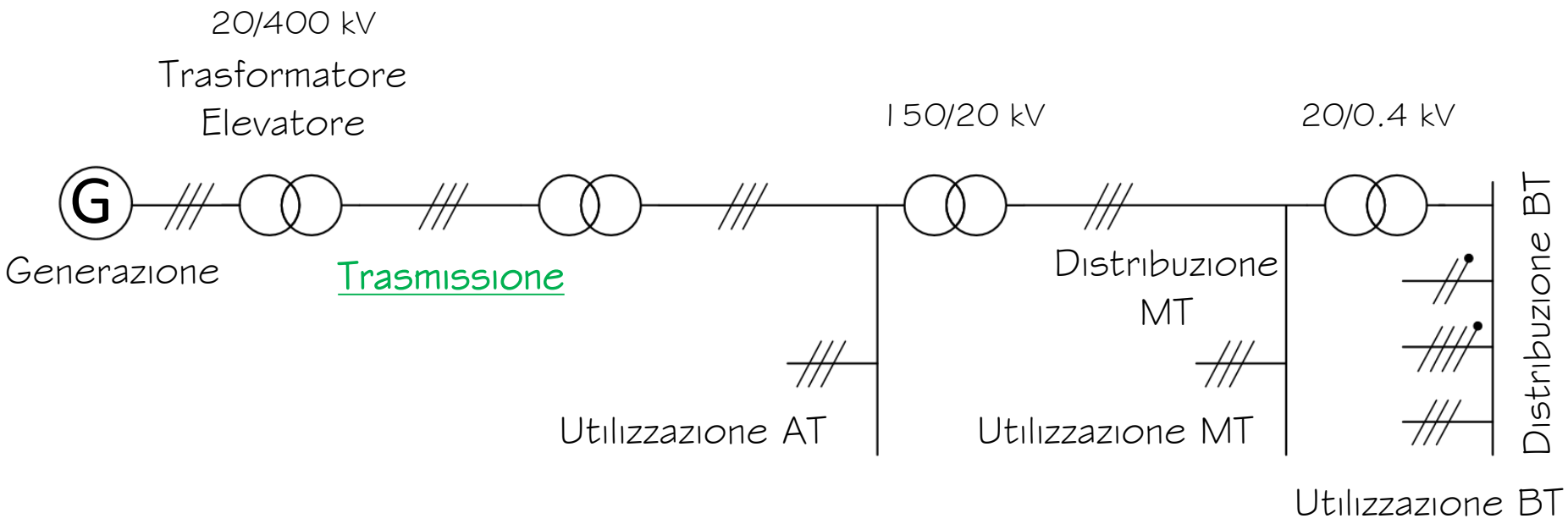


# DIAGRAMMA DI CARICO

- Servizio di base (TEV, CC)
- Servizio di modulazione (TEV, II, CC)
- Servizio di punta (II, TG)
- Fonti rinnovabili: sempre*

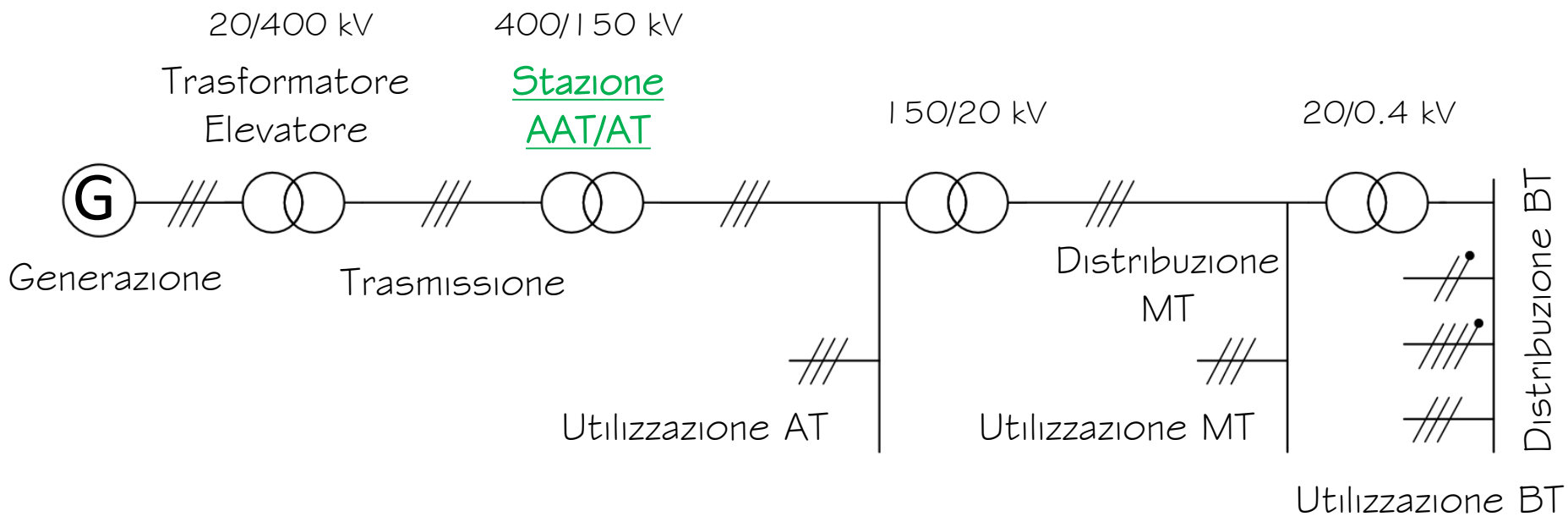


# TRASMISSIONE



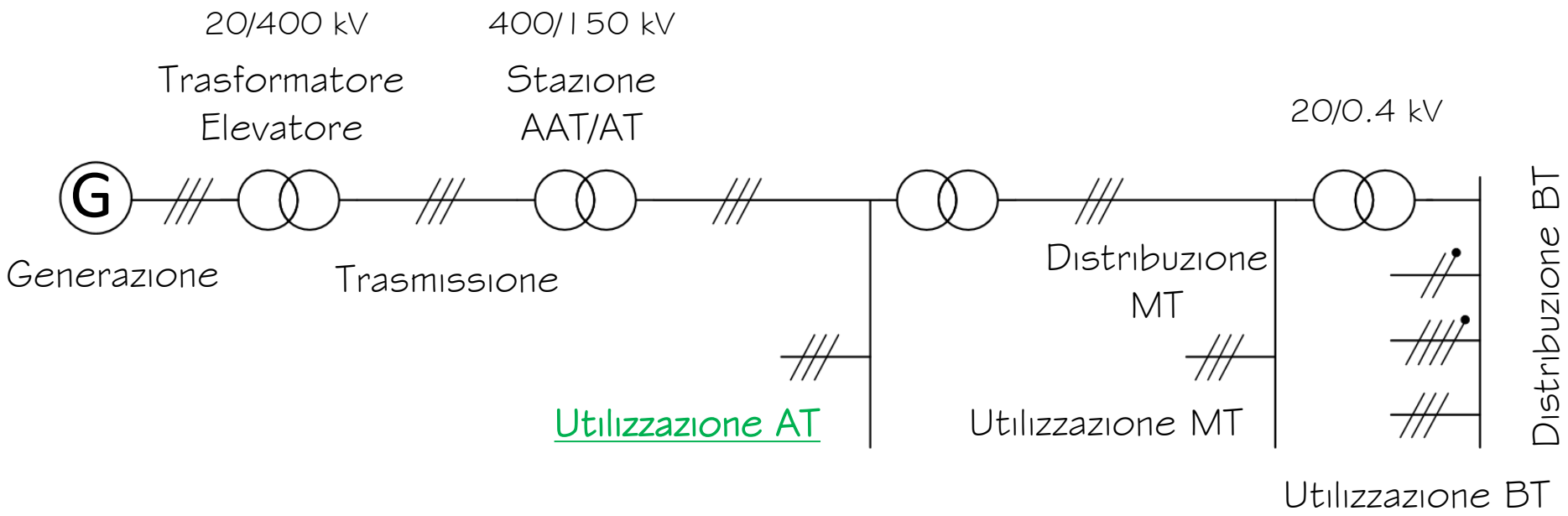
# TRASMISSIONE

# STAZIONI AAT/AT



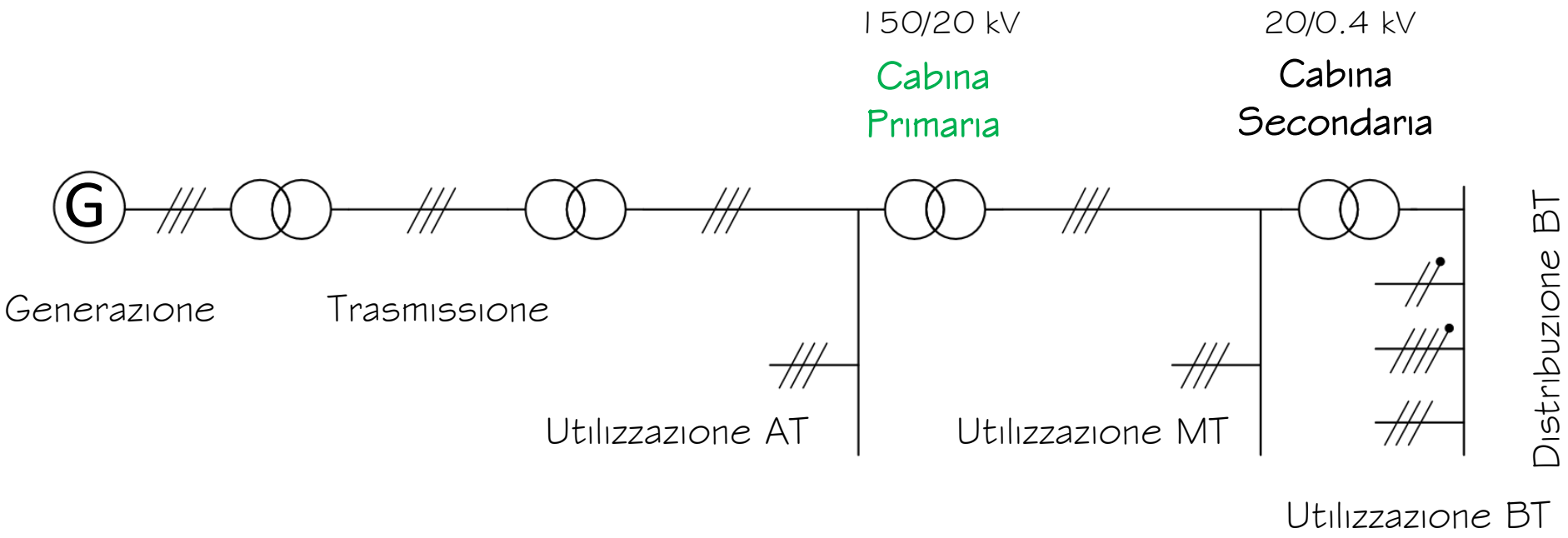
# STAZIONI AAT/AT

# UTENTI AT


20/400 kV
Trasformatore
Elevatore
400/150 kV
Stazione
AAT/AT
20/0.4 kV
G
Generazione
Trasmissione
Distribuzione
MT
Distribuzione BT
Utilizzazione AT
Utilizzazione MT
Utilizzazione BT

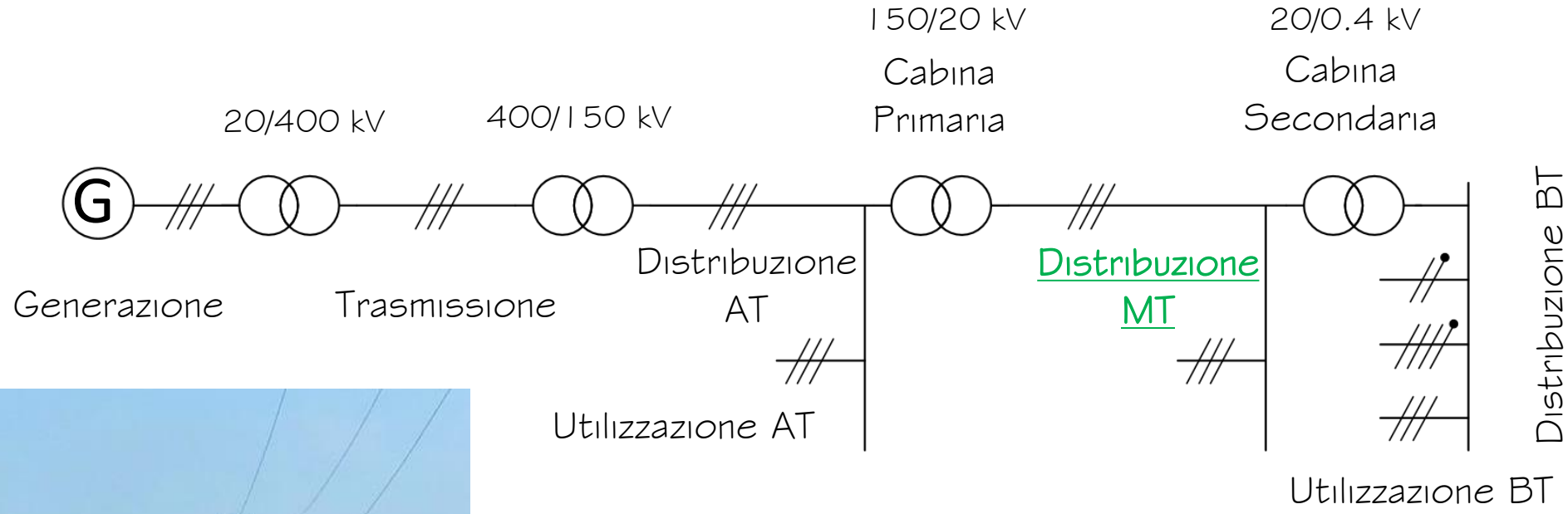
# UTENTI AT

# CABINE PRIMARIE

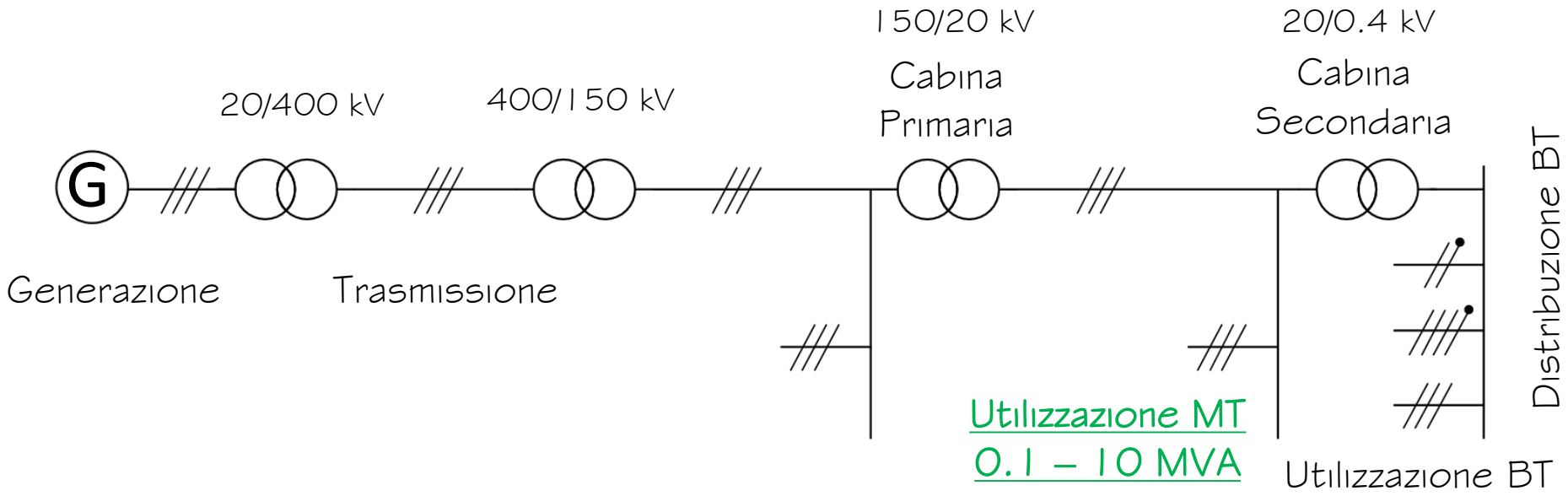


# CABINE PRIMARIE

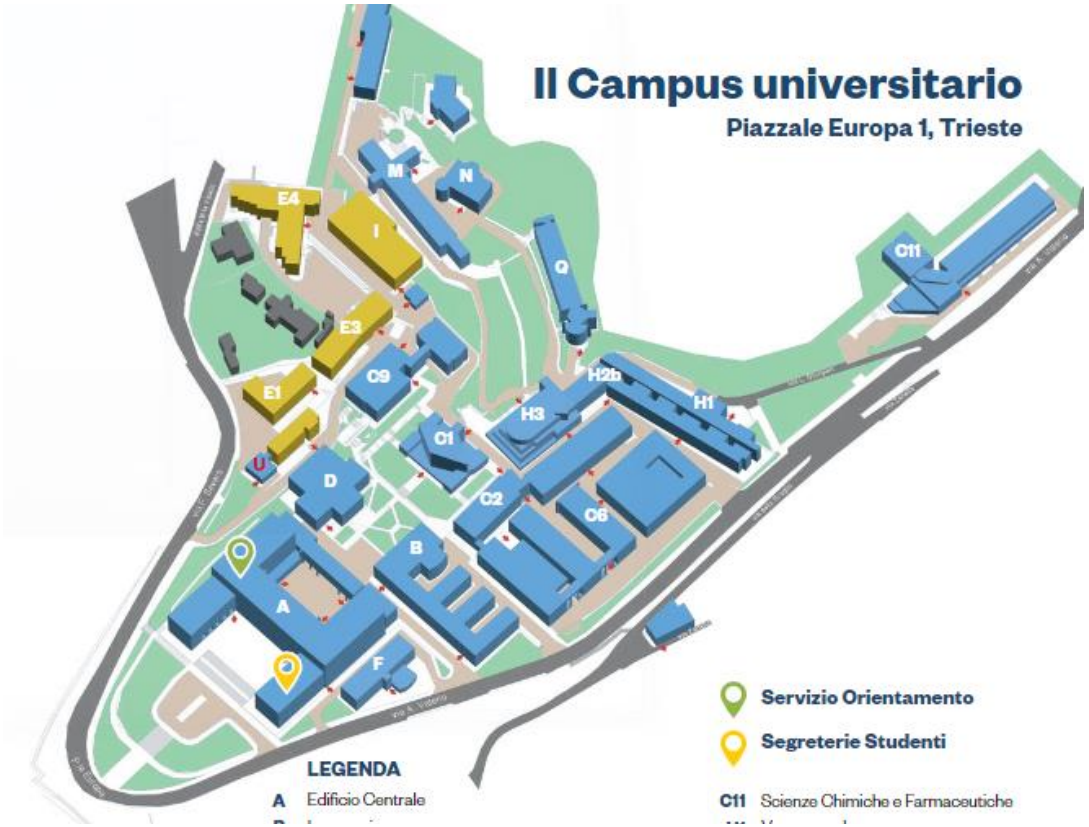
# DISTRIBUZIONE MT



# UTENTI MT

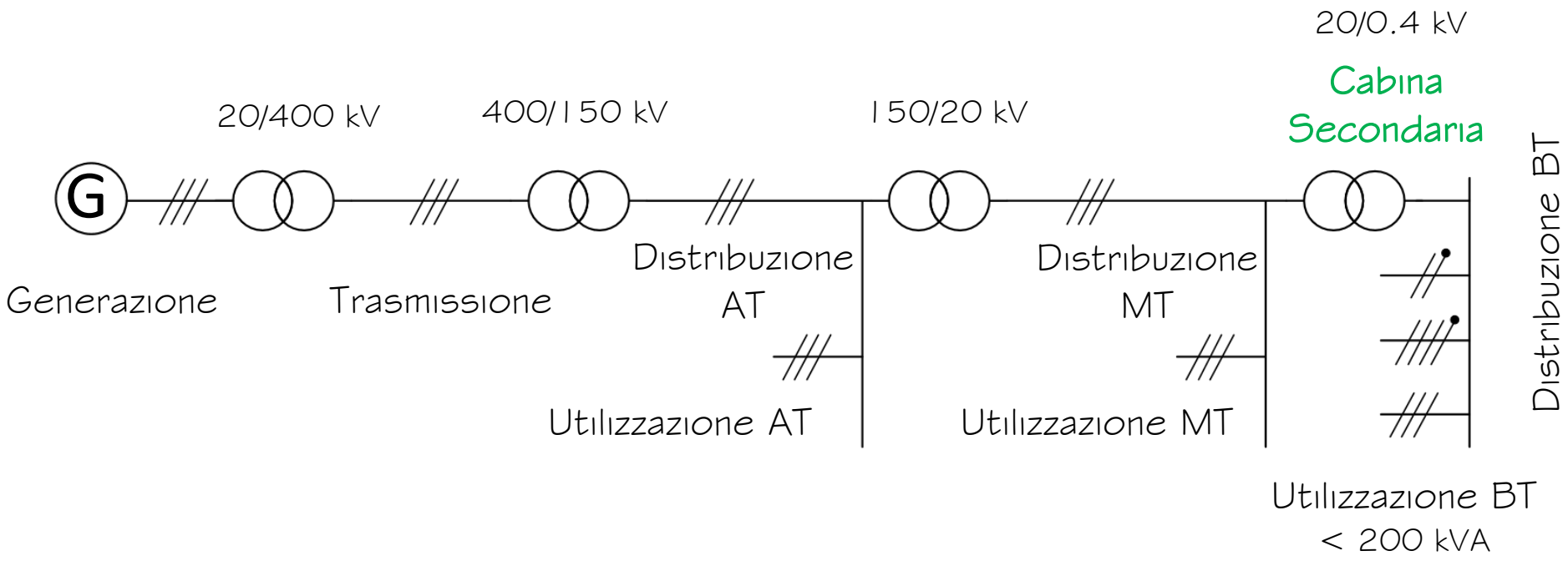

150/20 kV
Cabina
Primaria
20/0.4 kV
Cabina
Secondaria
20/400 kV
400/150 kV
G
Distribuzione BT
Generazione
Trasmissione
Utilizzazione MT
0.1 – 10 MVA
Utilizzazione BT

# UTENTI MT


Il Campus universitario
Piazzale Europa 1, Trieste
E4
I
M
N
Q
C11
E3
E1
C9
H2b
H1
H3
C1
U
D
C2
C6
B
A
F
Servizio Orientamento
Segreterie Studenti
LEGENDA
A Edificio Centrale
C11 Scienze Chimiche e Farmaceutiche

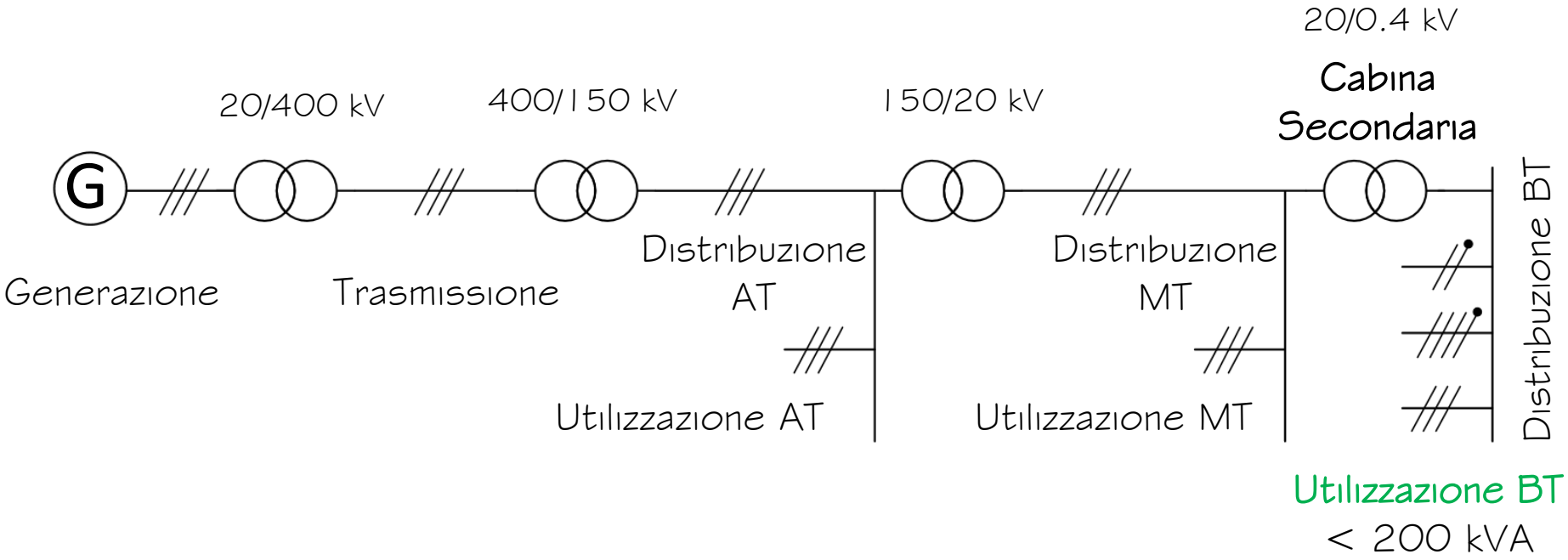
MARKS & SPENCER FOOD

# CABINE SECONDARIE



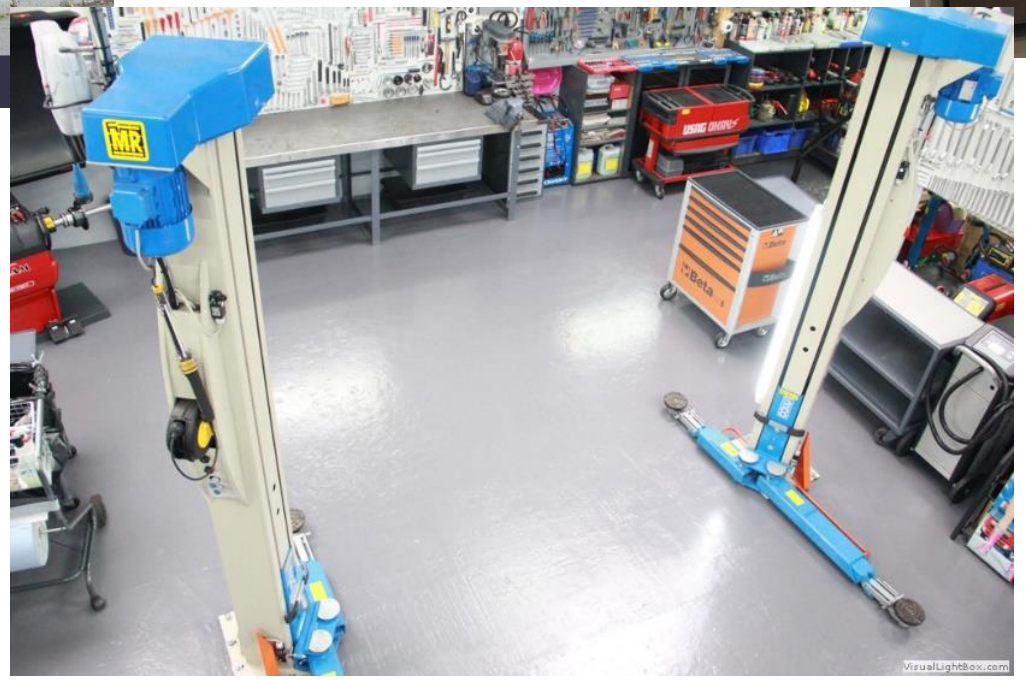
# CABINE SECONDARIE

# UTENTI BT


20/0.4 kV
Cabina Secondaria
20/400 kV
400/150 kV
150/20 kV
G
Distribuzione AT
Distribuzione MT
Distribuzione BT
Generazione
Trasmissione
Utilizzazione AT
Utilizzazione MT
Utilizzazione BT
< 200 kVA

# UTENTI BT

Charcutier-Traiteur
FLEURISTE
DÉCORATION
alamy stock photo


MR
Beta
VisualLightBox.com

# CONDUTTORI

Nella scelta dei conduttori si tiene conto di

- Tenuta all'isolamento $U_0/U$ (0,6/1)
- Portata $I_z$
- Caduta di tensione $\Delta U$

$U_0$ [kV] – Valore efficace della tensione fra un conduttore e terra

U [kV] – Valore efficace della tensione fra due conduttori qualsiasi

# CORRENTE DI IMPIEGO

$$I_b \leq I_z$$

$$I_b = \mathrm{f}(U_n, \cos\varphi)$$

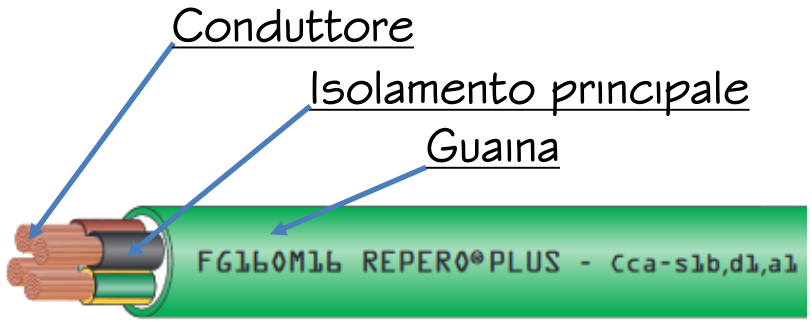
$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} U_n \cos\varphi} \qquad I_b = \frac{P}{U_n \cos\varphi}$$

Per la bassa tensione $U_n$ = 400 V in trifase
230 V in monofase

# STUFETTA DOMESTICA

# POMPA ESTRAZIONE ACQUA

# PORTATA E SEZIONE DEI CONDUTTORI




*Nominal voltage Uo/U:* 0,6/1 kV

*Maximum operating temperature:* 90°C

*Minimum operating temperature:* -15°C

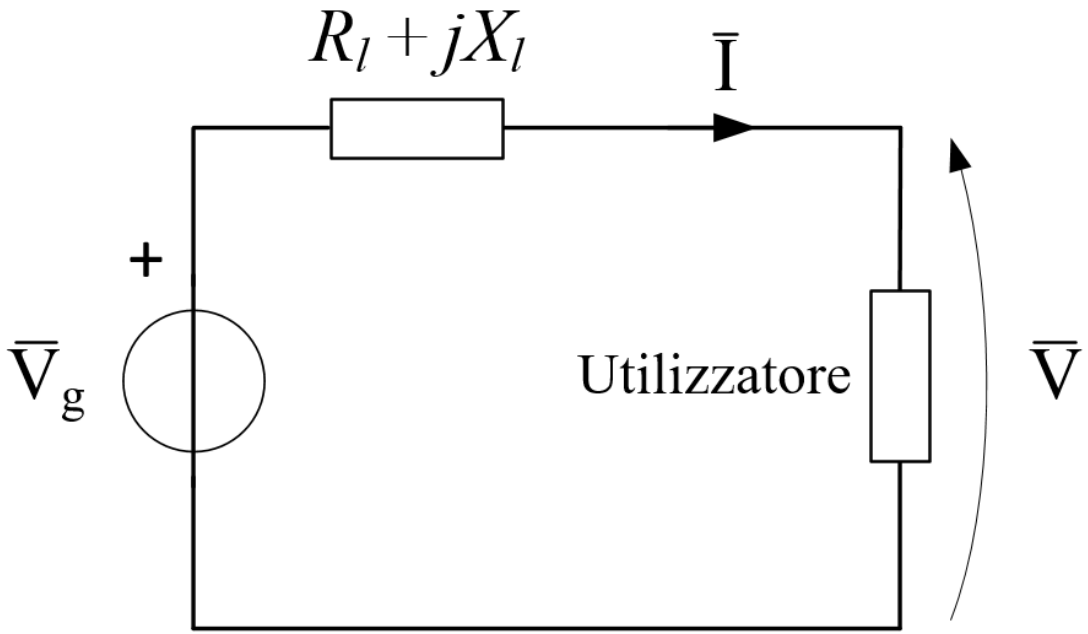
**Condizioni di impiego**
Particolarmente indicato in luoghi a rischio d'incendio e con elevata presenza di persone dove è fondamentale garantirne la salvaguardia e preservare gli impianti e le apparecchiature dall'attacco dei gas corrosivi (uffici, scuole, supermercati, cinema, teatri, discoteche ecc.) per impiego all'interno in locali anche bagnati o all'esterno. Adatto per posa fissa su murature e strutture metalliche in aria libera, in tubo o canaletta o sistemi similari. Ammessa anche la posa interrata. (rif. CEI 20-67)

$$I_b \leq I_z = f(S)$$

S [mm$^2$] – Sezione del conduttore

| Formazione<br>*Formation* | Ø indicativo conduttore<br>*Approx. conductor Ø* | Spessore medio isolante<br>*Average insulation thickness* | Spessore medio guaina<br>*Average sheath thickness* | Ø indicativo produzione<br>*Approx. production Ø* | Peso indicativo cavo<br>*Approx. cable weight* | Resistenza elettrica max a 20°C<br>*Max. electrical resistance at 20°C* | Portata di corrente *Current rating* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | In tubo in aria *In pipe in air 30°C* | Interrato *Underground 20°C* |
| n° x mm² | mm | mm | mm | mm | kg/km | ohm/km | A | A |
| 4 x 1,5 | 1,6 | 0,7 | 1,8 | 10,8 | 189 | 13,3 | 19,5 | 19 |
| 4 x 2,5 | 1,9 | 0,7 | 1,8 | 12,0 | 245 | 7,98 | 26 | 25 |
| 4 x 4 | 2,5 | 0,7 | 1,8 | 13,3 | 325 | 4,95 | 35 | 32 |
| 4 x 6 | 3,0 | 0,7 | 1,8 | 14,5 | 415 | 3,30 | 44 | 41 |
| 4 x 10 | 4,0 | 0,7 | 1,8 | 17,7 | 625 | 1,91 | 60 | 55 |
| 4 x 16 | 5,0 | 0,7 | 1,8 | 19,9 | 870 | 1,21 | 80 | 72 |
| 4 x 25 | 6,2 | 0,9 | 1,8 | 24,1 | 1300 | 0,780 | 105 | 93 |

# CADUTA DI TENSIONE




$$\Delta U = I(R_l \cos\varphi + X_l \sin\varphi)$$

$$V = V_g - \Delta U$$

# CDT E SEZIONE DEI CONDUTTORI

Fissate la lunghezza del cavo, la temperatura di esercizio e le modalità di posa

| Formazione<br>*Formation* | Ø indicativo conduttore<br>*Approx. conductor Ø* | Spessore medio isolante<br>*Average insulation thickness* | Spessore medio guaina<br>*Average sheath thickness* | Ø indicativo produzione<br>*Approx. production Ø* | Peso indicativo cavo<br>*Approx. cable weight* | Resistenza elettrica max a 20°C<br>*Max. electrical resistance at 20°C* | Portata di corrente *Current rating* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | In tubo in aria *In pipe in air 30°C* | Interrato *Underground 20°C* |
| n° x mm² | mm | mm | mm | mm | kg/km | ohm/km | A | A |
| 3 x 1,5 | 1,6 | 0,7 | 1,8 | 10,1 | 166 | 13,3 | 19,5 | 19 |
| 3 x 2,5 | 1,9 | 0,7 | 1,8 | 11,2 | 215 | 7,98 | 26 | 25 |
| 3 x 4 | 2,5 | 0,7 | 1,8 | 12,3 | 275 | 4,95 | 35 | 32 |
| 3 x 6 | 3,0 | 0,7 | 1,8 | 13,4 | 350 | 3,30 | 44 | 41 |
| 3 x 10 | 4,0 | 0,7 | 1,8 | 16,4 | 520 | 1,91 | 60 | 55 |

$$R_l = f(S)$$

$$X_l = f(S)$$

$$\Delta U \simeq k(rLI\cos\varphi + xLI\sin\varphi)$$

$$k = \begin{cases} 2\ se\ 1\emptyset \\ \sqrt{3}, se\ 3\emptyset \end{cases}$$

$$\frac{\Delta U}{U_n} \times 100 \leq 4\%$$

# STUFA INDUSTRIALE

| Formazione<br>*Formation* | Ø indicativo conduttore<br>*Approx. conductor Ø* | Spessore medio isolante<br>*Average insulation thickness* | Spessore medio guaina<br>*Average sheath thickness* | Ø indicativo produzione<br>*Approx. production Ø* | Peso indicativo cavo<br>*Approx. cable weight* | Resistenza elettrica max a 20°C<br>*Max. electrical resistance at 20°C* | Portata di corrente *Current rating* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | In tubo in aria<br>*In pipe in air 30°C* | Interrato<br>*Underground 20°C* |
| n° x mm² | mm | mm | mm | mm | kg/km | ohm/km | A | A |
| 4 x 1,5 | 1,6 | 0,7 | 1,8 | 10,8 | 189 | 13,3 | 19,5 | 19 |
| 4 x 2,5 | 1,9 | 0,7 | 1,8 | 12,0 | 245 | 7,98 | 26 | 25 |

# FUNZIONAMENTI ANOMALI

- Sovraccarico (curva di sovraccaricabilità)
- Corto circuito (integrale di Joule)
- Tensioni anomale (tra queste le sovratensioni interne ed esterne)

Per limitare la probabilità che tali condizioni anomale avvengano e per limitarne le conseguenze si utilizzano gli apparecchi di protezione

# CURVA DI SOVRACCARICABILITA'

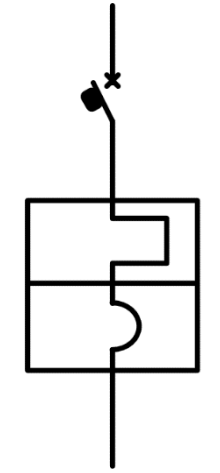
# CORTOCIRCUITO

# APPARECCHI DI PROTEZIONE

Gli apparecchi **di manovra**, **sicurezza** e **protezione** sono necessari a manovrare e proteggere gli impianti elettrici e le persone aprendo e chiudendo circuiti sia in funzionamento normale che in funzionamento anormale

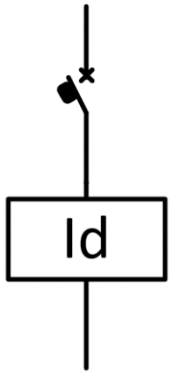
- Interruttori automatici (manovra e protezione)
- Relè magnetotermici, differenziali e di altro tipo (protezione)
- Fusibili (protezione)
- Contattori (manovra e protezione)
- Sezionatori (manovra e sicurezza)

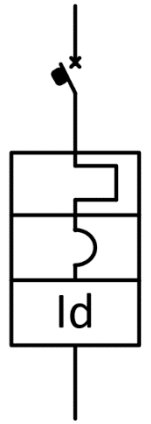
# INTERRUTTORI AUTOMATICI (RELE') MAGNETOTERMICI E FUSIBILI



Interrompono le correnti
di corto circuito e di sovraccarico

# INTERRUTTORI (RELE') DIFFERENZIALI

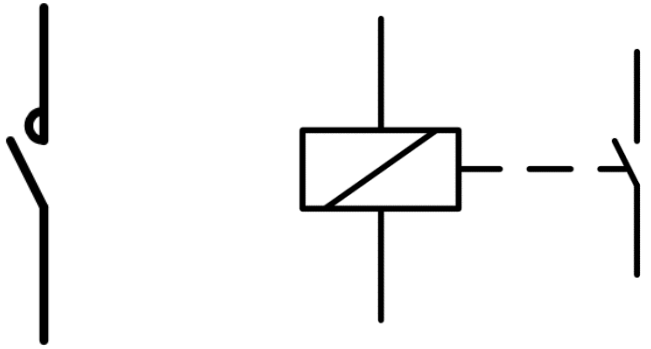





Usati per la protezione delle persone dai contatti diretti (contatto con parti attive dell'impianto) e dai contatti indiretti (contatto con parti normalmente non in tensione ma che in condizioni di guasto possono trovarsi in tensione)

# DIFFERENZIALE

# CONTATTORI E RELE' (DI ALTRO TIPO)



Per il comando (interruttori, commutatori, interruttori orari, rilevatori di movimento, ecc.) e la protezione

# SEZIONATORI

Rendono visibile il sezionamento elettrico e non possono interrompere una corrente

# ALTRI SIMBOLI

# SCARICATORI DI TENSIONE

Limitatore di tensione modulare dotato di base e moduli di protezione estraibili (3 fasi più neutro)

# PROTEZIONE DAL SOVRACCARICO

Interruttori automatici: $I_b \leq I_{prot} \leq I_z$

Fusibili: $I_f \leq 1.45 I_z$

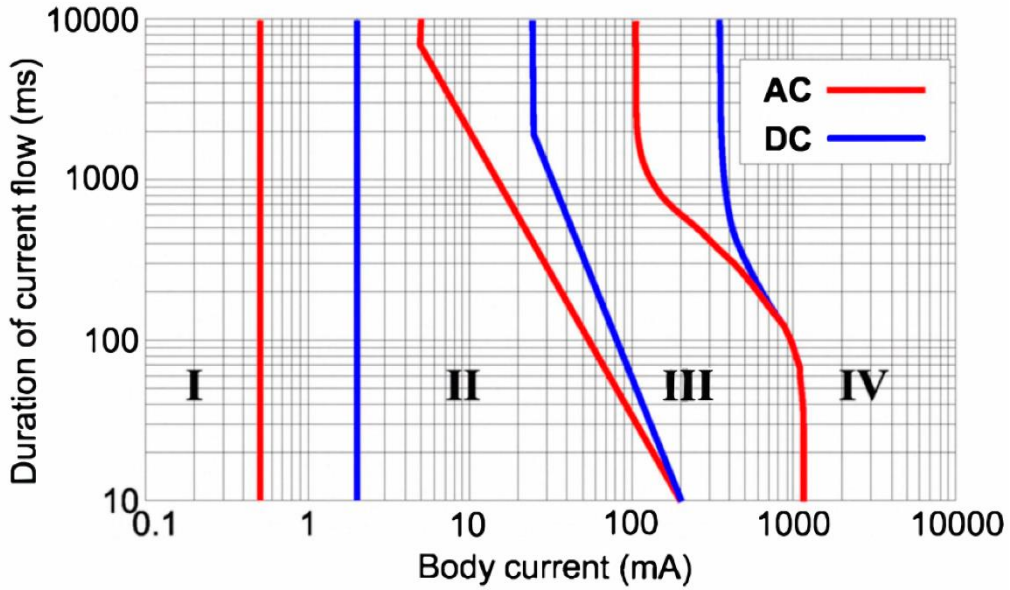
$I_b$ [A] – corrente di impiego della conduttura

$I_n$ [A] – corrente nominale del dispositivo di protezione

$I_z$ [A] – portata della conduttura

$I_f$ [A] – corrente nominale del fusibile

# EFFETTI DELLA CORRENTE NEL CORPO UMANO




I – abitualmente nessuna reazione

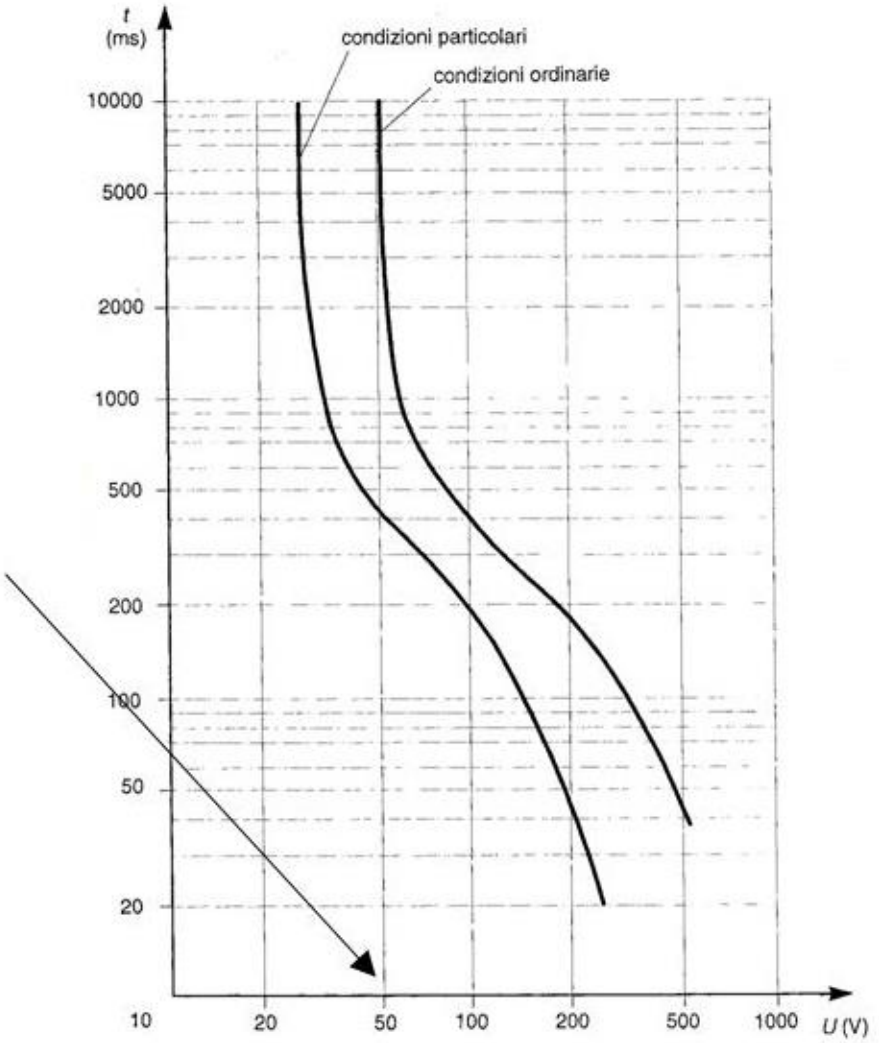
II – abitualmente nessun effetto fisiologico pericoloso

III – abitualmente nessun danno organico. Probabili contrazioni muscolari e difficoltà respiratoria, fibrillazione ventricolare e arresto cardiaco provvisorio

IV – la probabilità di fibrillazione aumenta, arresto cardiaco, arresto respiratorio, ustioni gravi

# CURVA CONVENZIONALE DI SICUREZZA

La tensione di contatto a vuoto ( $U_L$ ) è il limite convenzionale



# SISTEMI ELETTRICI BT

Nella distribuzione BT si usano sistemi trifase a tre o quattro fili, e monofase

Il neutro viene distribuito per alimentare utilizzatori monofase

Una massa è una parte metallica di una apparecchiatura elettrica accessibile alle persone e isolata dalle parti in tensione

Una massa estranea è una parte metallica che non fa parte di un impianto elettrico

# SISTEMI ELETTRICI BT

Un dispersore metallico infisso nel terreno, che ha il compito di disperdere le **correnti di guasto**, prende il nome di **messa a terra di protezione** (**dispersore di terra**)

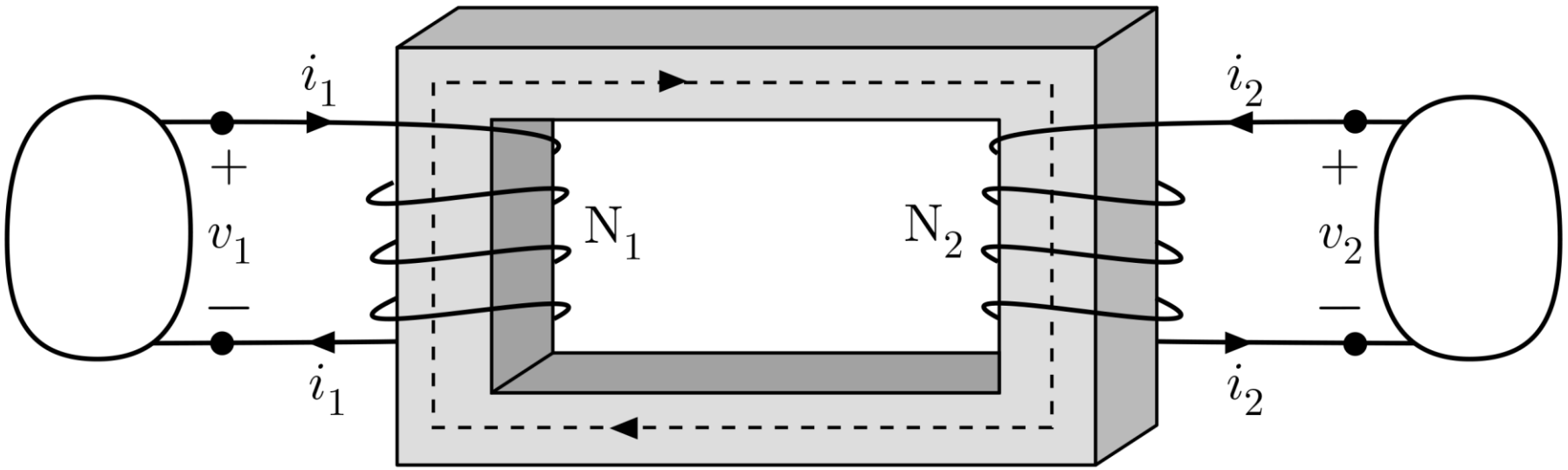
I sistemi vengono classificati in funzione del:

- Collegamento a terra del neutro (prima lettera)
- Collegamento a terra delle masse (seconda lettera)

# IL TRASFORMATORE

- Macchina elettrica statica (principio di induzione elettromagnetica)
- Monofase o trifase
- Largo impiego per adattare i livelli di tensione (ad esempio tra linee di trasmissione e di distribuzione dell'energia elettrica)

# IL TRASFORMATORE



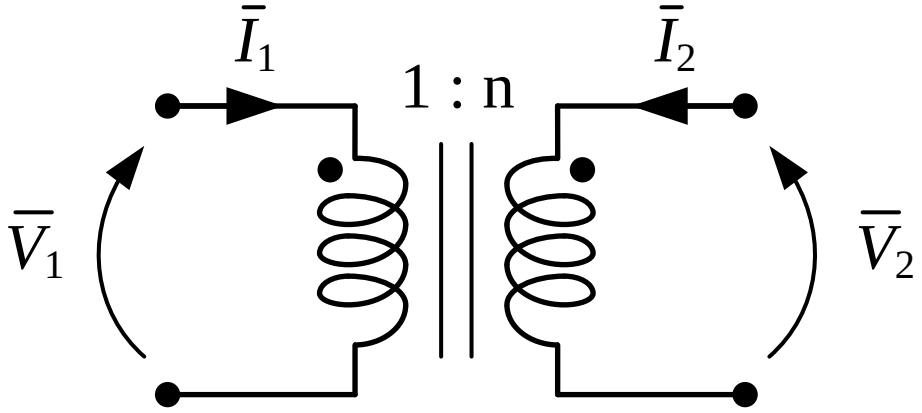

$$n = \frac{N_2}{N_1}$$

Rapporto Spire

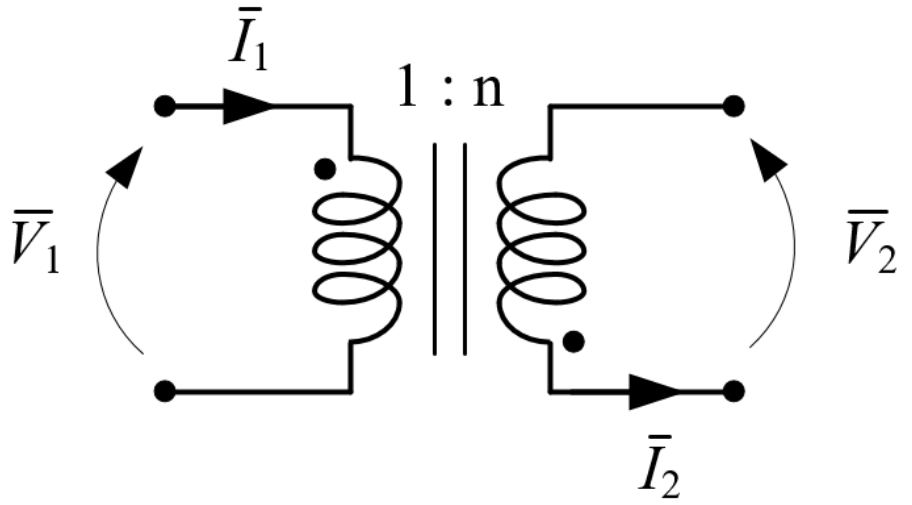


R. Perfetti, Circuiti Elettrici, Zanichelli 2014

# IL TRASFORMATORE

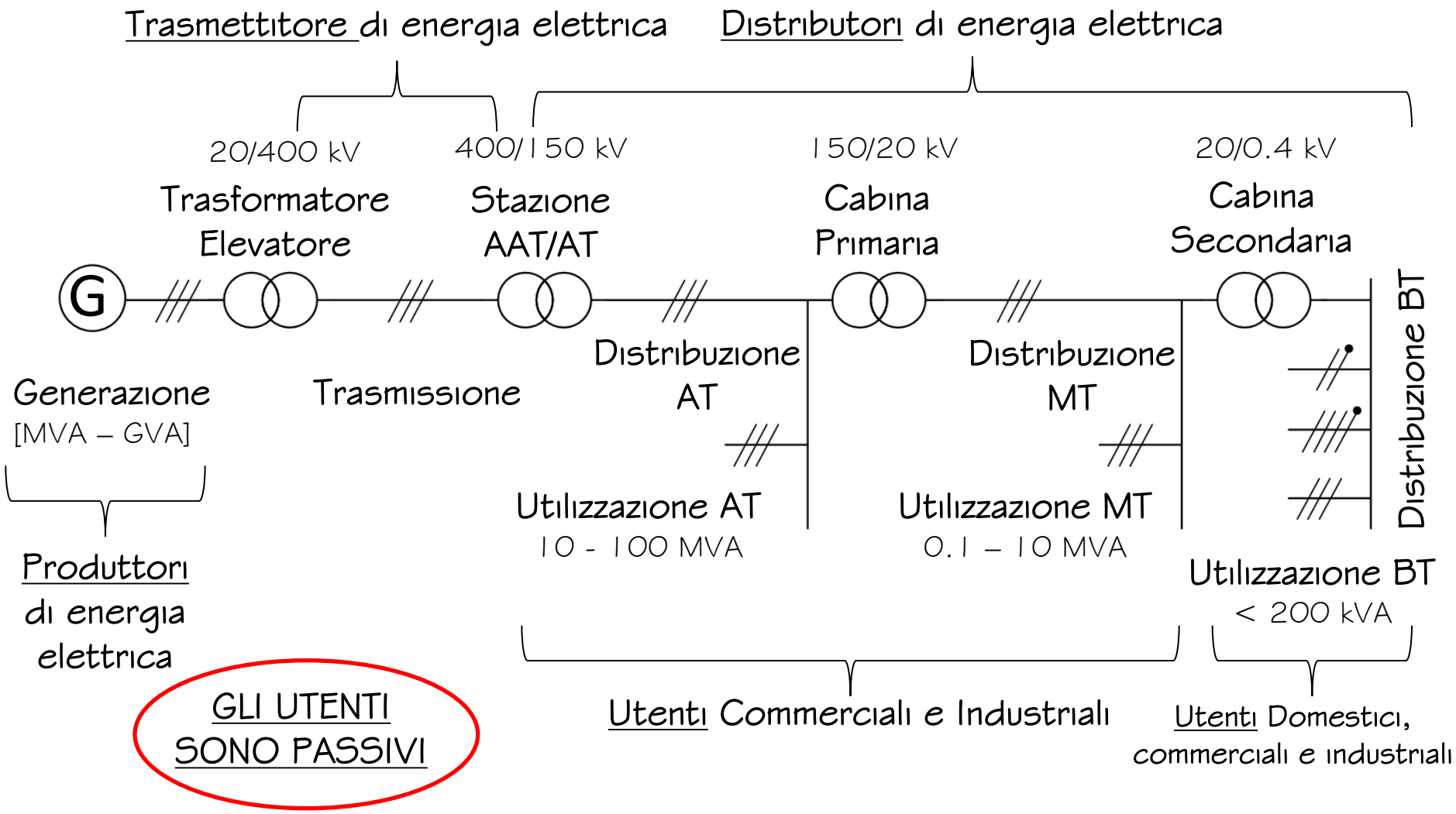



$$\begin{cases} \bar{V}_2 = n\bar{V}_1 \\ \bar{I}_2 = -\dfrac{1}{n}\bar{I}_1 \end{cases}$$

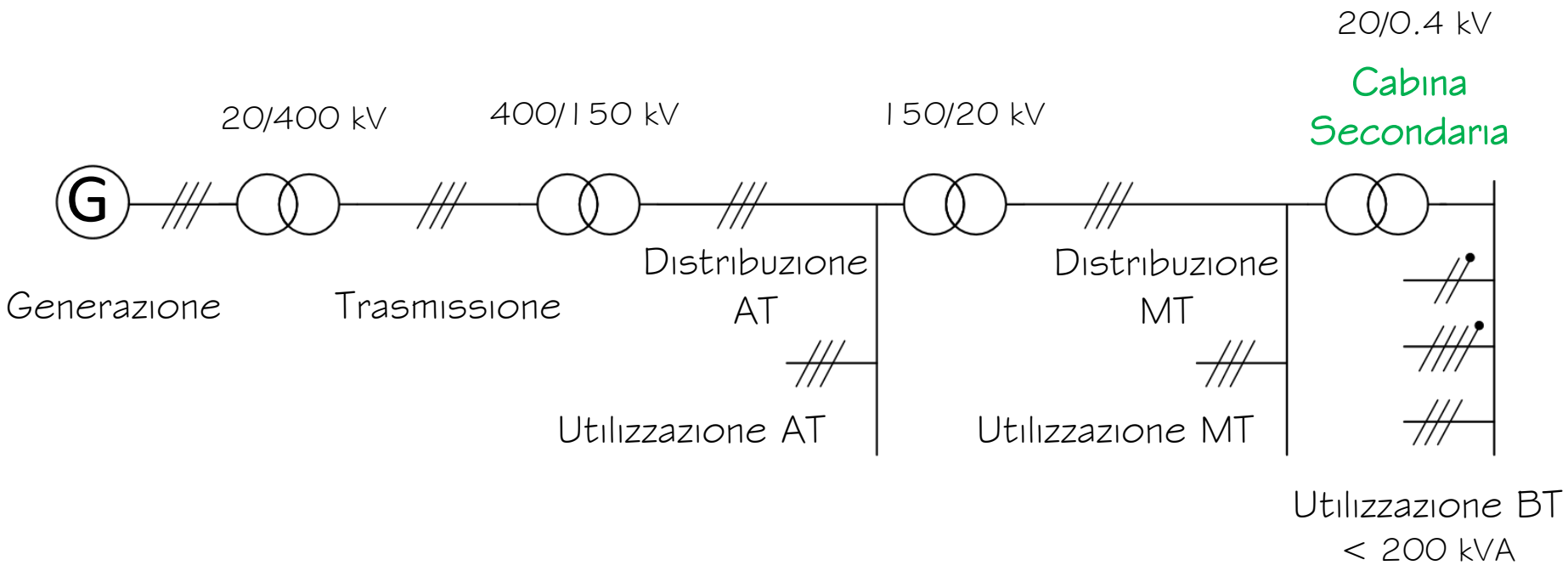



$$\begin{cases} \bar{V}_2 = -n\bar{V}_1 \\ \bar{I}_2 = \dfrac{1}{n}\bar{I}_1 \end{cases}$$

# SISTEMA ELETTRICO CENTRALIZZATO



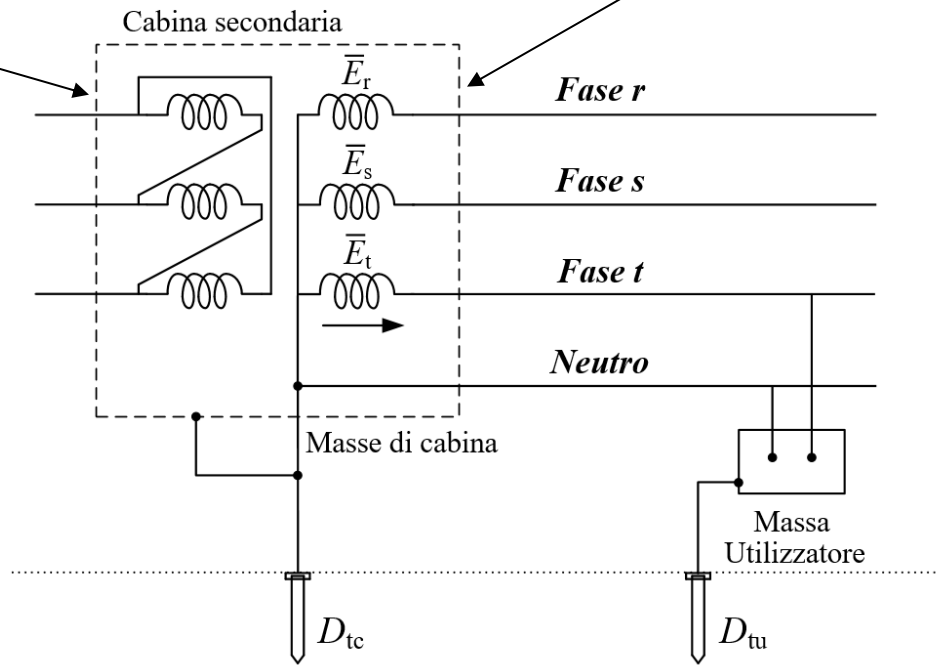
# CABINE SECONDARIE



# SISTEMA TT

LATO MT (DSO)

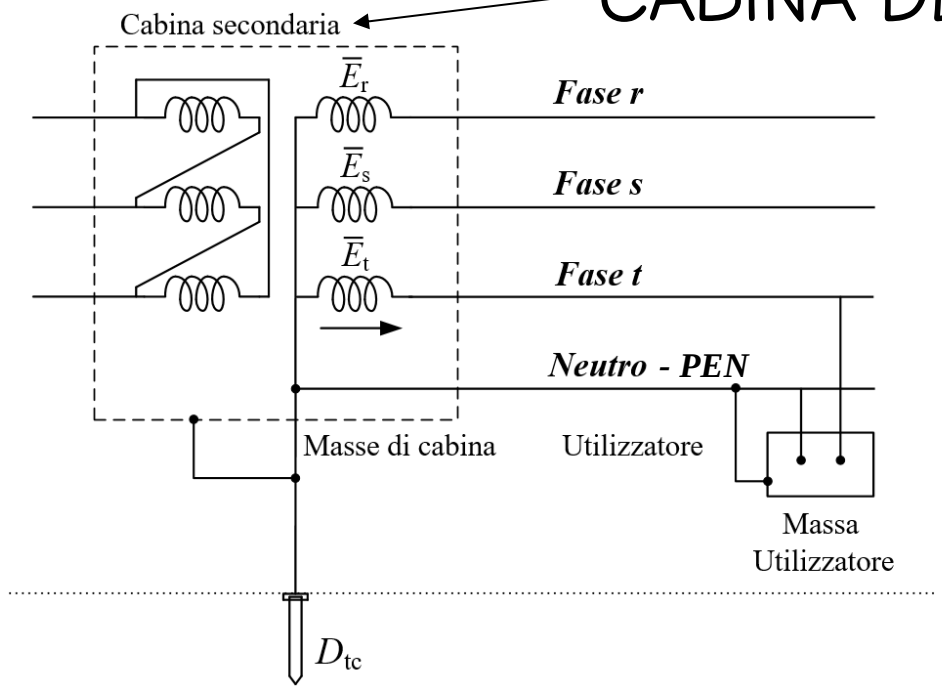
LATO BT (UTENTE)




- Il sistema è collegato a terra, tipicamente attraverso il **neutro**
- Le masse sono collegate a terra attraverso un impianto diverso da quello di messa a terra del neutro

# SISTEMA TN-C

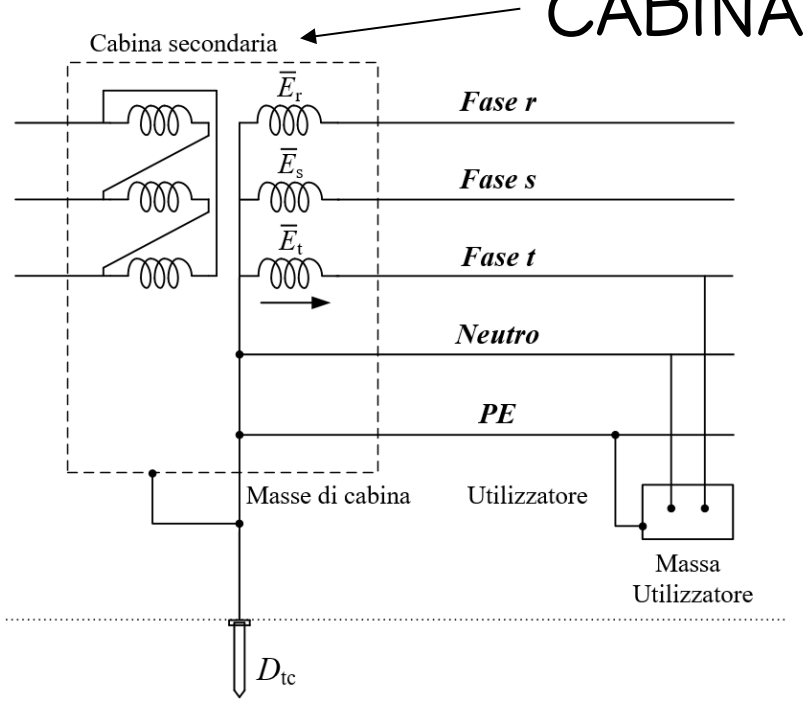
CABINA DELL'UTENTE




- Il sistema è collegato a terra, tipicamente attraverso il neutro
- Le masse sono collegate allo stesso sistema di terra tramite il neutro (PEN)

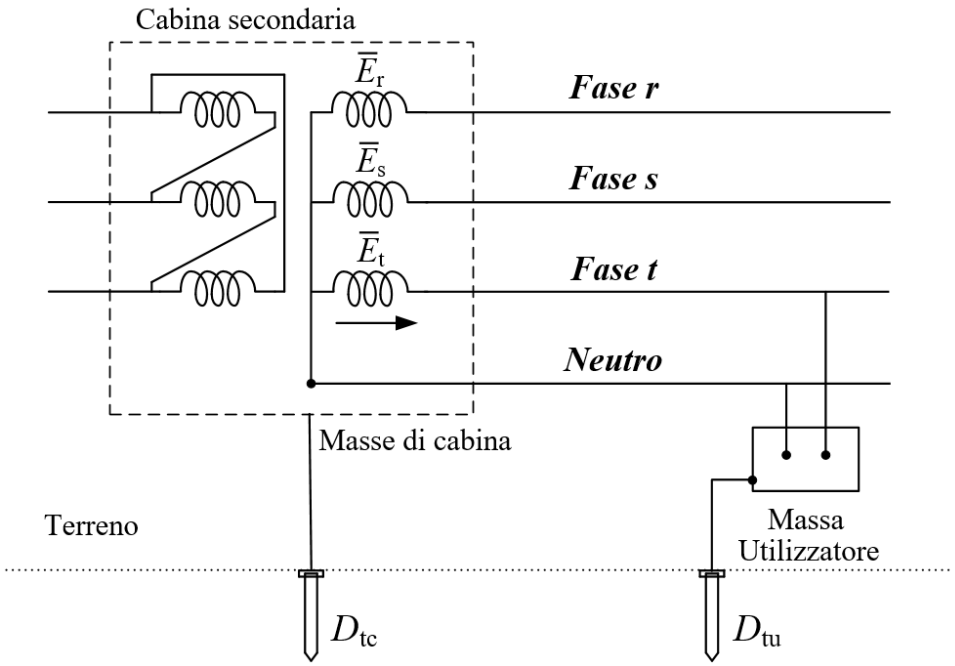
# SISTEMA TN-S

CABINA DELL'UTENTE




- Il sistema è collegato a terra, tipicamente attraverso il neutro
- Le masse sono collegate allo stesso sistema di terra tramite il conduttore di protezione PE

# SISTEMA IT




- Il neutro è isolato da terra
- Le masse sono collegate a terra

# SISTEMI ELETTRICI BT

I quattro sistemi non hanno differenze di funzionamento in regime trifase simmetrico e si comportano diversamente in caso di **guasto monofase a terra** che causa **correnti di guasto** e **tensioni anomale** di entità molto diverse a seconda del sistema

I sistemi vengono scelti in funzione di:

- Continuità del servizio
- Sicurezza

# CONTATTI DIRETTI E INDIRETTI

Un **contatto diretto** è un contatto che una persona può avere con una parte che normalmente è in tensione

Un **contato indiretto** è quello che una persona può avere con una massa

Le **misure protettive** si distinguono in misure che:

- Prevedono l'**interruzione automatica dell'alimentazione**
- Non prevedono l'interruzione automatica dell'alimentazione

# CONTATTO INDIRETTO

# CONTATTO DIRETTO

# PROTEZIONE CONTATTI INDIRETTI INTERRUZIONE AUTOMATICA DELL'ALIMENTAZIONE (SISTEMI TT)

$$V_{co} \leq U_L$$

$$V_{co} = \frac{R_{tu}}{R_{tc} + R_{tu}} E_0 \rightarrow R_{tu} \leq \frac{U_L}{E_0 - U_L} R_{tc}$$

Poiché tale condizione è spesso difficilmente realizzabile, allora si ricorre all'uso di interruttori differenziali e si deve soddisfare la condizione

$$R_{tu} I_d \leq U_L$$

# PROTEZIONE CONTATTI INDIRETTI SENZA INTERRUZIONE DELL'ALIMENTAZIONE

Ottenuta preventivamente in modi diversi:

- Uso di apparecchi a doppio isolamento (classe II)
- Separazione elettrica tra sorgente di alimentazione e impianto utilizzatore
- Utilizzo di locali equipotenziali e non connessi a terra

# TRASFORMATORE DI ISOLAMENTO

# PROTEZIONE CONTATTI DIRETTI

Vi sono tre tipi di protezione:

- Totale
- Parziale
- Addizionale tramite differenziali ad alta sensibilità (30 o 10 mA)

Isolamento delle parti attive, involucri, barriere, ostacoli, distanziamento