

Introduzione ai circuiti e studio di filtri del primo ordine^a

Francesco Polleri^{1, b} e Mattia Sotgia^{1, c}

(Gruppo A1)

¹Dipartimento di Fisica,
Università degli Studi di Genova, I-16146 Genova,
Italia

(Dated: presa dati 19 ottobre 2021, analisi dati e relazione in data 27 ottobre 2021)

Vogliamo costruire e verificare il funzionamento di un filtro passa-basso (*low-pass filter*) o passa-alto (*high-pass filter*) sfruttando i principi fisici che sono dietro al comportamento di un circuito RC posto in tensione alternata.

I. MISURAZIONE DI R

Con il multimetro da banco impostato per misure di resistenza in corrente continua colleghiamo i capi dei connettori a "banana" al multimetro e alla base di lavoro, quello nero sul GND, quello rosso sul capo +Vcc. Mettiamo in serie ai pin corrispondenti al GND e a +Vcc la nostra resistenza ed effettuiamo così la misura del suo valore reale.

II. DESCRIZIONE APPARATO SPERIMENTALE

Realizziamo un circuito come quello presente in Figura 1. Utilizziamo l'oscilloscopio sia come generatore di segnale sinusoidale che come rivelatore. Utilizzando uno sdoppiatore BNC a T possiamo dividere il segnale in uscita, e portare così uno dei due impulsi all'ingresso 1 dello strumento, per poter visualizzare e misurare la tensione in entrata (v_{in}) e il suo periodo (T). Il secondo cavo BNC lo portiamo ad uno degli ingressi della base di lavoro. In questo modo abbiamo che tutta la base di lavoro viene messa a massa (*o a terra?*) e che un pin è posto alla tensione v_{in} alternata.

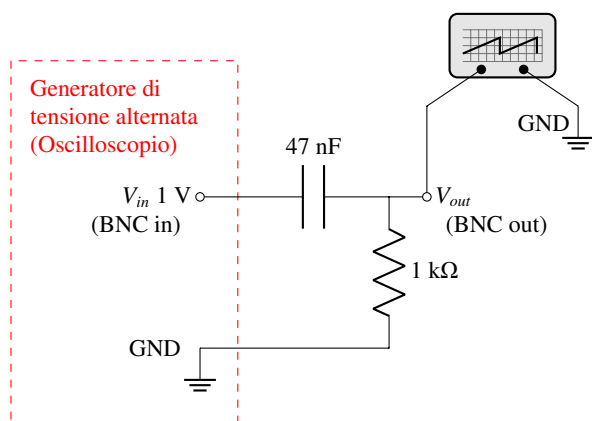


Figura 1 Circuito utilizzato per il filtro passa-alto progettato nell'esperienza, i valori di R e C sono i valori nominali riportati sul componente.

Mettiamo quindi in serie a quest'ultimo il condensatore (C) e la resistenza (R). Il capo libero della resistenza lo poniamo a massa (*o a terra?*).

Collegiamo infine un pin che sia equipotenziale ad un connettore BNC libero con il nodo di collegamento tra C ed R. Collegiamo il BNC al secondo input presente sull'oscilloscopio per visualizzare il valore di tensione in uscita (v_{out}).

Per fornire la tensione di input al sistema con il tasto Wave Gen visualizziamo l'interfaccia di generazione del segnale, che impostiamo poi su 1V di ampiezza e lasciamo la frequenza libera di essere variata nel corso della presa dati.

Per effettuare le misure di ampiezza dei segnali che leggiamo con l'oscilloscopio, con il tasto Meas accedo all'interfaccia per effettuare misure sul segnale in input. Con i tasti sul basso prima imposto la sorgente del segnale che voglio misurare (1 o 2) che tipo di misura voglio effettuare (ampiezza, periodo, ritardo) e poi imposto con il tasto Settings i parametri della misura.

Impostiamo quattro misure:

- Misura della tensione che noi forniamo al circuito, che leggiamo con la sorgente 1 dell'oscilloscopio. Impostiamo una misura di ampiezza sulla sorgente 1.
- Misura della tensione v_{out} , che leggiamo dal secondo ingresso. Impostiamo quindi una misura di ampiezza sulla sorgente 2.
- Misura del periodo del segnale, che effettuiamo sul segnale v_{in} poiché osserviamo che ha maggiore stabilità rispetto al segnale in uscita al circuito. Impostiamo una misura di Periodo sulla sorgente 1.
- Misura del ritardo del segnale v_{out} rispetto a v_{in} . Impostiamo una misura che legga la differenza temporale tra la salita della sorgente 1 e la salita adiacente del segnale 2.

Lo strumento permette di variare l'intervalli orizzontali e verticali in cui misuriamo il segnale per adattarne al meglio la visualizzazione e fornisce i valori di fondo scala relativi per le tensioni e per i tempi, necessari per ricavare l'errore.

III. METODI SPERIMENTALI

Dato lo strumento sopra descritto, variando il valore della frequenza del segnale generato, partendo da 10Hz e arri-

^a Esperienza n. 1

^b s5025011@studenti.unige.it; In presenza in laboratorio per la presa dati

^c s4942225@studenti.unige.it

Tabella I Dati grezzi (sbagliati/pre-correzione)

v_{in} (mV)		v_{out} (mV)		T (s)		dt (s)	
991	140	4.6	2	0.1	0.02	0.02	0.02
991	140	7.6	2	0.05	0.01	0.011	0.01
991	140	15.2	3	0.02	0.005	0.0046	0.005
991	140	28	4	0.01	0.002	0.0024	0.002
993	140	53	8	0.005	0.001	0.0012	0.001
991	140	125	18	0.002	0.0005	0.00045	0.0005
991	140	243	34	0.001	0.0002	0.000208	0.0002
985	140	445	62	0.0005	0.0001	$8.5e-05$	0.0001
962	140	746	104	0.0002	$5e-05$	$2.1e-05$	$5e-05$
951	140	877	124	0.0001	$2e-05$	$6e-06$	$2e-05$
945	140	913	128	$5e-05$	$1e-05$	$1.6e-06$	$1e-05$
946	140	934	140	$2e-05$	$5e-06$	$2.8e-07$	$5e-06$
946	140	940	140	$1e-05$	$2e-06$	$5e-08$	$2e-06$

vando a 100kHz rilevando tre valori (1-2-5) per ogni decade, annotiamo i valori di v_{in} , v_{out} , T e dt , con i relativi fondo scala.

Riportiamo in Tabella III i valori misurati.

IV. CALCOLI E FIT DATI

Vogliamo ottenere il valore della funzione di trasferimento $|H[v]|$, ma poichè si tratta di una funzione complessa preferiamo scriverla in termini del suo modulo e della sua fase. Otteniamo che

$$|H[v]| = \frac{v_{in}}{v_{out}}$$

e inoltre

$$|H[v]| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{R^2 C^2 \omega^2}}}$$

che con $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ diventa

$$|H[v]| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (1)$$

con $\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{v_0}{v}$.

Allo stesso modo per la fase che otteniamo come

$$\varphi[v] = 2\pi \frac{dt}{T}$$

lo possiamo vedere anche come

$$\varphi[v] = \arctan\left(\frac{1}{RC\omega}\right)$$

che diventa

$$\varphi[v] = \arctan\left(\frac{v_0}{v}\right) \quad (2)$$

con $\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{v_0}{v}$.

Dal data sheet dello strumento ricaviamo come calcolare gli errori massimi sui dati misurati che con la regola del 3σ rendiamo statistici. Quindi propaghiamo per ottenere gli errori su $|H[v]|$ e $\varphi[v]$.

I valori sono riportati in Tabella II.

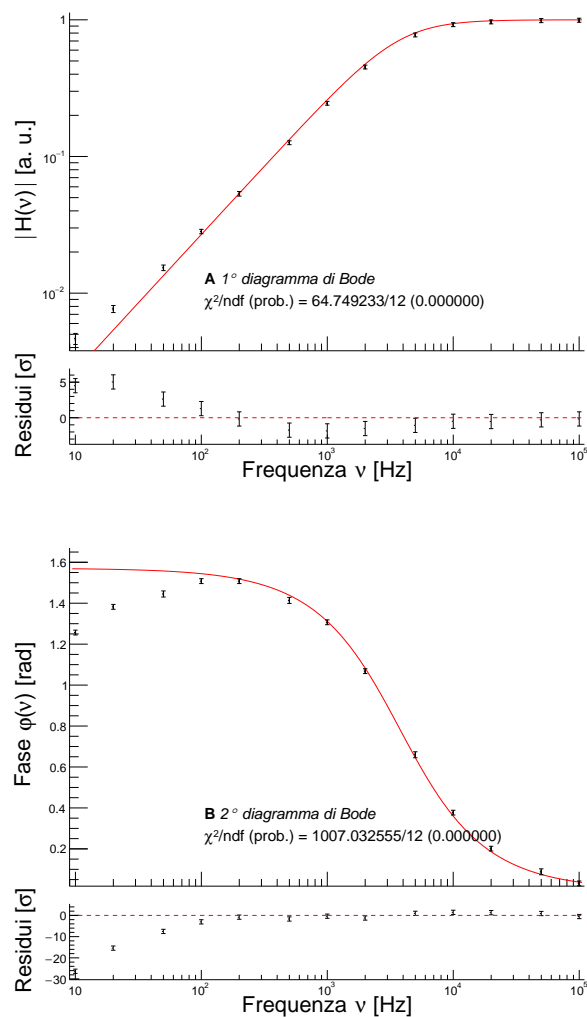


Figura 2 Diagrammi di Bode, grafico preliminare precedente ad una considerazione sui punti a $v < 100\text{Hz}$.

Dalle tabelle ricaviamo un grafico in scala bilogarithmica della funzione di trasferimento rispetto alla frequenza (v) e un grafico in scala semilogarithmica sulle frequenze di $\varphi[v]$ rispetto a v . Riportiamo in Figura 2 il grafico prodotto.

Eseguiamo un fit dei dati sulla base delle funzioni (1) e (2), e otteniamo quindi il valore di v_0 che abbiamo impostato co-

Tabella II Valori calcolati (sbagliati/pre-correzione)

Funzione di trasferimento $ H(\nu) $ [a. u.]		Fase $\varphi(\nu)$ [rad]		Frequenza ν [Hz]	
0.00464178	0.000432655	1.25664	0.0118382	10	0.0184752
0.00766902	0.000454563	1.3823	0.0118859	20	0.0369504
0.015338	0.000720135	1.44513	0.0148892	50	0.11547
0.0282543	0.00105838	1.50796	0.011938	100	0.184752
0.0533736	0.00206972	1.50796	0.011938	200	0.369504
0.126135	0.00411336	1.41372	0.0148732	500	1.1547
0.245207	0.00788168	1.3069	0.0118568	1000	1.84752
0.451777	0.0145359	1.06814	0.0117749	2000	3.69504
0.775468	0.0252639	0.659734	0.0145902	5000	11.547
0.922187	0.0304294	0.376991	0.0116292	10000	18.4752
0.966138	0.0318566	0.201062	0.0116143	20000	36.9504
0.987315	0.0336198	0.0879646	0.0145118	50000	115.47
0.993658	0.0337266	0.0314159	0.0116085	100000	184.752

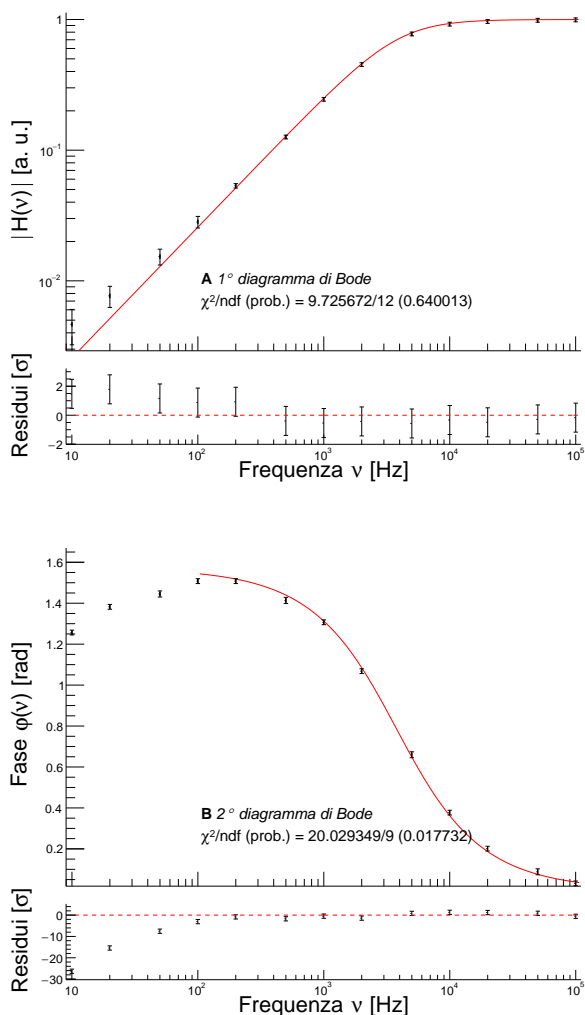


Figura 3 Diagrammi di Bode realizzati successivamente alle considerazioni effettuate sui punti a $\nu < 100\text{Hz}$, come riportato nelle considerazioni in sezione V.

me parametro nella funzione di fit dal I e dal II diagramma di Bode.

Analizziamo i valori di χ^2/ndf di $\text{prob}(\chi^2)$ e osserviamo la compatibilità dei valori trovati. Riportiamo il risultato delle considerazioni e delle operazioni eseguite nell'appendice A.

V. CONSIDERAZIONI SU RUMORE A BASSE FREQUENZE

Analizzando il risultato ottenuto dal fit del primo diagramma di Bode, osserviamo che i punti corrispondenti a frequenze minori di 100Hz si discostano in modo evidente dalla curva di fit (lo si vede bene osservando il grafico dei residui). Questo fatto è legato alla presenza di un "rumore" che appunto si manifesta in modo più significativo a basse frequenze perché la sua ampiezza diventa confrontabile con quella di v_{out} . Di conseguenza l'errore da noi impostato, che deriva solamente dal data sheet dello strumento, ci porta a sottostimare molto l'errore su questa misura. Per compensare questa sottostima osserviamo ad occhio, servendoci delle tacche del fondoscala riportate sullo schermo dello strumento, lo spessore della curva del segnale di v_{out} . Facendo ciò osserviamo che l'errore vero su questa misura risulta essere circa il 10% del valore di fondoscala. Impostiamo quindi che tutti i punti a frequenza minore di 100Hz abbiano come errore massimo il 10% del fondo scala. In tal modo osserviamo che tali punti, attraverso le bande d'errore rientrano nella curva di fit senza modificarla. Riportiamo i valori così calcolati in Tabella III.

Anche nel secondo diagramma notiamo un comportamento simile dei dati. Tuttavia, poiché la fase è direttamente legata al valore del ritardo, la situazione è più complicata da sistemare. Infatti il ritardo viene misurato dall'oscilloscopio come distanza temporale tra due successive salite del segnale 1 rispetto al segnale 2 però la presenza del rumore può portare lo strumento a confondere la salite del segnale v_{out} con la salite del rumore e non è quindi in grado di dare una lettura corretta di tale intervallo temporale. Inoltre questo errore non è neppure correggibile ad occhio quindi abbiamo preferito impostare come limite per il fit dei dati i punti a frequenza maggiore di 100Hz.

RELAZIONE DI LABORATORIO N. 00 (2021)

Tabella III Valori calcolati (corretti)

Funzione di trasferimento $ H[\nu] $ [a. u.]		Fase $\varphi[\nu]$ [rad]		Frequenza ν [Hz]		
0.00464178	0.00140224	1.25664	0.0118382	10		0.0184752
0.00766902	0.00140915	1.3823	0.0118859	20		0.0369504
0.015338	0.00212639	1.44513	0.0148892	50		0.11547
0.0282543	0.00286993	1.50796	0.011938	100		0.184752
0.0533736	0.00206972	1.50796	0.011938	200		0.369504
0.126135	0.00411336	1.41372	0.0148732	500		1.1547
0.245207	0.00788168	1.3069	0.0118568	1000		1.84752
0.451777	0.0145359	1.06814	0.0117749	2000		3.69504
0.775468	0.0252639	0.659734	0.0145902	5000		11.547
0.922187	0.0304294	0.376991	0.0116292	10000		18.4752
0.966138	0.0318566	0.201062	0.0116143	20000		36.9504
0.987315	0.0336198	0.0879646	0.0145118	50000		115.47
0.993658	0.0337266	0.0314159	0.0116085	100000		184.752

Appendice A: Output analisi dati prima della correzione

```
Processing analisi_RC_filter.C...

*****
PRIMO DIAGRAMMA DI BODE (AMPIEZZA)
*****

FCN=64.7492 FROM MIGRAD   STATUS=CONVERGED      24 CALLS      25 TOTAL
                        EDM=2.78419e-09   STRATEGY= 1      ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER          VALUE      ERROR      STEP      FIRST
NO.  NAME              VALUE      ERROR      SIZE      DERIVATIVE
 1  p0                 3.71715e+03   5.54290e+01   2.19424e-01   -1.34626e-06

** CHI2 / NDF ( PROB. ) 64.7492 / 12 ( 3.03328e-09 )

Frequenza di Taglio da |H(w)|, v = 3717.15 +/- 55.429 Hz

*****
SECONDO DIAGRAMMA DI BODE (FASE)
*****

FCN=1007.03 FROM MIGRAD   STATUS=CONVERGED      18 CALLS      19 TOTAL
                        EDM=1.07153e-07   STRATEGY= 1      ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER          VALUE      ERROR      STEP      FIRST
NO.  NAME              VALUE      ERROR      SIZE      DERIVATIVE
 1  p0                 3.76629e+03   6.10946e+01   2.27456e-04   -3.14644e-02

** CHI2 / NDF ( PROB. ) 1007.03 / 12 ( 5.76595e-208 )

Frequenza di Taglio da phi(w), v = 3766.29 +/- 61.0946 Hz
** Verifica compatibilita => COMPATIBILE
```

Appendice B: Output analisi dati dopo la correzione

```
Processing analisi_RC_filter.C...

*****
PRIMO DIAGRAMMA DI BODE (AMPIEZZA)
*****

FCN=9.72567 FROM MIGRAD   STATUS=CONVERGED      22 CALLS      23 TOTAL
                        EDM=5.57532e-08   STRATEGY= 1      ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER          VALUE      ERROR      STEP      FIRST
NO.  NAME              VALUE      ERROR      SIZE      DERIVATIVE
 1  p0                 3.88205e+03   6.75748e+01   1.08018e-01   -4.94157e-06

** CHI2 / NDF ( PROB. ) 9.72567 / 12 ( 0.640013 )

Frequenza di Taglio da |H(w)|, v = 3882.05 +/- 67.5748 Hz

*****
SECONDO DIAGRAMMA DI BODE (FASE)
*****

FCN=20.0293 FROM MIGRAD   STATUS=CONVERGED      18 CALLS      19 TOTAL
                        EDM=1.45607e-07   STRATEGY= 1      ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER          VALUE      ERROR      STEP      FIRST
NO.  NAME              VALUE      ERROR      SIZE      DERIVATIVE
 1  p0                 3.78558e+03   6.12585e+01   3.28702e-05   -3.66507e-02

** CHI2 / NDF ( PROB. ) 20.0293 / 9 ( 0.0177321 )

Frequenza di Taglio da phi(w), v = 3785.58 +/- 61.2585 Hz
** Verifica compatibilita => COMPATIBILE
```

Appendice C: Programma di analisi dati

```
#include<vector>
#include<cmath>
#include<iostream>
#include<fstream>
#include<string>

#include<TCanvas.h>
#include<TGraphErrors.h>
#include<TF1.h>
#include<TStyle.h>
```

```
#include<TAxis.h>
#include<TMath.h>
#include<TLatex.h>
#include<TLegend.h>

const double title_size = 21;

std::string rawdata = "../dati/presa_dati_2021_10_19_seconda_versione.txt";

void print_mmsg(std::string mmsg){
    std::cout << std::endl
        << " *****" << std::endl
        << " " << mmsg << std::endl
        << " *****" << std::endl
        << std::endl;
}

void print_stat(TF1* _f){
    std::cout << std::endl
        << "*** " << "CHI2 / NDF ( PROB. ) "
        << _f->GetChisquare() << " / " << _f->GetNDF() << " ( " << _f->GetProb() << " ) "
        << std::endl << std::endl;
}

std::string compatible(double G1, double errG1,
                        double G2, double errG2){
    double abs_values = abs(G2-G1);
    double err_abs_val = 3*sqrt(pow(errG1, 2) + pow(errG2, 2));
    if(abs_values<err_abs_val){
        return "COMPATIBILE";
    }
    return "NON-COMPATIBILE";
}

void set_TGraphAxis(TGraphErrors* g, std::string ytitle){
    g->SetTitle("");
    g->GetYaxis()->SetTitle(ytitle.c_str());
    g->GetYaxis()->SetTitleOffset(2);
    g->GetYaxis()->SetTitleFont(43);
    g->GetYaxis()->SetTitleSize(title_size);
    g->GetYaxis()->SetLabelFont(43);
    g->GetYaxis()->SetLabelSize(12);
    g->GetYaxis()->CenterTitle();

    g->GetXaxis()->SetTickLength(0.05);
}

void set_ResidualsAxis(TGraphErrors* rg, std::string xtitle, std::string ytitle="Residui [#sigma]"){
    rg->GetXaxis()->SetTitle(xtitle.c_str());
    rg->GetXaxis()->SetTitleOffset(5);
    rg->GetXaxis()->SetTitleFont(43);
    rg->GetXaxis()->SetTitleSize(title_size);

    rg->GetYaxis()->SetTitle(ytitle.c_str());
    rg->GetYaxis()->SetTitleOffset(2);
    rg->GetYaxis()->SetTitleFont(43);
    rg->GetYaxis()->SetTitleSize(title_size);
    rg->GetYaxis()->CenterTitle();

    rg->GetYaxis()->SetLabelFont(43);
    rg->GetYaxis()->SetLabelSize(12);
    rg->GetYaxis()->SetNdivisions(5, 5, 0);
    rg->GetXaxis()->SetLabelFont(43);
    rg->GetXaxis()->SetLabelSize(12);
    rg->GetXaxis()->CenterTitle();

    rg->GetXaxis()->SetTickLength(0.08);
}

double max_to_stat(double value){
    return value/(std::sqrt(3));
}

// funzione calcolo incertezza a partire da fondo scala (per Qualsiasi grandezza)
// tab. VALORI | Grandezza misurata | errPercent | partitions | fondoscala (rangel)
//              | V (tensione)         | 3.5%       | 8          | variabile
//              | T (periodi)           | 7.7%       | ?          | variabile

double get_VRangeErr(double errPercent, int partitions, double rangel){
    return errPercent * partitions * rangel;
}

double get_TRangeErr(double rangel, double errPercent = 0.0016, int partition = 10){
    return rangel * errPercent * partition;
}

double getH(double vin, double vout){
    return vout / vin;
}

double get_HErr(double Vin, double Vout, double eVin, double eVout){
    return sqrt(pow(eVout / Vin, 2) + pow(eVin * Vout / pow(Vin, 2), 2));
}

double get_phi(double T, double dt){
    return 2 * M_PI * dt / T;
}

double get_phiErr(double T, double dt, double eT, double edt){
    return 2 * M_PI * sqrt(pow(edt/T, 2) + pow(dt * eT/(pow(T, 2)), 2));
}

void analisi_RC_filter(){
    gStyle->SetFrameLineWidth(0);
    gStyle->SetTextFont(43);
    gStyle->SetLineStylePS(1);

    std::ifstream data(rawdata.c_str());

    std::ofstream out_rawdata("../misc/rawdata_correct.txt"); // carbon copy of original data
    std::ofstream out_cleandata("../misc/cleandata_correct.txt"); // values from rawdata with error
    std::ofstream out_computeddata("../misc/computeddata_correct.txt"); // computed data for final graph

    double Vin, fsVin, Vout, fsVout, T, fsT, dt, fsdt;

    TCanvas* c1 = new TCanvas("c1", "", 600, 1000);
    c1->SetMargin(0.16, 0.06, 0.12, 0.06);
    c1->SetFillStyle(4000);
    c1->Divide(1, 2);
}
```

```
// Analisi 1mo diagramma di BODE, |H(w)| su w
c1->cd(1);

TGraphErrors* H_plot = new TGraphErrors();
H_plot->SetName("H_plot");
TF1* H_fit = new TF1("Hf", "1/sqrt(1+(pow([0]/x, 2)))");
H_fit->SetParameter(0, 3e3);

TGraphErrors* H_resd = new TGraphErrors();
TF1* H_res_f = new TF1("H_rf", "0", 10, 1e6);
H_res_f->SetLineStyle(2);

TLatex* header = new TLatex();
header->SetTextFont(43);
header->SetTextSize(15);

TPad* Hp1 = new TPad("", "", 0.0, 0.3, 1.0, 1.0);
TPad* Hp2 = new TPad("", "", 0.0, 0.0, 1.0, 0.295);
Hp1->SetMargin(0.14, 0.06, 0.0, 0.06);
Hp1->SetFillStyle(4000);
Hp1->SetLogx();
Hp1->SetLogy();
Hp1->Draw();
Hp2->SetMargin(0.14, 0.06, 0.4, 1.0);
Hp2->SetFillStyle(4000);
Hp2->SetLogx();
Hp2->Draw();

// Analisi 2do diagramma di BODE, phi su w
c1->cd(2);

TGraphErrors* phi_plot = new TGraphErrors();
phi_plot->SetName("phi_plot");
TF1* phi_fit = new TF1("phi_f", "atan([0]/x)");
phi_fit->SetParameter(0, 3e3);
phi_fit->SetParLimits(0, 1e3, 1e4);

TGraphErrors* phi_resd = new TGraphErrors();
TF1* phi_res_f = new TF1("phi_rf", "0", 10, 1e6);
phi_res_f->SetLineStyle(2);

TLatex* phi_header = new TLatex();
phi_header->SetTextFont(43);
phi_header->SetTextSize(15);

TPad* phi_p1 = new TPad("", "", 0.0, 0.3, 1.0, 1.0);
TPad* phi_p2 = new TPad("", "", 0.0, 0.0, 1.0, 0.295);
phi_p1->SetMargin(0.14, 0.06, 0.0, 0.06);
phi_p1->SetFillStyle(4000);
phi_p1->SetLogx();
phi_p1->Draw();
phi_p2->SetMargin(0.14, 0.06, 0.4, 1.0);
phi_p2->SetFillStyle(4000);
phi_p2->SetLogx();
phi_p2->Draw();

for(int i=0; data >> Vin >> fsVin >> Vout >> fsVout >> T >> fsT >> dt >> fsdt; i++){
    out_rawdata << Vin << " " << fsVin << " " << Vout << " " << fsVout << " " << T << " " << fsT << " " << dt << " " << fsdt << std::endl;
    double eVin, eVout;
    if(fsVin<=0.01){
        eVin = max_to_stat(get_VRangeErr(0.045, 8, fsVin));
    }else{
        eVin = max_to_stat(get_VRangeErr(0.035, 8, fsVin));
    }
    if(1/T<=100){
        // Correzione per punti sotto i 100Hz
        eVout = max_to_stat(get_VRangeErr(0.15, 8, fsVout));
    }else{
        if(fsVout<=0.01){
            eVout = max_to_stat(get_VRangeErr(0.045, 8, fsVout));
        }else{
            eVout = max_to_stat(get_VRangeErr(0.035, 8, fsVout));
        }
    }
    double eT = max_to_stat(get_TRangeErr(fsT));
    double edt = max_to_stat(get_TRangeErr(fsdt));

    out_cleandata << Vin << " " << eVin << " " << Vout << " " << eVout << " " << T << " " << eT << " " << dt << " " << edt << std::endl;

    H_plot->SetPoint(i, 1 / T, Vout / Vin);
    H_plot->SetPointError(i, eT/pow(T, 2), get_HErr(Vin, Vout, eVin, eVout));

    phi_plot->SetPoint(i, 1 / T, 2 * M_PI * dt / T);
    phi_plot->SetPointError(i, eT/pow(T, 2), get_phiErr(T, dt, eT, edt));

    out_computeddata << Vout / Vin << " " << get_HErr(Vin, Vout, eVin, eVout) << " "
        << 2 * M_PI * dt / T << " " << 2 * M_PI * sqrt(pow(edt/T, 2) + pow(dt * eT/(pow(T, 2)), 2)) << " "
        << 1 / T << " " << eT/pow(T, 2) << std::endl;
}
out_rawdata << "EOF" << std::endl;
out_cleandata << "EOF" << std::endl;
out_computeddata << "EOF" << std::endl;

// Grafico 1 Bode
print_mmsg("PRIMO DIAGRAMMA DI BODE (AMPIEZZA)");
Hp1->cd();
Hp1->Draw("ap");
Hp1->Fit("Hf", "", "");

std::string H_stat="#chi^2)/ndf (prob.) = "
+std::to_string(H_fit->GetChiSquare())+"/"
+std::to_string(H_fit->GetNDF())
+" (" +std::to_string(H_fit->GetProb())+")";

header->DrawLatexMDC(0.35, 0.15, ("#splitline{#bf{A} #it{1#circ diagramma di Bode}}{" + H_stat + "}").c_str());

print_stat(H_fit);

// RESIDUI
Hp2->cd();

for(int i=0; i<H_plot->GetN(); i++){
    H_resd->SetPoint(i, H_plot->GetX()[i], (H_plot->GetY()[i] - H_fit->Eval(H_plot->GetX()[i]))/H_plot->GetEY()[i]);
    H_resd->SetPointError(i, 0, 1);
}
H_resd->Draw("ap");
```

```
H_res_f->Draw("same");

double frequenza_taglio_amp = H_fit->GetParameter(0);
double err_frequenza_taglio_amp = H_fit->GetParError(0);

std::cout << "Frequenza di Taglio da |H(w)|, v = " << frequenza_taglio_amp << " +/- " << err_frequenza_taglio_amp << " Hz" << std::endl;

// Grafico 2 Bode
print_mmsg("SECONDO DIAGRAMMA DI BODE (FASE)");
phi_p1->cd();
phi_plot->Draw("ap");
phi_plot->Fit("phi_f", "", "", 100, 1e6);

std::string phi_stat="#chi^{2}/ndf (prob.) = "
+std::to_string(phi_fit->GetChisquare())+"/"+
+std::to_string(phi_fit->GetNDF())
+" (" +std::to_string(phi_fit->GetProb())+" )";

phi_header->DrawLatexNDC(0.35, 0.15, ("#splitline{#bf{B} #it{2#circ diagramma di Bode}}{" + phi_stat + "}").c_str());

print_stat(phi_fit);

// RESIDUI
phi_p2->cd();

for(int i=0; i<phi_plot->GetN(); i++){
    phi_resd->SetPoint(i, phi_plot->GetX()[i], (phi_plot->GetY()[i] - phi_fit->Eval(phi_plot->GetX()[i]))/phi_plot->GetY()[i]);
    phi_resd->SetPointError(i, 0, 1);
}
phi_resd->Draw("ap");
phi_res_f->Draw("same");

double frequenza_taglio_fase = phi_fit->GetParameter(0);
double err_frequenza_taglio_fase = phi_fit->GetParError(0);

std::cout << "Frequenza di Taglio da phi(w), v = " << frequenza_taglio_fase << " +/- " << err_frequenza_taglio_fase << " Hz" << std::endl;

std::cout << "*** Verifica compatibilita => " << compatible(frequenza_taglio_amp, err_frequenza_taglio_amp, frequenza_taglio_fase, err_frequenza_taglio_fase) << std::endl;

set_TGraphAxis(H_plot, "#left|H(#nu)#right| [a. u.]");
set_ResidualsAxis(H_resd, "Frequenza #nu [Hz]");

set_TGraphAxis(phi_plot, "Fase #varphi(#nu) [rad]");
set_ResidualsAxis(phi_resd, "Frequenza #nu [Hz]");

c1->SaveAs("../fig/RC_bode_corretto.pdf");

return;
}

#ifdef __CINT__
int main(){
    analisi_RC_filter();
    return 0;
}
#endif
```