



Circuito de *Pre-Charge*

Projeto, Dimensionamento e Escolha de Componentes

Nome
Thiago Saber

E-mail
thiago.saber@uem.com.br



Contato

Thiago Duque Saber de Lima
Departamento de Inovação
Av. Empresarial Park Sul
Centro Empresarial Park Sul
Matias Barbosa - Minas Gerais
CEP: 36120-000
Contato: thiago.saber@uem.com.br
+55 (32) 98872-8559

Projeto Híbrido - Circuito de *Pre-Charge*

Esse relatório tem como objetivo descrever o desenvolvimento do circuito de *pre-charge* para o conversor de potência buck-boost bidirecional, utilizado no projeto híbrido. Contém a revisão teórica necessária para o projeto do circuito de *pre-charge*, o dimensionamento e especificação dos componentes e simulações que validem o projeto.

Changelog

v1.0 2023-06-13

Versão inicial. Contém introdução sobre o assunto, metodologia de projeto, dimensionamento e escolha de componentes, além de simulação.

Sumário

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 2 | Revisão Teórica | 3 |
| 3 | Dimensionamento | 5 |
| 3.1 | Para $V_s = 700\text{ V}$ | 5 |
| 3.2 | Para $V_s = 1400\text{ V}$ | 7 |
| 4 | Escolha de Componentes | 9 |
| 4.1 | Resistor | 9 |
| 4.2 | Contator | 10 |
| 4.3 | Cabos | 12 |
| 5 | Simulação | 14 |
| | Referências | 15 |
| | Anexos | 16 |
| | Anexo I | 16 |
| | Anexo II | 16 |

1 Introdução

O conversor buck-boost projetado para o caminhão híbrido está ilustrado na Figura 1. Conforme demonstrado, há a existência de bancos capacitivo na entrada do conversor, em paralelo com as baterias, e na saída, em paralelo DC+ e DC-.

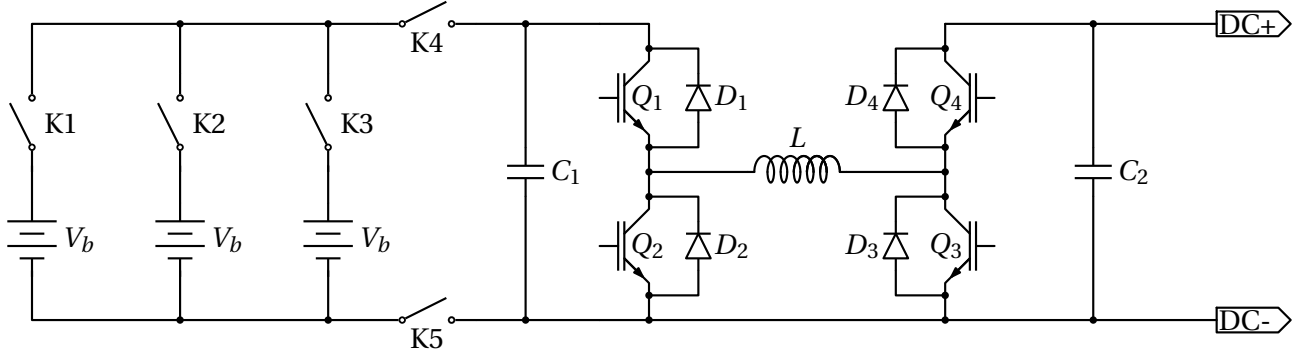


Figura 1: Conversor Buck Boost Bidirecional.

Para o funcionamento ideal do sistema híbrido são necessários alguns cuidados com os contadores, uma vez que eles são os repensáveis por conectar os circuitos. Um cuidado em especial que deve ser tomado são em relação as altas correntes, uma vez que pode ocorrer o efeito de solda (vulgarmente chamado de **cola**) dos seus contatos.

Os principais fatores que resultam na solda dos terminais são:

- **Curto circuito:** resultam em uma alta corrente nos contatos. Quando há circuitos de proteção, como fusíveis, esse se abre, porém a passagem de alta corrente no contator resulta em uma alta dissipação de potência, que aquece os contatos e os soldam;
- **Choques e vibrações:** essas variações podem abrir levemente o contator, o que resulta em arcos elétricos que esquentam pequenos pontos nos terminais. Ao fechar novamente o contato, esses pontos quentes podem se solidificar, unificando os contatos;
- **Corrente inicial de carregamento do capacitor:** Ao se fechar o contator com o banco capacitivo descarregado, a corrente inicial do circuito é altíssima, causando o aquecimento e solda dos contatos. O nome desse fenômeno é *inrush current*, sendo o principal causador de solda nos contatos do contator. Na Figura 1 está demonstrado esse fenômeno.

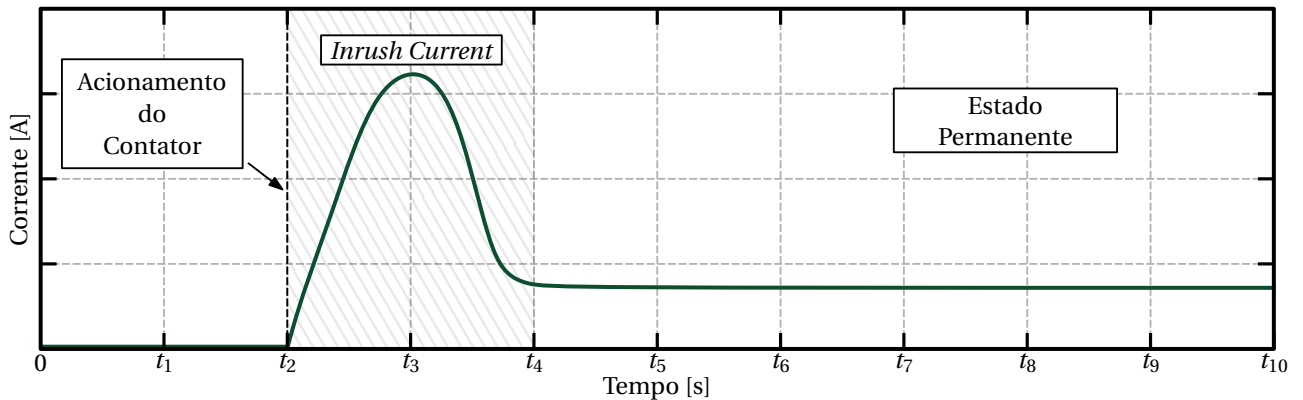
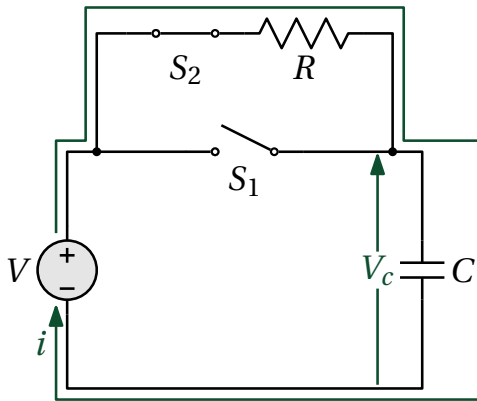


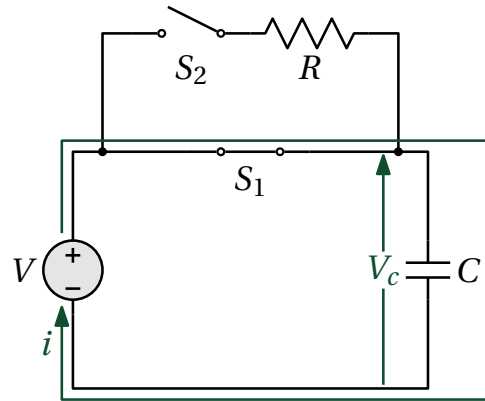
Figura 2: Corrente de acionamento.

Como demonstrado na Figura 2, logo ao se fechar o contator, em t_2 , a corrente que passa pelo contator é alta, atingindo um pico bem superior que a corrente de estado permanente, caracterizando a *inrush current*. Tal fenômeno ocorre pois o capacitor inicialmente funciona como um curto-circuito.

Nesse sentido, são utilizados circuitos de *pre-charge* para evitar a alta corrente inicial e os efeitos de solda nos contatos dos contadores. O circuito mais utilizado e simples de ser implementado é o **resistor de *pre-charge***, em que é colocado um resistor e um novo contator em paralelo com o contator no qual deseja-se evitar a *inrush current*. Na Figura 3 está demonstrado o funcionamento desse circuito.



(a) Carregamento do capacitor pelo resistor de *pre-charge*.



(b) Funcionamento do circuito em estado permanente.

Figura 3: Funcionamento do circuito de *pre-charge*.

Quando deseja-se iniciar o sistema, com o banco capacitivo descarregado, é acionado o contator S_2 em serie com o resistor de *pre-charge* R . O resistor limita a corrente de *inrush* do circuito, determinado pela constante de tempo de um circuito RC τ . Após um certo tempo especificado pelo projetista, com o capacitor parcialmente carregado, S_1 é fechado e S_2 é aberto, fazendo com que o sistema atue em condições normais. É interessante observar que o resistor foi colocado após o contator. Essa prática é comum e bem vista pois diminui o número de elementos energizados para o sistema desligado.

Esse relatório tem como objetivo o projeto de um circuito de *pre-charge* para o conversor demonstrado na Figura 1. Sendo assim, será feita a revisão teórica necessária para o projeto do circuito de *pre-charge*, o dimensionamento dos componentes para o conversor buck-boost bidirecional, a especificação dos componentes que serão utilizados e demonstradas simulações que comprovem os resultados esperados.

2 Revisão Teórica

Quando S_2 está fechado é formado um circuito RC simples. A constante de tempo do sistema (τ), ou seja, o tempo para que o capacitor atinja 62,3% da tensão final, é dado conforme (1).

$$\tau = R \cdot C \quad (1)$$

Em que:

- τ : Constante de tempo do sistema;
- R : Resistor de *pre-charge*;
- C : Banco capacitivo.

O contator S_2 deverá ficar acionado por um tempo " t " que resulte em uma carga de 99,33% do capacitor, o que corresponde a cinco constantes de tempo. Tal porcentagem de carga é assumida no desenvolvimento para veículos elétricos como forma de reduzir variações bruscas de corrente no sistema.

Dessa forma, é possível escrever t em função de τ em (2).

$$t = 5 \cdot \tau \quad (2)$$

Considerando o circuito RC durante o *pre-charge*, a curva de carga do capacitor pode ser dada de acordo com (3).

$$V_c(t) = V_s(t) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3)$$

Em que:

- V_c : Tensão no banco capacitivo;
- V_s : Tensão da bateria;
- t : Tempo.

A corrente que passa pelo contator ($i(t)$) durante o tempo de *pre-charge* é dado pela (4).

$$i(t) = \frac{V_s(t) - V_c(t)}{R} \quad (4)$$

De forma geral, as formas de onda de corrente e tensão utilizando um circuito de *pre-charge* podem ser exemplificados pela Figura 4.

Considerando um tempo de *pre-charge* longo, normalmente acima de três constantes de tempo, o resistor irá dissipar a mesma quantidade de energia que a armazenada no capacitor completamente carregado. A energia armazenada no capacitor (E) é dada de acordo com (5).

$$E = \frac{C \cdot V_s^2}{2} \quad (5)$$

Dessa forma, o resistor utilizado deverá ser capaz de dissipar a mesma energia encontrada em (5). Para o cálculo de potência, devido ao baixo tempo de *pre-charge*, podemos utilizar a potência média para o dimensionamento do resistor. Esse tipo de simplificação é permitida pois normalmente resistores de potência conseguem ir em potências muito superiores a nominal

por um curto período de tempo. Dessa forma, é possível encontrar a potência média requerida em (6).

$$P_m = \frac{E}{t} \quad (6)$$

A curva de potência instantânea do resistor é dada por (7).

$$P = R \cdot i^2(t) \quad (7)$$

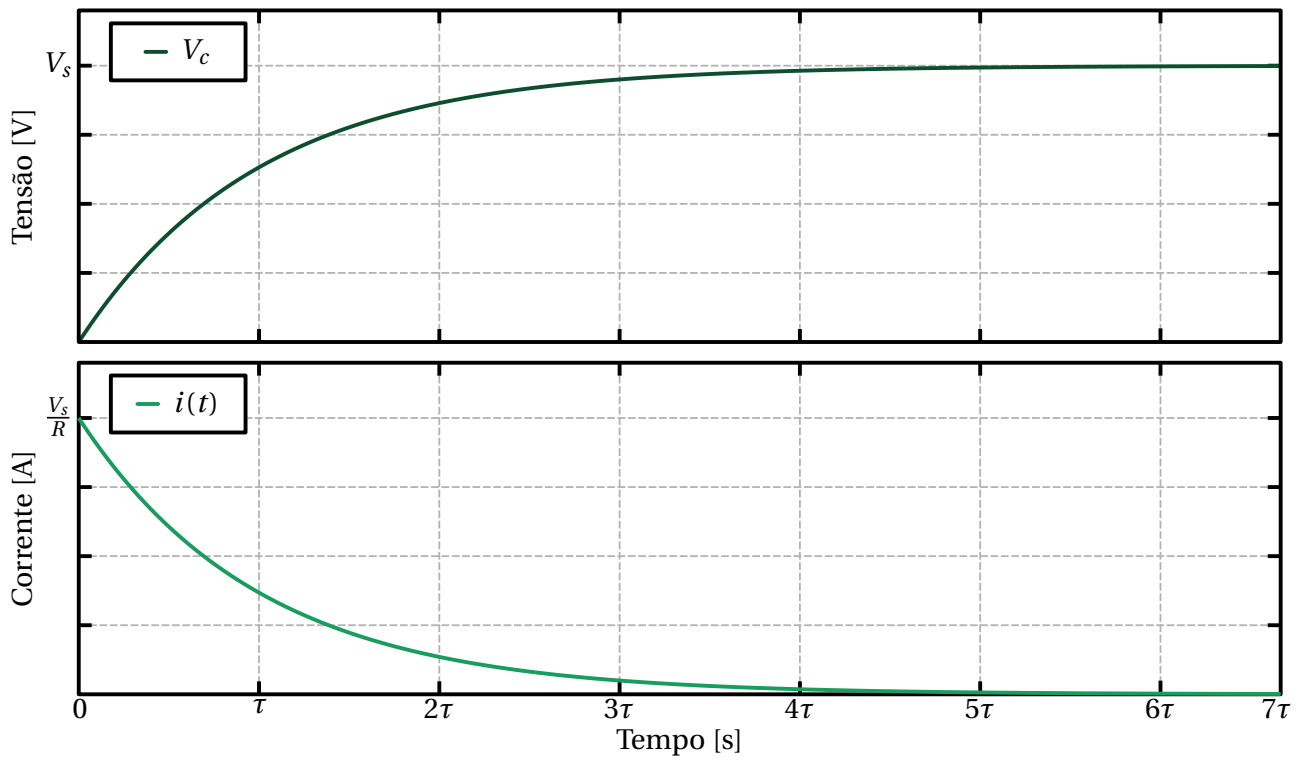


Figura 4: Formas de ondas típicas com o circuito de *pre-charge*.

3 Dimensionamento

Para o dimensionamento do resistor e contator utilizados para *pre-charge* foi utilizada a seguinte metodologia:

- Estabelecido um tempo t para o carregamento de 99,33% do capacitor;
- Encontrar a constante de tempo através de (2);
- Encontrar o valor para resistência de *pre-charge* através de (1);
- Observar as curvas de tensão e corrente através de (3) e (4) e verificar o maximo de corrente;
- Verificar a energia armazenada no capacitor através de (5);
- Verificar a potência média requerida do resistor através de (6);
- Escolher um resistor levando em conta a potência média requerida e a resistência;
- Escolher um contator levando em consideração a corrente máxima e máxima tensão no nos terminais..

Para o projeto do conversor buck-boost, será feita a análise para dois níveis de tensão diferentes: $V_s = 700\text{ V}$ e $V_s = 1400\text{ V}$. Tais valores correspondem a meio *pack* de baterias, valor que será utilizado inicialmente para testes, e ao máximo valor do banco de baterias, respectivamente. O valor utilizado para o banco capacitivo é o mesmo do projeto, $C = 9.4\text{ mF}$. Foi feito um código para fazer as análises em função de uma lista de tempos de *pre-charge* estabelecidos. Esse código pode ser visto no Anexo I (**Código 1** ou no gitlab da empresa, com o nome de **precharge-calculator**).

3.1 Para $V_s = 700\text{ V}$

Considerando os passos demonstrados na metodologia, foram calculadas a curva de tensão, corrente e potência instantânea para diferentes tempos de carregamento. Na Figura 5 estão ilustradas essas curvas.

Na Figura 6 estão ilustrados os valores de resistência máxima para cada tempo de *pre-charge*, conforme demonstrado na Figura 5.

Após analisados os valores obtidos nas Figuras 5 e 6 foi escolhido o tempo total de carregamento $t = 2\text{ s}$ com base nos modelos de resistor existentes no mercado, tendo em consideração preço, valor de resistência, potência máxima e possível associação serie/paralelo.

Com o tempo total de carregamento definido, a constante de tempo do sistema é dada em (8).

$$t = 5 \cdot \tau \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{2}{5} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\tau = 0.4\text{ s}} \quad (8)$$

Com a constante de tempo encontrada em (8), é possível encontrar o valor do resistor de *pre-charge* em Equação 9.

$$\tau = R \cdot C \quad \Rightarrow \quad R = \frac{0,4}{9,4 \cdot 10^{-3}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{R = 42.55\ \Omega} \quad (9)$$

O máximo de corrente é dado de acordo com (10).

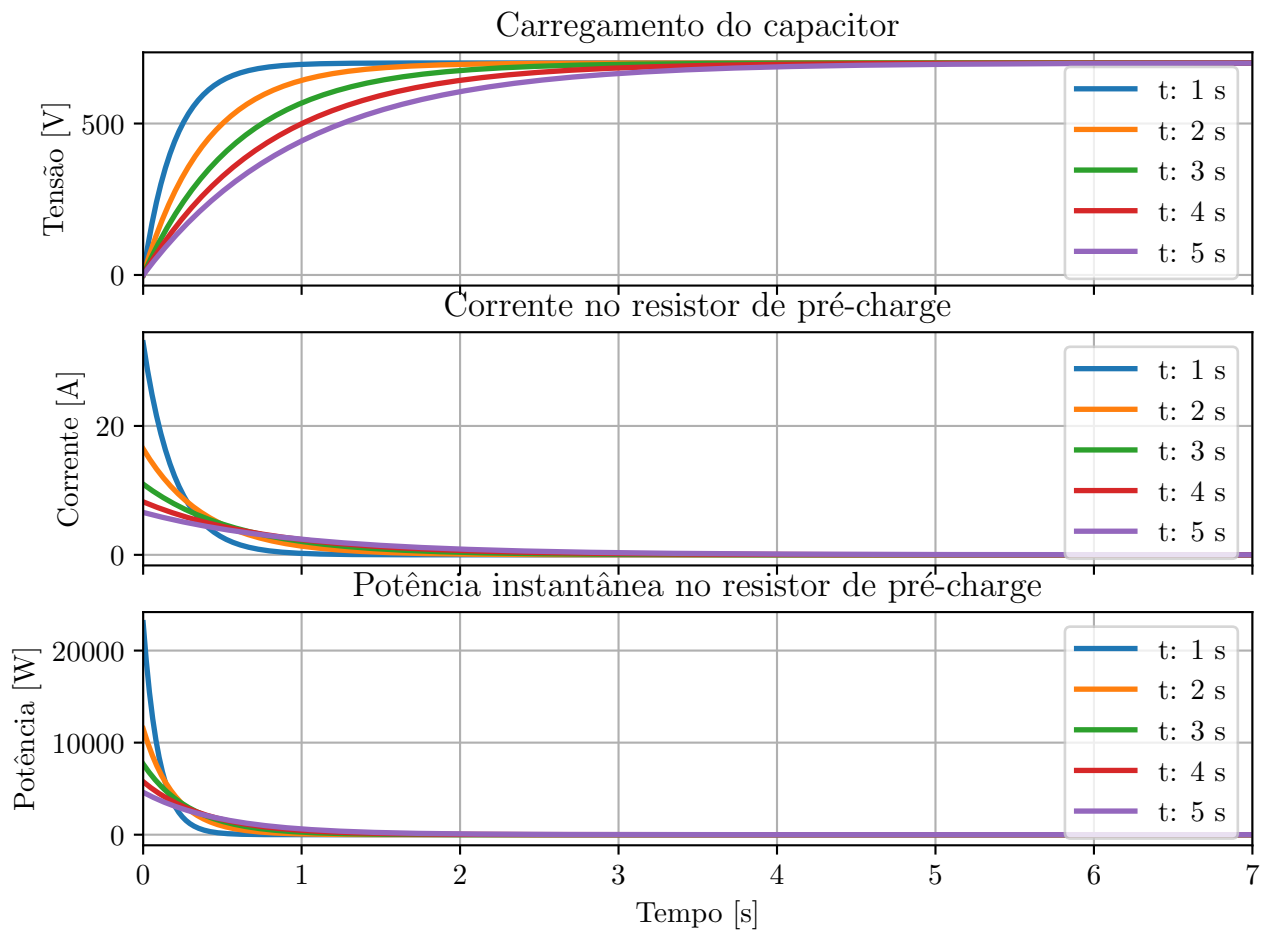


Figura 5: Curvas para cada *pre-charge*.

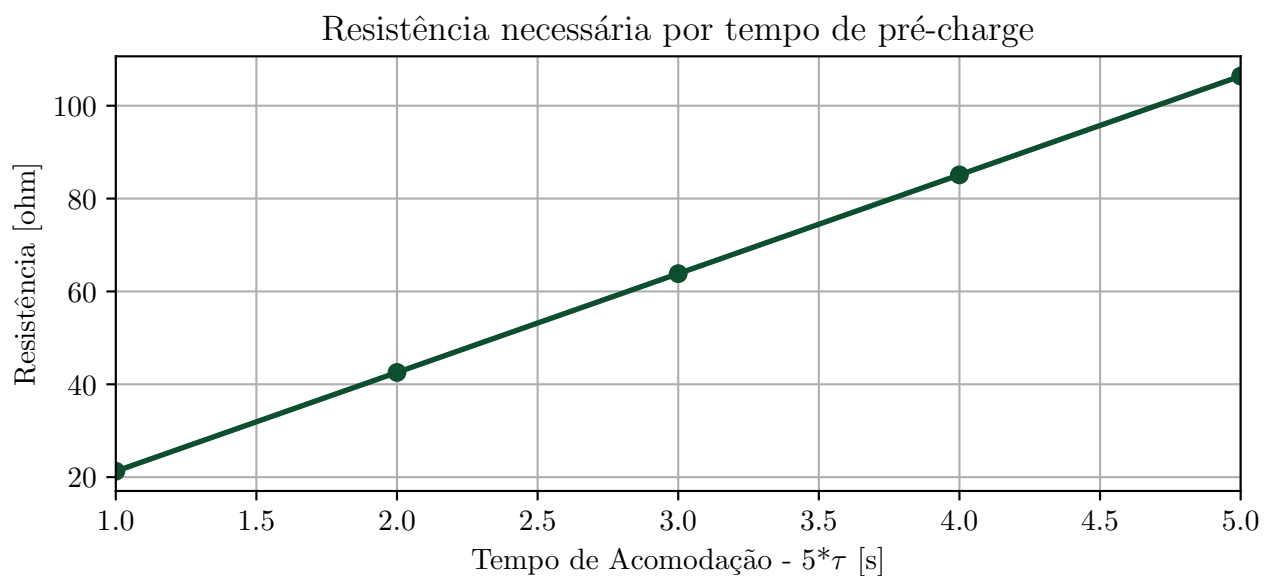


Figura 6: Resistores para cada tempo de *pre-charge*.

$$i(t) = \frac{V_s - V_c(t)}{R} \Rightarrow i(0) = \frac{700 - 0}{42,55} \Rightarrow \boxed{i(0) = 16.45 \text{ A}} \quad (10)$$

A energia armazenada no capacitor é obtida em (11).

$$E = \frac{C \cdot V^2}{2} \Rightarrow E = \frac{9,4 \cdot 10^{-3} \cdot 700^2}{2} \Rightarrow \boxed{E = 2303 \text{ J}} \quad (11)$$

Com isso, a potência média do resistor deve ser conforme (12).

$$P_m = \frac{E}{t} \Rightarrow P_m = \frac{2303}{2} \Rightarrow \boxed{P_m = 1151.5 \text{ W}} \quad (12)$$

3.2 Para $V_s = 1400 \text{ V}$

Considerando os passos demonstrados na metodologia, foram calculadas a curva de tensão, corrente e potência instantânea para diferentes tempos de carregamento. Na Figura 7 estão ilustradas essas curvas.

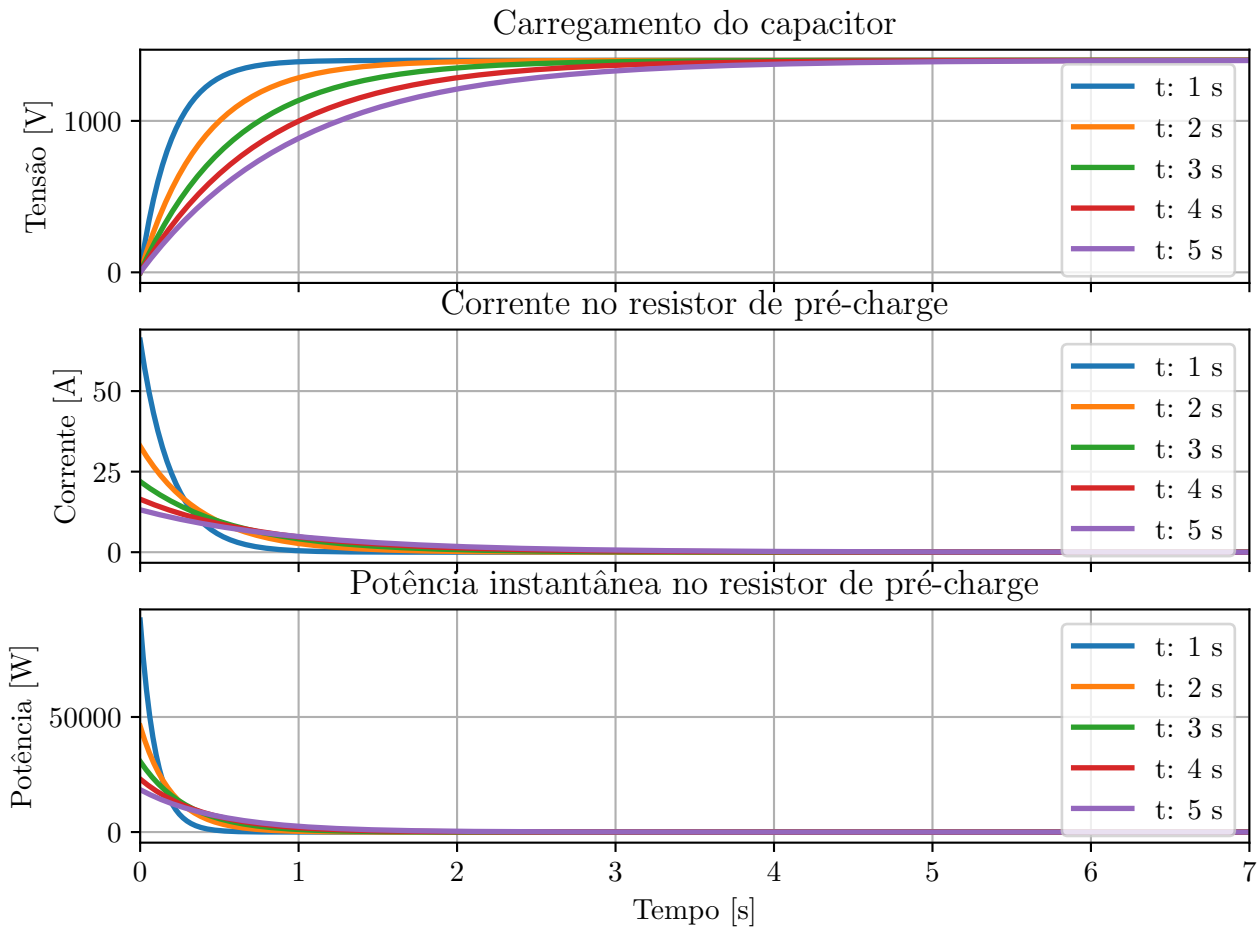


Figura 7: Curvas para cada *pre-charge*.

Na Figura 8 estão ilustrados os valores de resistência máxima para cada tempo de *pre-charge*. É interessante notar que o valor do resistor não depende do nível de tensão utilizado, dependendo apenas do valor da constante de tempo e da capacitância.

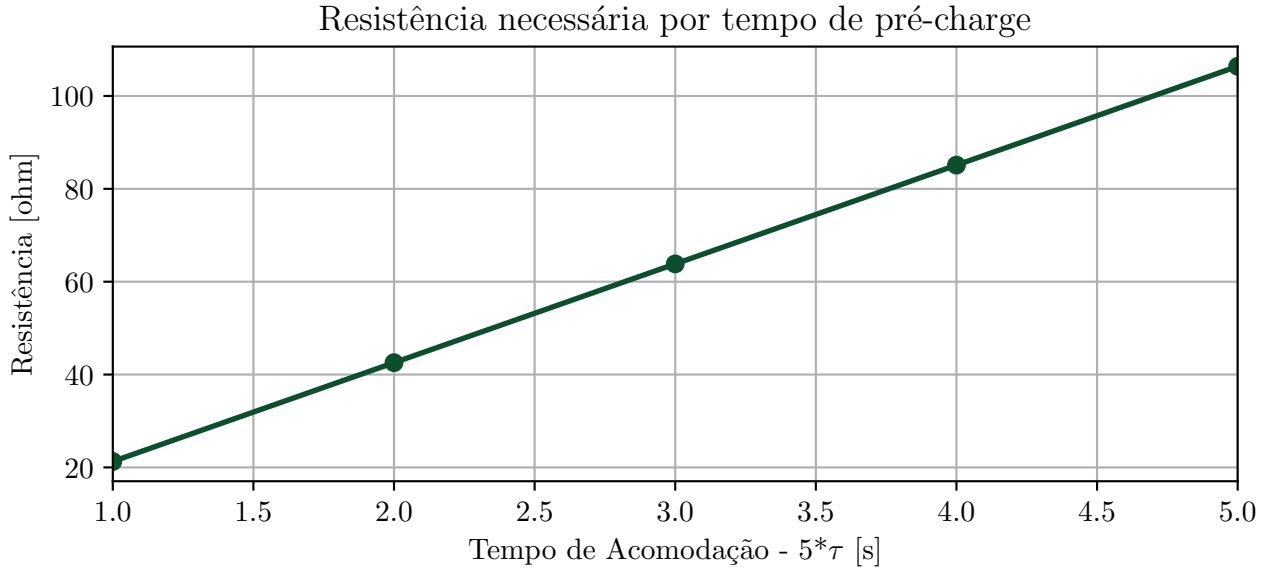


Figura 8: Resistores para cada tempo de *pre-charge*.

Após analisados os valores obtidos nas Figuras 7 e 8 foi escolhido o tempo total de carregamento $t = 1$ s com base nos modelos de resistor existentes no mercado, considerando preço, valor de resistência, potência máxima e possível associação série/paralelo.

Com o tempo total de carregamento definido, a constante de tempo do sistema é dada em (13).

$$t = 5 \cdot \tau \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{1}{5} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\tau = 0.2 \text{ s}} \quad (13)$$

Com a constante de tempo encontrada em (13) é possível encontrar o valor do resistor de *pre-charge* em (14).

$$\tau = R \cdot C \quad \Rightarrow \quad R = \frac{0.2}{9.4 \cdot 10^{-3}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{R = 21.28 \Omega} \quad (14)$$

O máximo de corrente é dado de acordo com (15).

$$i(t) = \frac{V_s - V_c(t)}{R} \quad \Rightarrow \quad i(0) = \frac{1400 - 0}{21.28} \quad \Rightarrow \quad \boxed{i(0) = 65.8 \text{ A}} \quad (15)$$

A energia armazenada no capacitor é encontrada em (16).

$$E = \frac{C \cdot V^2}{2} \quad \Rightarrow \quad E = \frac{9.4 \cdot 10^{-3} \cdot 1400^2}{2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{E = 9212 \text{ J}} \quad (16)$$

Com isso, a potência média do resistor deve ser de acordo com (17).

$$P_m = \frac{E}{t} \quad \Rightarrow \quad P_m = \frac{9212}{1} \quad \Rightarrow \quad \boxed{P_m = 9212 \text{ W}} \quad (17)$$

4 Escolha de Componentes

Os valores obtidos na seção anterior estão exposto na Tabela 1 e serão utilizados para especificar o resistor e o contato de *pre-charge*.

| | $V_s = 700 \text{ V}$ | $V_s = 1400 \text{ V}$ |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Tempo de Carregamento | 2 s | 1 s |
| Resistência | 42.55Ω | 21.28Ω |
| Máximo de Corrente | 16.45 A | 65.8 A |
| Potência Média | 1151.5 W | 9212 W |

Tabela 1: Valores encontrados para o *pre-charge*.

4.1 Resistor

O resistor que será utilizado é o **RH25040R00FJ01** da Vishay, demonstrado na Figura 9. Esse resistor possui uma resistência $R = 40 \Omega$ e potência $P = 250 \text{ W}$ [1]. Segundo [2], mesma fabricante do resistor, para *long pulses* (pulsos até $t = 5 \text{ s}$) a potência permitida de dissipação do resistor é acima da nominal.



Figura 9: Resistor da família NH250.

O cálculo para verificar a potência máxima se dá através do parâmetro *Short Time Overload* (STO), disponível no manual do resistor. As regras para o cálculo estão especificadas abaixo.

- Para um pulso $t = 5 \text{ s}$, multiplicar a potência nominal pelo *Short Time Overload*;
- Para um pulso de $1 \text{ s} < t < 5 \text{ s}$, pegar o valor para $t = 5 \text{ s}$, multiplicar por 5 e dividir pelo tempo do pulso;
- Para pulsos abaixo de $t = 1 \text{ s}$, considerar o valor de 1 s.

Na Tabela 2 estão especificados os parâmetros do contator P195CDA - que possui tensão para bobina de acionamento de 24 V - em relação aos de projeto.

| | Contator P195C | Projeto |
|--------------------|----------------|---------|
| Tensão de Entrada | 1500 V | 1400 V |
| Corrente Máxima | 50 A | 65.8 A |
| Tensão Acionamento | 24 V | - |

Tabela 2: Tabela para contator de *pre-charge*.

O parâmetro de corrente máxima é dado para uma corrente contínua por um longo período de tempo. Para o caso do *pre-charge*, o tempo de condução é limitado. Dessa forma, através da Figura 11 [3] - obtida no próprio *datasheet* do contato - é possível perceber que o contator consegue operar com corrente superior a 200 A pelo tempo de *pre-charge*.

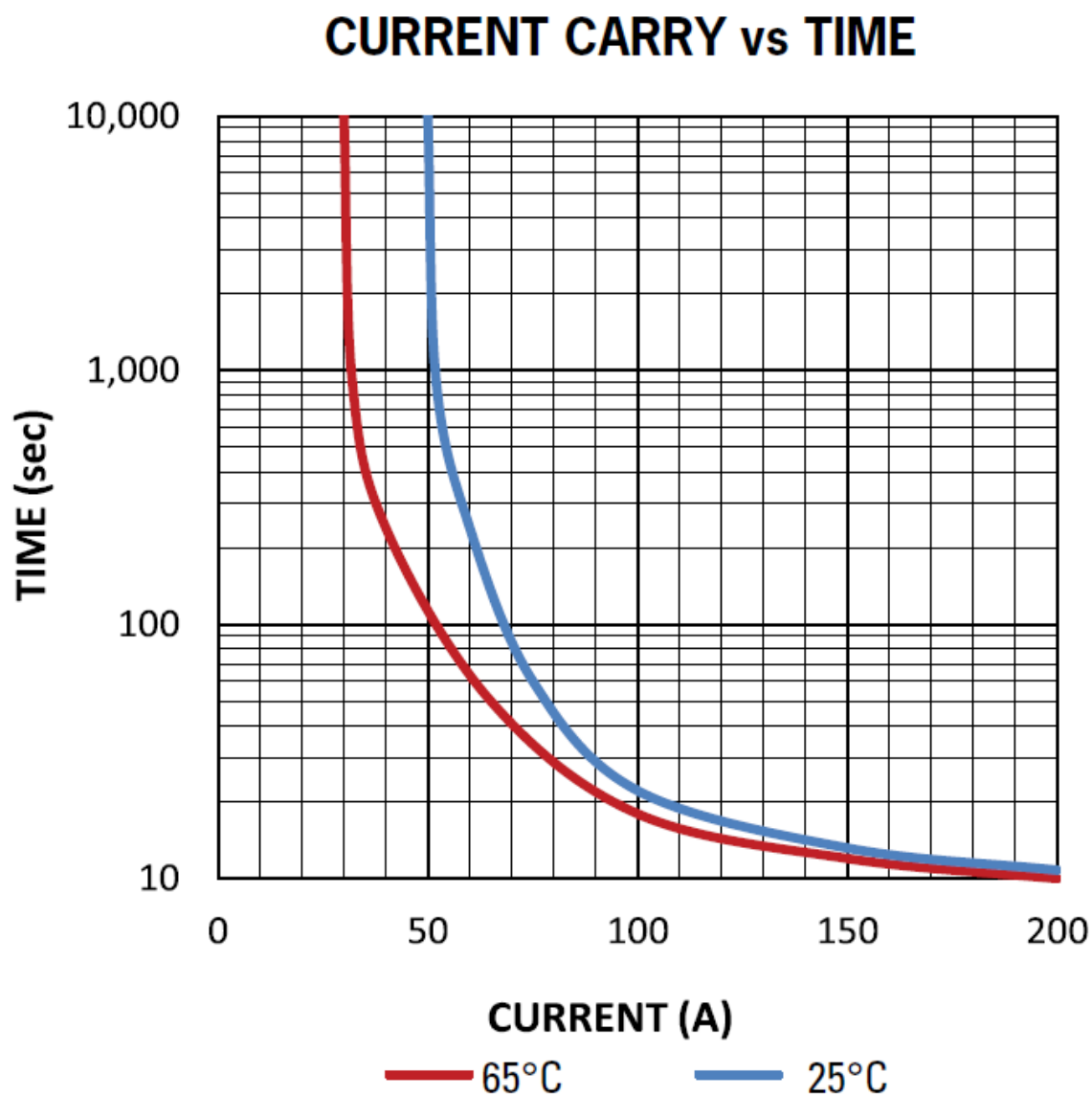


Figura 11: Gráfico de corrente máxima por tempo.

Dessa forma, é possível afirmar que o contato P115CDA é aplicável ao nosso sistema.

4.3 Cabos

Devido ao baixo tempo de *pre-charge*, o dimensionamento dos cabos será feita de acordo com a corrente de curto-circuito máxima de um condutor. Em [4] é feita a análise do tempo de resposta máximo em que um sistema deve atuar para o caso de curto-circuito sem que leve o cabo ao máximo de temperatura permitido. Essa metodologia de dimensionamento é aplicável para um tempo $t < 5$ s, levando em consideração a seção transversal de condutor e corrente de curto-circuito. Tal estudo se baseia na norma **IEC 60364-4**.

De acordo com a norma, o tempo de resposta máximo é dado de acordo com (21).

$$\sqrt{t} = \frac{K \cdot S}{I} \quad (21)$$

Em que:

- **I**: Corrente de curto-circuito em amperes;
- **S**: Seção transversal do cabo em mm²;
- **K**: Constante para o material condutor e tipo de material isolante:

115 Para cabos de cobre com isolamento em PVC;

143 Para cabos de cobre com isolamento em borracha de etileno propileno;

74 Para cabos de alumínio com isolamento em PVC;

87 Para cabos de alumínio com isolamento em borracha de etileno propileno.

O dimensionamento do condutor será feito através do processo inverso, especificando o tempo utilizando o tempo de *pre-charge*, a corrente como sendo a corrente inicial de *pre-charge* - o que resultará em um sobredimensionamento - e a constante K para o condutor de cobre com isolamento em borracha de etileno propileno. Reajustando (21), temos (22).

$$S = \frac{I\sqrt{t}}{K} \quad (22)$$

- **Para 700 V:**

Para o dimensionamento do cabo na situação de tensão $v = 700$ V será utilizado o tempo de *pre-charge* de $t = 2$ s e a corrente de curto-circuito $I = 16.45$ A, conforme definido na Tabela 1. Dessa forma, temos (23).

$$S = \frac{16,45 \cdot \sqrt{2}}{143} = 0.162 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

De acordo com a Tabela 3 [5], exposta nos anexos, é obtida a numeração mínima AWG do condutor em (24).

$$S > 0.162 \text{ mm}^2 \quad \Rightarrow \quad S = 0.20 \text{ mm}^2 = 24 \text{ AWG} \quad (24)$$

- **Para 1400 V:**

Para o dimensionamento do cabo na situação de tensão $v = 1400$ V será utilizado o tempo de *pre-charge* de $t = 1$ s e a corrente de curto-circuito $I = 65.8$ A, conforme definido na Tabela 1. Dessa forma, temos (25).

$$S = \frac{65,8 \cdot \sqrt{1}}{143} = 0.460 \text{ mm}^2 \quad (25)$$

De acordo com a Tabela 3 [5], exposta nos anexos, é obtida a numeração mínima AWG do condutor em (26).

$$S > 0.460 \text{ mm}^2 \quad \Rightarrow \quad S = 0.52 \text{ mm}^2 = 20 \text{ AWG} \quad (26)$$

5 Simulação

Para validar os cálculos feitos anteriormente, foi feita a simulação do circuito de *pre-charge* no *software* PSIM. A simulação já inicializa com o contator de *pre-charge* fechado e com o banco capacitivo descarregado. Em $t = 1$ s é feito o acionamento do contator principal, abrindo o contator de *pre-charge* em $t = 1.05$ s. Esse funcionamento exemplifica de forma satisfatória o funcionamento do circuito. Na Figura 12 estão ilustradas as formas de ondas obtidas pela simulação do sistema.

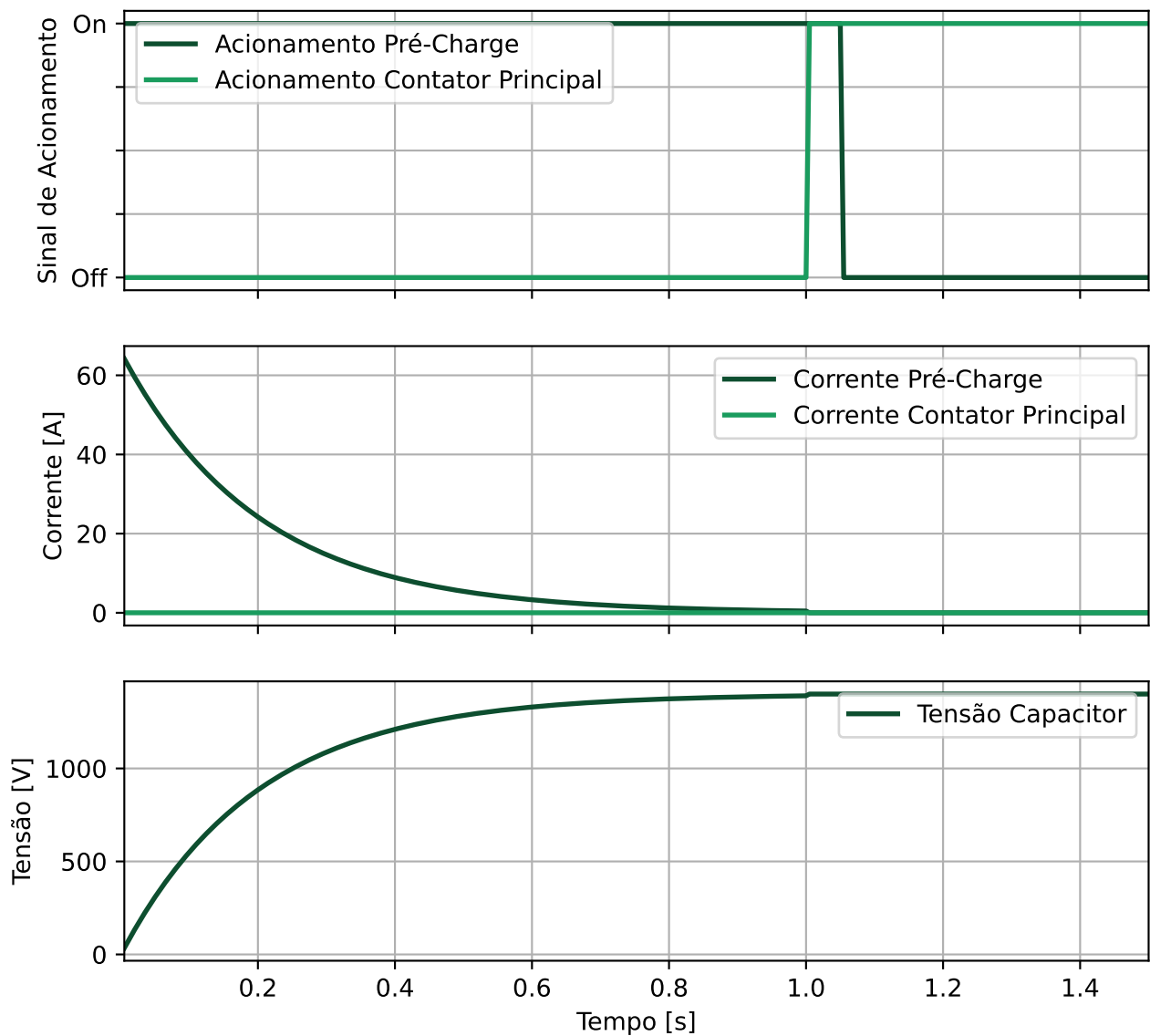


Figura 12: Curvas obtidas por simulação.

Os resultados obtidos pela simulação confirmam os cálculos realizados, sendo obtida uma corrente inicial $i_L(0) = 64.1$ A, $V_c(1) = 1390.05$ V, que representa 99,28% da resposta final e baixa corrente de *inrush*.

Referências

- [1] Vishay Intertechnology Inc. *Wirewound Resistors, Industrial Power, Aluminum Housed, Chassis Mount*, 2017. Revision: 14-Nov-17.
- [2] Vishay Intertechnology Inc. *Pulse Handling Capabilities of Vishay Dale Wirewound Resistors*, 2013. Rev. 3.
- [3] Gigavac - Sensata. *P115 Minitactor*, 2022. Revision: 23-Mar-22.
- [4] Cortem Group. *The Dimensioning Of Electrical Conductors For Use In 'Panel Boards' Addressed To Hazardous Areas - Part Three*, 2014.
- [5] Tabela de fio de cobre awg. <https://blog.novaeletronica.com.br/tabela-de-fio-de-cobre-awg/>. Acessado em: 13-Jun-2023.

Anexos

Anexo I

Código 1: Calculo de pre-charge.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from engineering_notation import EngNumber

params = { 'text.usetex' : True,
           'font.size' : 11,
           'font.family' : 'lmodern'
         }
plt.rcParams.update(params)

fig_width_cm = 18/2.4
fig_height_cm = 7/2.4

UeMColor = (0.050980392156862744, 0.3058823529411765,
            0.1843137254901961)

Vs = 1400
    # Tensao da bateria
C = 9.4e-3
    # Capacitancia do banco capacitivo
t = np.array([1, 2, 3, 4, 5])
    # Tempo em segundos para 99,33% de carga
ts = np.linspace(0,7,10000)
    # Tempo de simulacao
Rv = []
    # Vetor com os valores de resistencia calculados
fig, axs = plt.subplots(figsize = (fig_width_cm, 1.85*fig_height_cm)
                        , \
                        nrows=3, ncols=1, sharex=True)
    # Configuracao de plot
for i,_ in enumerate(t):
    # Loop de calculo
    Tau = t[i]/5
    # Constante de tempo
    R = Tau/C
    # Valor do resistor de pre-charge
    Vc = Vs*(1 - np.exp(-ts/(R*C)))
    # Calcula curva de carregamento do capacitor
    Is = (Vs - Vc)/R
    # Calcula curva de corrente no resistor
    E = (C * Vs**2)/2
    # Energia dissipada no resistor de pre-charge
    Pi = R * Is**2
    # Potencia instantanea dissipada no pre-charge
```

```

P = E/t[i]
    # Potencia media dissipada no resistor de pre-charge

    print("-----")
    print(f'Para t: {t[i]} -> R: {R}_ohm')
    print(f'-----E: {E}_J')
    print(f'-----P: {P}_W')
    print(f'-----i0 = {Is[0]}_A')
    Rv.append(R)

    axs[0].plot(ts, Vc, linewidth = 2, label = f't: {t[i]}_s')
    axs[1].plot(ts, Is, linewidth = 2, label = f't: {t[i]}_s')
    axs[2].plot(ts, Pi, linewidth = 2, label = f't: {t[i]}_s')

axs[0].grid()
axs[0].set_ylabel("Tensao_[V]")
axs[0].legend(loc='upper_right')
axs[0].set_title("Carregamento_do_capacitor")

axs[1].grid()
axs[1].set_ylabel("Corrente_[A]")
axs[1].legend(loc='upper_right')
axs[1].set_title("Corrente_no_resistor_de_pre-charge")

axs[2].grid()
axs[2].set_ylabel("Potencia_[W]")
axs[2].set_xlabel("Tempo_[s]")
axs[2].set_xlim([0, 7])
axs[2].legend(loc='upper_right')
axs[2].set_title("Potencia_instantanea_no_resistor_de_pre-charge")
plt.savefig("01_-_Figuras/curvas_1400.pdf", bbox_inches = "tight")
plt.show(block=False)

plt.figure(figsize = (fig_width_cm, fig_height_cm))
plt.plot(t, Rv, linewidth = 2, color = UeMColor, marker = 'o', label
        = "Resistencias")
plt.grid()
plt.xlabel(r"Tempo_de_Acomodacao_-_5*$\tau$_[s]")
plt.ylabel("Resistencia_[ohm]")
plt.xlim([1, 5])
plt.title("Resistencia_necessaria_por_tempo_de_pre-charge")
plt.savefig("01_-_Figuras/resistores_1400.pdf", bbox_inches = "tight")
plt.show()

```

Anexo II

| Número AWG | Diâmetro (mm) | Secção (mm ²) | Número de espiras por cm | Kg por Km | Resistência (Ω km ⁻¹) | Capacidade (A) |
|---------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|--|-------------------|
| 0 | 8,252 | 53,48 | 1,21 | 474 | 0,317 | 150 |
| 1 | 7,348 | 42,41 | 1,36 | 375 | 0,40 | 120 |
| 2 | 6,544 | 33,63 | 1,52 | 295 | 0,50 | 96 |
| 3 | 5,827 | 26,67 | 1,71 | 237 | 0,63 | 78 |
| 4 | 5,189 | 21,15 | 1,93 | 188 | 0,81 | 60 |
| 5 | 4,621 | 16,77 | 2,16 | 149 | 1,02 | 48 |
| 6 | 4,115 | 13,30 | 2,43 | 118 | 1,29 | 38 |
| 7 | 3,665 | 10,55 | 2,73 | 94 | 1,63 | 30 |
| 8 | 3,264 | 8,36 | 3,06 | 74 | 2,06 | 24 |
| 9 | 2,906 | 6,63 | 3,44 | 58,9 | 2,60 | 19 |
| 10 | 2,588 | 5,26 | 3,86 | 46,8 | 3,27 | 15 |
| 11 | 2,305 | 4,17 | 4,37 | 32,1 | 4,13 | 12 |
| 12 | 2,053 | 3,31 | 5,44 | 29,4 | 5,21 | 9,5 |
| 13 | 1,828 | 2,63 | 6,14 | 23,3 | 6,56 | 7,5 |
| 14 | 1,628 | 2,08 | 6,14 | 18,5 | 8,28 | 6,0 |
| 15 | 1,450 | 1,65 | 6,90 | 14,7 | 10,41 | 4,8 |
| 16 | 1,291 | 1,31 | 7,75 | 11,6 | 13,19 | 3,7 |
| 17 | 1,150 | 1,04 | 8,69 | 9,26 | 16,57 | 3,2 |
| 18 | 1,024 | 0,82 | 9,76 | 7,3 | 20,93 | 2,5 |
| 19 | 0,9116 | 0,65 | 10,9 | 5,79 | 26,39 | 2,0 |
| 20 | 0,8118 | 0,52 | 12,3 | 4,61 | 33,21 | 1,6 |
| 21 | 0,7230 | 0,41 | 12,8 | 3,64 | 41,88 | 1,2 |
| 22 | 0,6438 | 0,33 | 15,5 | 2,89 | 53,09 | 0,92 |
| 23 | 0,5733 | 0,26 | 17,4 | 2,29 | 66,62 | 0,73 |
| 24 | 0,5106 | 0,20 | 19,6 | 1,82 | 84,07 | 0,58 |
| 25 | 0,4547 | 0,16 | 22,0 | 1,44 | 106,03 | 0,46 |
| 26 | 0,4049 | 0,13 | 24,7 | 1,14 | 134,49 | 0,37 |
| 27 | 0,3606 | 0,10 | 27,7 | 0,91 | 168,44 | 0,29 |
| 28 | 0,3211 | 0,08 | 31,2 | 0,72 | 214,37 | 0,23 |
| 29 | 0,2859 | 0,064 | 34,8 | 0,57 | 266,51 | 0,18 |
| 30 | 0,2546 | 0,051 | 39,3 | 0,45 | 340,26 | 0,15 |

Tabela 3: Tabela para dimensionamento de condutores.