

## GERADORES DE IMPULSOS E FORMAÇÃO DA ONDA DUPLA EXPONENCIAL PARA TESTES EM SISTEMAS DE ENERGIA

(1) Kristian Pessoa dos SANTOS

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil. [kristianpessoa@ifpi.br](mailto:kristianpessoa@ifpi.br)

(2) Tobias Rafael Fernandes NETO

Universidade Federal do Ceará, Brasil. E-mail: [tobias@ufc.br](mailto:tobias@ufc.br)

(3) Cícero Marcos Tavares CRUZ

Universidade Federal do Ceará, Brasil. E-mail: [cicero@ufc.br](mailto:cicero@ufc.br)

### RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma breve discussão sobre os geradores de impulsos e algumas de suas aplicações e contribuições nos sistemas de energia elétrica. Para isso, a metodologia utilizada foi a demonstração matemática utilizando os conhecimentos de circuitos elétricos, integrais e Transformadas de Laplace para mostrar a formação da onda dupla exponencial. Esta é utilizada como representação matemática de uma descarga atmosférica por ser a forma de onda que mais se aproxima do seu comportamento real. Em seguida, utilizando o *software PSIM*, é feita uma análise computacional onde as principais características da onda dupla exponencial podem ser visualizadas através da tensão e corrente aplicada nas cargas em teste. O presente trabalho poderá ser utilizado para futuro desenvolvimento de um gerador de impulsos somado às características particulares da carga que pode ser de várias áreas de conhecimento como indústria, física, medicina, engenharia ou meio ambiente.

Palavras-chaves: Dupla exponencial, gerador de impulsos, *spark gap*.

## 1. INTRODUÇÃO

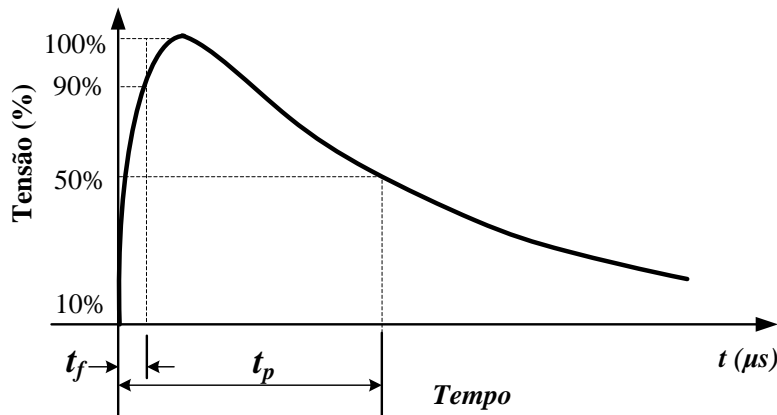
O presente trabalho tem por objetivos apresentar uma breve discussão sobre os geradores de impulsos de tensão e corrente e algumas de suas aplicações e contribuições nos sistemas de energia elétrica. Em seguida, demonstrar matematicamente e através de simulação computacional as principais características da forma de onda dupla exponencial nas cargas a serem testadas. Os geradores de impulsos produzem um sinal de tensão/corrente muito rápido em uma determinada carga de teste que poderá ter características bem distintas. Segundo (BAEK et al., 2002, 2005), atualmente os geradores de impulsos podem ser utilizados nas mais diversas áreas da ciência como:

- Física: Aceleradores de partículas, física de altas energias.
- Indústria: Tratamento de metais, solda a laser, dispositivos a plasma, destruição de rochas, fundição do aço, precipitação eletrostática.
- Medicina: Reparação óssea, injeção de materiais através da pele sem agulhas, cirurgia ocular.
- Meio-Ambiente: Destruição de gases tóxicos e purificação da água;
- Agricultura: Controle de bactérias através de campos elétricos.

Dentre outras aplicações, os geradores de impulsos são usados nos sistemas de energia para testar o comportamento real de equipamentos de proteção quando submetidos a surtos de natureza atmosférica ou por chaveamentos. Há dois tipos principais: os geradores de corrente e os geradores de tensão. Os geradores de impulsos de corrente são muito utilizados em testes de laboratório em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em elos fusíveis e para-raios para testar sua capacidade e velocidade de atuação. Os geradores de impulsos tensão fornecem um distúrbio de tensão que, normalmente, cresce quase instantaneamente sem apresentar oscilações e cai rapidamente para zero. É bastante usado em testes de resistências não lineares que são usadas na fabricação de para-raios e para estudo de sistemas de aterramentos em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Para testes de sobretensões originadas por descargas atmosféricas e surtos por chaveamentos a dupla exponencial é a forma de onda que mais se aproxima do comportamento real. Esta é normalmente caracterizada pelo seu valor de pico (máximo), pelo tempo de subida  $t_f$ , que corresponde ao período aproximado para que a tensão atinja seu valor

máximo, e pelo tempo de meia-onda  $t_p$ , que é o período necessário para que a tensão atinja metade de seu valor máximo.



**Figura 1**– Formas de onda dupla exponencial utilizada por geradores de impulsos.  
Fonte: (NAIDU; KAMARAJU, 2009).

A tensão em função do tempo da Equação é representada por:

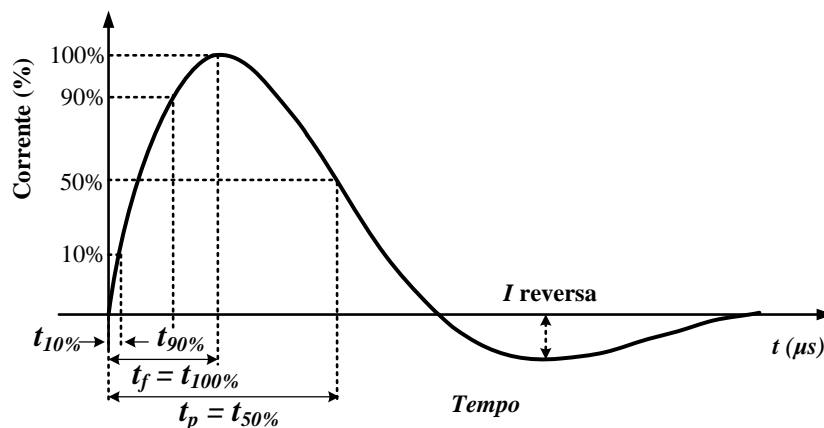
$$V(t) = V_o.[e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}] \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $V_o$  representa o pico de tensão e as constantes  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes cujos valores estão em microsegundos. A onda padrão para impulsos de tensão de  $1,2/50 \mu s$  é caracterizada por ter um tempo de subida de  $t_f = 1,2 \mu s$  e um tempo de meia onda de  $t_p = 50 \mu s$ . O tempo de subida  $t_f$  pode ser calculado pela Equação 2 onde  $t_{90\%}$  e  $t_{10\%}$  representam o tempo de 90 % e 10 % do pico de corrente, respectivamente. O tempo de meia onda  $t_p$  pode ser calculado pela Equação 3 onde representa o tempo de 50 % do pico de corrente (HALIM et al., 2011), (NAIDU; KAMARAJU, 2009).

$$t_f = 1,25. [t_{90\%} - t_{10\%}] \quad (\text{Equação 2})$$

$$t_p = t_{50\%} \quad (\text{Equação 3})$$

A corrente reversa  $I_{\text{reversa}}$ , que polaridade reversa, não pode ultrapassar 20 % do valor do pico de corrente. A onda padrão para impulsos de corrente de  $8/20 \mu s$  é caracterizada por ter um tempo de subida de  $8 \mu s$  e um tempo de meia onda de  $20 \mu s$  (HALIM et al., 2011).



**Figura 2** – Impulso de corrente de acordo com a *Intenational Electrotechnical Commission-IEC 60060-1*.  
Fonte: (NAIDU; KAMARAJU, 2009).

**Tabela 1** – Impulsos de corrente padrão de acordo com a IEC 60060-1.

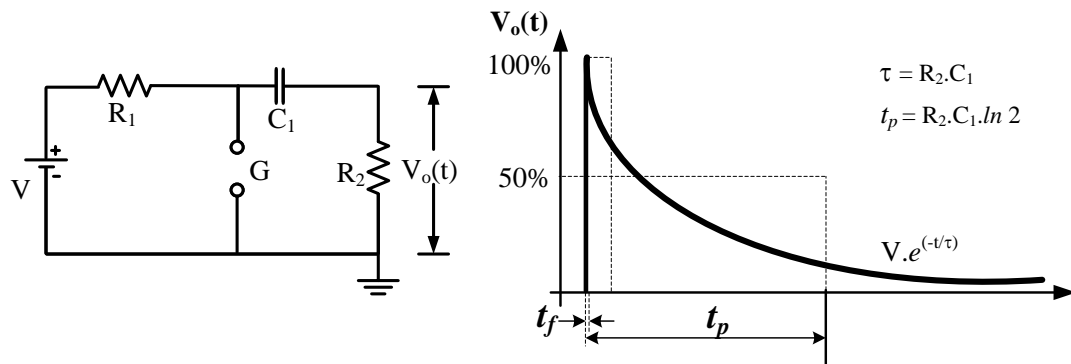
Forma de Onda	Tempo de subida ( $t_f$ )	Tempo de meia-onda ( $t_p$ )	Valor de Pico (%)	Polaridade Reversa (%)
1/20	$1\mu s \pm 10\%$	$20\mu s \pm 10\%$	$\pm 10$	20
4/10	$4\mu s \pm 10\%$	$10\mu s \pm 10\%$	$\pm 10$	20
8/20	$8\mu s \pm 10\%$	$20\mu s \pm 10\%$	$\pm 10$	20
30/80	$30\mu s \pm 10\%$	$80\mu s \pm 10\%$	$\pm 10$	20

Fonte – (HALIM et al., 2011).

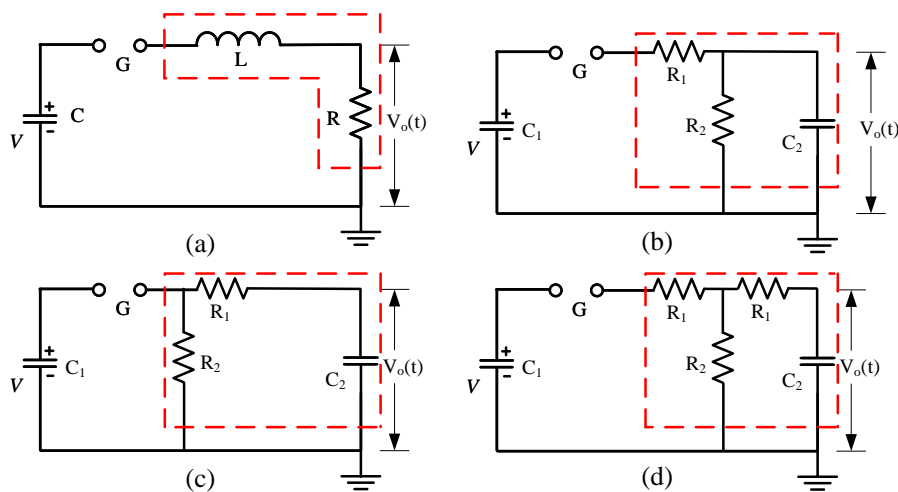
## 2. MÉTODOS

A análise matemática de alguns circuitos será utilizada como metodologia para obter a dupla exponencial que será posteriormente discutida. Na Figura 3 o capacitor  $C_1$  é gradualmente carregado pela fonte de alimentação  $V$  através do resistor série  $R_1$  para que a *spark gap*  $G$  seja, então, acionada. As *spark gaps* são chaves que funcionam através da ruptura do dielétrico existente entre os seus terminais (*gaps*), dessa forma, diversos fatores são responsáveis pelo seu comando: tamanho das *gaps*, distância, dielétrico, tensão aplicada, etc. O resistor  $R_2$  funciona como carga e a tensão nos seus terminais  $V_o(t)$  aumentará até  $V$  instantaneamente e, então, decrescerá exponencialmente.

Segundo (NAIDU; KAMARAJU, 2009), os geradores de tensão podem produzir uma onda dupla exponencial se a carga for uma combinação RLC ou RC de acordo com a Figura 4 (a) – (d) onde a área destacada é a carga.

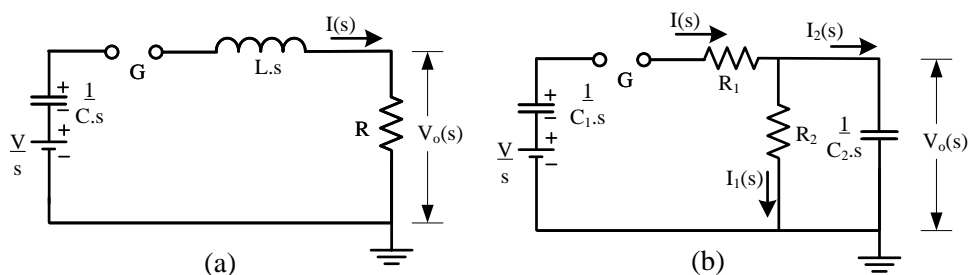


**Figura 3** - Circuito para produzir a forma de onda exponencial simples.  
Fonte: (LUCAS, 2001).



**Figura 4** – Circuitos de geradores de impulsos de tensão.  
Fonte: (NAIDU; KAMARAJU, 2009).

Na Figura 5 são apresentados os circuitos equivalentes de Laplace dos circuitos da Figura 04(a) e (b). Dessa forma é possível fazer a análise dos circuitos usando a Lei das Tensões de Kirchhoff (LTK).



**Figura 5** - Circuitos equivalentes usando a Transformada de Laplace.  
Fonte: (LUCAS, 2001).

Analisando o circuito da Figura 5(a), considerando que os capacitores  $C$  e  $C_1$  estão previamente carregados e que no instante  $t = 0$  s tem-se  $i(0) = 0$  A, pode-se observar que de acordo com a Lei das Tensões de Kirchhoff (LTK) obtém-se a Equação 4.

# XI SEMANA DE MATEMÁTICA E FÍSICA DO IFPI

A matemática e a ciência brasileira e suas contribuições

---

$$\frac{V}{s} = \left( \frac{1}{C.s} + R + L.s \right) . I(s) \quad (\text{Equação 4})$$

Como a tensão sobre o resistor de carga R no domínio da frequência será igual a identidade  $V_o(s) = I(s).R$ , então, desenvolvendo a Equação 4 tem-se:

$$V_o(s) = V . \frac{R}{L} . \frac{1}{\left( s^2 + \frac{R.s}{L} + \frac{1}{L.C} \right)} \quad (\text{Equação 5})$$

Considerando a condição de sub-amortecimento, as raízes de  $s^2 + \frac{R.s}{L} + \frac{1}{L.C}$  são iguais a:

$$\alpha = s_1 = -\frac{R}{2.L} + \sqrt{\left( \frac{R}{2.L} \right)^2 - \frac{1}{L.C}} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\beta = s_2 = -\frac{R}{2.L} - \sqrt{\left( \frac{R}{2.L} \right)^2 - \frac{1}{L.C}} \quad (\text{Equação 7})$$

A solução geral para a tensão no resistor de carga será igual a:

$$V_o(t) = V_o . [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}] \quad (\text{Equação 8})$$

Onde a constante  $V_o = \frac{V}{\sqrt{1 - \frac{4.L}{C.R^2}}}$ . Considerando o circuito da Figura 5(b) e a LTK:

$$\frac{V}{s} = \left( \frac{1}{C_1.s} + R_1 \right) . I(s) + R_2 . I_1(s) \quad (\text{Equação 9})$$

Considerando as seguintes equações:

$$V_o(s) = R_2 . I_1(s) = \left( \frac{1}{C_2.s} \right) . I_2(s) \quad (\text{Equação 10})$$

$$I(s) = I_1(s) + I_2(s) \quad (\text{Equação 11})$$

Logo:

$$\frac{V}{s} = I_1(s) . \left( \frac{1}{C_1.s} + R_1 + R_2 \right) + I_2(s) . \left( \frac{1}{C_1.s} + R_1 \right) \quad (\text{Equação 12})$$

Desenvolvendo-se (11) tem-se:

$$I_2(s) = C_2.s.R_2 . I_1(s) \quad (\text{Equação 13})$$

Substituindo-se a Equação 13 na Equação 12 tem-se:

$$\frac{V}{s} = I_1(s) . \left( \frac{1}{C_1.s} + R_1 + R_2 + C_2.s.R_2.R_1 + \frac{R_2.C_2}{C_1} \right) \quad (\text{Equação 14})$$

Dessa forma:

$$V_o(s) = R_2 \cdot I_1(s) = \frac{V \cdot R_2 \cdot C_2}{R_2 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot s^2 + (R_2 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot s + 1} \quad (\text{Equação 15})$$

Desenvolvendo-se a Equação 15 e considerando  $\alpha$  e  $\beta$  como as raízes da Equação  $R_2 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot s^2 + (R_2 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot s + 1$ , tem-se:

$$E(s) = \frac{V}{R_1 \cdot C_2} \cdot \frac{1}{(s+\alpha)(s+\beta)} = \frac{V}{R_1 \cdot C_2} \cdot \frac{1}{(\beta - \alpha)} \cdot \left[ \frac{1}{(s+\alpha)} - \frac{1}{(s+\beta)} \right] \quad (\text{Equação 16})$$

Portanto, a solução geral para a tensão na carga será igual a:

$$V_o(t) = \frac{V}{R_1 \cdot C_2 \cdot (\beta - \alpha)} \cdot [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}] \quad (\text{Equação 17})$$

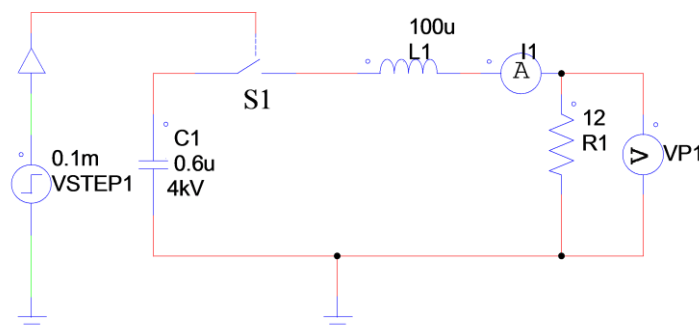
Onde as raízes podem ser aproximadas por  $\alpha \approx \frac{1}{R_1 \cdot C_2}$  e  $\beta \approx \frac{1}{R_2 \cdot C_1}$ .

Para o circuito da Figura 4(c), a solução geral para a tensão aplicada ao resistor de carga será igual à Equação 18. O circuito equivalente da Figura 4(d) é a combinação dos circuitos da Figura 4(b) - (c) (LUCAS, 2001).

$$V_o(t) = \frac{V \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot \alpha \cdot \beta}{(\beta - \alpha)} \cdot [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}] \quad (\text{Equação 18})$$

### 3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Através da análise matemática é possível foi elaborada a simulação computacional utilizando o software *PSIM Student Version* a fim de planejar um trabalho experimental e verificar as formas de onda produzidas.



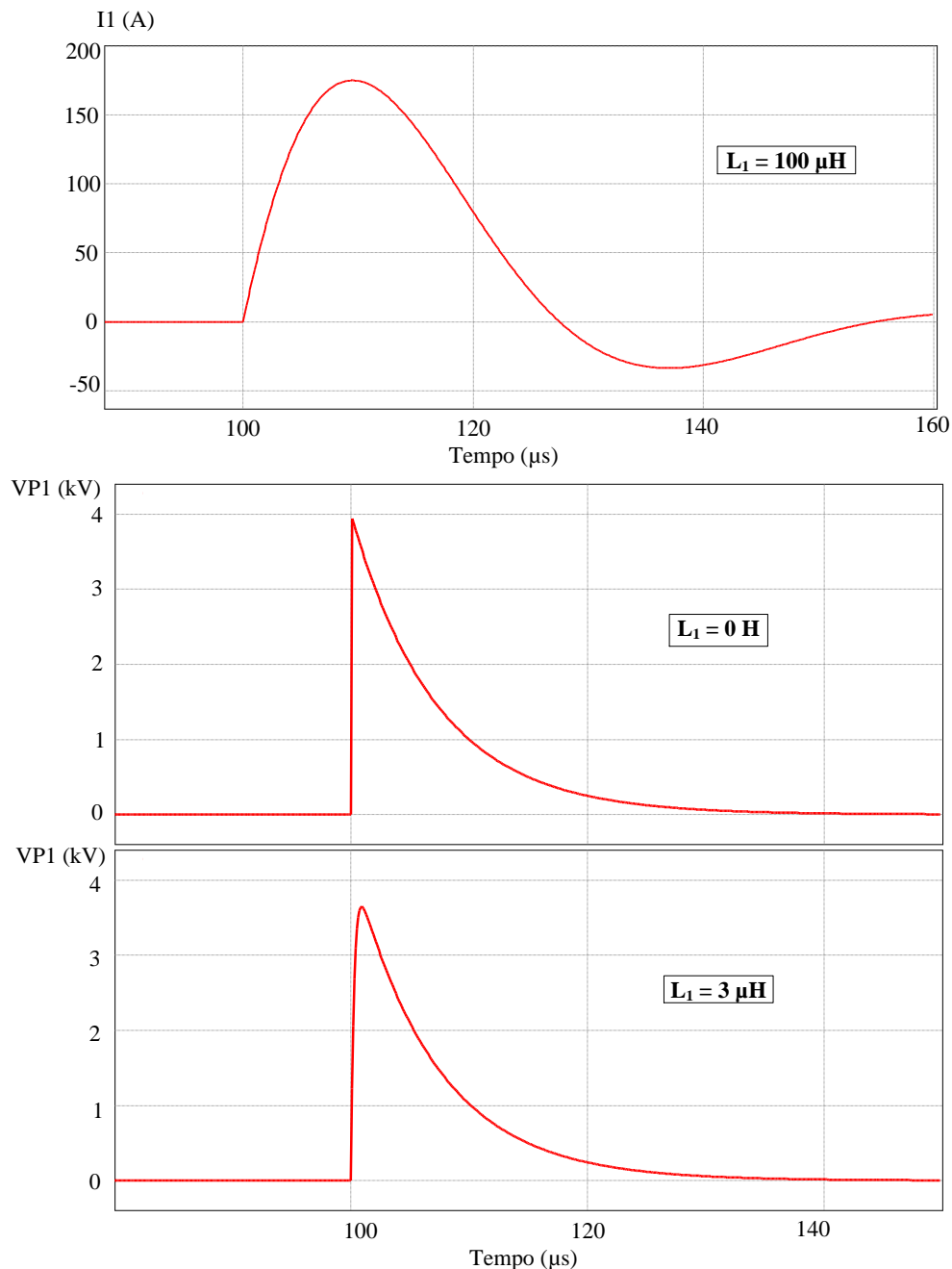
**Figura 6** – Gerador de Impulsos de corrente da simulação computacional.  
Fonte: (HALIM et al., 2011).

O capacitor C1 é configurado como previamente carregado por uma fonte externa com uma tensão de 4 kV e capacitância de 0,6  $\mu$ F. Na prática, este capacitor corresponde a uma série de capacitores dispostos em série que apresentam uma baixa capacitância total e podem

# XI SEMANA DE MATEMÁTICA E FÍSICA DO IFPI

A matemática e a ciência brasileira e suas contribuições

suportar poucas dezenas de kilo Volts. A *spark gap* é representada pela chave S1 que é comandada pela fonte externa Vstep. A Figura 7 apresenta a forma de onda com o comportamento da corrente I1 e das tensões VP1. Para que o elemento magnético desse circuito ( $L_1 = 100 \mu\text{H}$ ) suporte tamanha corrente é recomendado que este tenha um núcleo de ar para que não perca suas características magnéticas (saturação magnética).



**Figura 7** – Corrente na carga em Amperes (A).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o mesmo circuito e desprezando a componente magnética ( $L_1 = 0 \text{ H}$ ) é possível observar que a componente negativa desaparece, pois o elemento magnético é



responsável pelo armazenamento de energia e de inversão do sentido da corrente. Na prática, há sempre uma componente magnética mesmo que pequena devido aos condutores utilizados nas experimentações que é apresentada na mesma Figura com uma indutância de  $L_1 = 3 \mu\text{H}$ .

#### 4. DISCUSSÕES

Observando a Equação 1 e comparando com as Equações 8, 17 e 18 é possível concluir que usando a metodologia da análise de Laplace é possível mostrar que os circuitos da Figura 4(a) – (d) são capazes de fornecer a onda dupla exponencial na carga de teste.

Por fim, observando a Figura 7 é possível perceber que utilizando um circuito similar ao da Figura 4(a) a análise matemática e a construção do circuito fornecem na saída para a carga/objeto teste a onda dupla exponencial. Quando se considera uma construção com a indutância nula ( $L_1 = 0 \text{ H}$ ) obtém-se apenas a exponencial simples, entretanto, em aplicações práticas há sempre a presença de uma pequena indutância ( $L_1 = 3 \mu\text{H}$ ) que é suficiente para que a forma de onda na carga seja a dupla exponencial. Para que todos os parâmetros da IEC 60060-1 sejam atingidos é necessário que o projeto tenha uma elaboração mais precisa quanto ao seu controle e da combinação dos valores da capacitância e indutância.

#### 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma breve discussão sobre os geradores de impulsos e algumas de suas aplicações nos sistemas de energia elétrica. Dessa forma, apresentou uma correlação dos conhecimentos de física, matemática e eletrônica para desenvolvimento de protótipos de fim específico que podem ser projetados para sistemas de energia ou outros fins em várias áreas da ciência. Baseado na literatura técnica foi possível elaborar uma análise matemática de algumas das principais configurações usadas nesses geradores. Por fim, através de uma análise computacional é possível comparar as formas de onda da dupla exponencial obtida com as formas de onda teóricas e discutir sucintamente quanto aos problemas que poderão ser encontrados em uma implementação prática de projeto. Portanto, a demonstração matemática e computacional do presente trabalho poderá ser utilizada para futuro desenvolvimento de um gerador de impulsos somado às características da carga em teste que deverão fornecer dados mais específicos para a implementação como nível de tensão máxima e potência.

# XI SEMANA DE MATEMÁTICA E FÍSICA DO IFPI

A matemática e a ciência brasileira e suas contribuições

---

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LABTERRA da Universidade Federal do Ceará, à COELCE – Companhia Energética do Ceará, à CONCEMA – Consultoria em Ciências, Engenharia, Gestão de Sistemas e Meio Ambiente e ao IFPI – Campus Parnaíba pela infraestrutura, apoio financeiro e contribuição científica para o presente trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAEK, J. W.; RYU, M. H.; YOO, D. W.; KIM, G. H. **High voltage pulse generator using boost converter array**. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON'2002), 28, 2002, v.1, p. 305-309.
2. BAEK, J. W.; YOO, D. W.; KIM, G. H.; LAI, J.S.L. **Solid state marx generator using series-connected IGBTs**, IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, vol.33, n. 4, pp.1198-1204.
3. NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. **High Voltage Engineering**. 4th ed. New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited. 2009. p. 474.
4. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) Std. 60060-1: High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements 3th ed. Geneva, 2010.
5. HALIM, N.H., AZMI, A., YAHYA.Y., ABDULLAH, F., OTHMAN, M., LAILI, M.S., **Development os a Small Scale Standart Lighting Impulse Current Generator**. In: INTERNATIONAL POWER ENGINEERING AND OPTIMIZATION CONFERENCE (PEOCO2011), 5, 2011, Shah Alam, Malaysia, p.426 – 431.4. (HALIM et al., 2011).
6. LUCAS, J.R. **High Voltage Engineering** 2th ed. Moratuwa, Sri Lanka: 2001. p. 134.