



João Paulo Machado Mendes

Licenciado em Engenharia Electrotécnica – Automação
Industrial e Sistemas de Potência

Modulador Híbrido de Potência Pulsada para Aplicações Biomédicas – O Uso de Semicondutores com Linhas de Transmissão

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Electrotécnica e Computadores

Orientador: Doutor Luís Manuel dos Santos Redondo,
Professor Coordenador, ISEL/IPL

Co-orientadora: Doutora Maria Manuela de A. C. Vieira,
Professora Associada Convidada, FCT-UNL
Professora Coordenadora com Agregação, ISEL/IPL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Manuel Camarinha de Matos

Arguente(s): Prof.^a Doutora Maria Beatriz M. B. Vieira Borges
Prof. Doutor José Fernando Alves da Silva

Vogais: Prof. Doutor Elmano da Fonseca Margato
Prof. Doutor Luís Augusto Bica Gomes de Oliveira
Prof. Doutor Luís Manuel dos Santos Redondo



Maio 2018

Modulador Híbrido de Potência Pulsada para Aplicações Biomédicas – O Uso de Semicondutores com Linhas de Transmissão

Copyright João Paulo Machado Mendes, FCT/UNL, UNL

“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor”.

Resumo

A Potência Pulsada pode definir-se como a ciência que estuda o armazenamento de energia elétrica durante um tempo relativamente longo seguida da sua libertação rápida numa carga, aumentando a potência instantânea. Esta técnica dos anos quarenta, usada inicialmente para fins militares, como tantas outras vezes, tem potencial para contribuir para o bem-estar e o desenvolvimento de todos. De facto, existe uma crescente variedade de aplicações ambientais, biomédicas e industriais que usam impulsos de alta tensão, de forma a melhorar a propriedade de um produto ou de uma técnica. Estes impulsos podem durar desde centenas de picossegundos até dezenas de segundos, com taxas de repetição até dezenas de milhares por segundo.

Este trabalho tem como objetivo, além do estudo das técnicas usadas na construção de circuitos de geração de impulsos bipolares, o projeto e construção de uma fonte pulsada flexível (em frequência, amplitude e em largura dos impulsos), para geração de impulsos bipolares de alta tensão com 10kV de amplitude, com uma largura de impulsos de poucas dezenas de nanossegundos e taxa de repetição até 1kHz, para aplicações biomédicas. Impulsos de alta tensão com estas características são hoje em dia muito usados para produção de campos elétricos pulsados para aplicação em materiais biológicos, sendo uma ferramenta essencial no processamento de alimentos e tecidos biológicos.

A inovação deste trabalho está associada com a técnica de produção dos impulsos de alta tensão bipolares (i.e. positivos e negativos) gerados através da utilização combinada de circuitos com semicondutores e linhas de transmissão, respetivamente, o gerador de Marx e o gerador Blumlein, baseado em cabos coaxiais e "*strip lines*". Desta forma, tenta-se extrair o melhor destas duas tecnologias, respetivamente, a flexibilidade de operação bem como a capacidade de geração de impulsos de nanossegundos. Ao mesmo tempo, consegue-se atenuar as limitações inerentes a cada uma delas, respetivamente, a limitação de tensão, corrente e velocidade de comutação dos semicondutores, e a dimensão das linhas de transmissão. Neste trabalho são, também, usadas técnicas clássicas de associação de semicondutores ligadas com o uso de semicondutores de potência modernos.

Uma componente importante deste trabalho é a modelação teórica dos circuitos apresentados, bem como a sua simulação em PSPICE e sua a validação experimental em cargas equivalentes aos sistemas biológicos.

Palavras-Chave:

- Potência Pulsada
- Campo elétrico
- Impulsos monopolar/bipolar
- Semicondutores de potência
- Linhas de transmissão

Abstract

Pulsed Power (PP) can be defined as the science that studies the storing of electrical energy over a relatively long period of time followed but it quickly releases over a load, thus increasing the instantaneous power. This technique from the 40's, primarily developed for military reasons, as often so many times, has the potential for contributing to the welfare of everyone in near people applications. In fact, there is a growing variety of environmental, biomedical, commercial and industrial applications that use positive and/or negative high-voltage repetitive pulses, enhancing the properties of a product or a technique. These pulses may last from hundreds of ps to tens of seconds, being released as a single shot or in a repetitive sequence up to tens or thousands pulses per second.

This work aims to study the techniques associated with the generation of bipolar high-voltage pulses, as well as, to develop a pulsed power generator for delivering bipolar high voltage pulses, with 10kV of amplitude, a few tens of ns for pulse width and a repetition rate up to 1kHz. High voltage pulses with these characteristics are currently being used for generation pulsed electric fields in biological materials, being an essential tool for processing food and life tissues.

The novelty of this work is the technique for generation high voltage bipolar pulses (i.e. positive and negative), through the use of merged semiconductors and transmission lines circuits, respectively, the Marx generator and the Blumlein generator based on coaxial cables and "*strip lines*". The objective is to use the best of two technologies, respectively, the flexibility of operation as well as the capability of ns pulse generation, to circumvent at the same time their limitations, respectively, the voltage, current and the switching speed range of the semiconductors, and the size of transmission lines. In addition, this work uses classic techniques for associating semiconductors linked with the use of modern power semiconductors.

An important component of this work is the theoretical modeling of the proposed circuits, as well as their simulation in PSPICE, and finally the experimental validation in equivalent biological systems.

Keywords:

- Pulsed power
- Electric field
- Monopolar/bipolar pulses
- Power semiconductors
- Transmission lines

Agradecimentos

No final desta longa caminhada agradeço a todos os que participaram e me ajudaram para que este trabalho fosse possível.

Ao Professor Doutor Luís Manuel dos Santos Redondo, meu orientador, pelo incentivo, pelos momentos de reflexão e partilha, pela amizade e pela confiança. Pelos conselhos, pela sabedoria e partilha de experiências. À Professora Maria Manuela de Almeida Carvalho Vieira pela oportunidade, compreensão e motivação. Ao Professor Luís M. Camarinha-Matos Presidente da Comissão de Acompanhamento da Tese (CAT) pelo seu apoio, incentivo e disponibilidade no acompanhamento do trabalho desenvolvido. E finalmente ao Professor Elmano da Fonseca Margato, membro externo da CAT pela sua visão crítica, paciência e experiência científica nas recomendações feitas acerca do trabalho desenvolvido.

Deixo um especial reconhecimento aos meus colegas de trabalho e especialistas em Potência Pulsada, pela sabedoria, pela forma desinteressada e empenhada com que se disponibilizaram para partilhar a sua experiência, de modo a minimizar erros e na tentativa de se encontrar o caminho mais curto na resolução dos problemas que iam surgindo.

Agradeço também ao Doutor José Osvaldo Rossi, especialista em *Blumlein lines* que com o seu empenho e crítica nos ajudou a obter os melhores resultados.

Ao meu amigo Hiren Canacsinh que com a sua persistência, disponibilidade e conhecimento me tentou empurrar sempre para bom porto.

Agradecer também às seguintes entidades ou instituições os apoios prestados que tornaram possível a realização deste trabalho:

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) a oportunidade concedida ao abrigo de um acordo com o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) para a frequência deste ciclo de estudos com isenção de propinas.

À Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação (ADEEEA) do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), e em especial ao Professor Doutor Victor Mendes responsável pela Secção de Economia e Gestão, pelo incentivo e dispensa concedida para a realização desta tese.

À EnergyPulse Systems que permitiu a construção do protótipo laboratorial onde se realizaram os últimos ensaios, aos seus administradores e colaboradores.

Ao Centro de Física da Universidade de Lisboa entidade que deu o seu contributo numa fase inicial do meu trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa que me acolheu nesta caminhada.

Finalmente agradecer à minha namorada, à minha família e todos os meus amigos que sempre me apoiaram com a sua paciência.

A todos o meu especial obrigado!

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Pergunta de Investigação.....	4
1.3.1 Introdução ao problema.....	4
1.3.2 Questões de investigação.....	5
1.3.3 Hipótese e aproximação.....	5
1.4 Metodologia de Investigação Adotada.....	6
1.5 Contribuições Originais.....	7
1.6 Conteúdo.....	8
2. Estado da Arte da Geração de Impulsos Bipolares.....	11
2.1 Introdução.....	11
2.1.1 Potência Pulsada.....	11
2.1.2 Evolução histórica.....	12
2.1.3 Dispositivos de comutação.....	13
2.2 Aplicação de campos elétricos pulsados, PEF.....	16
2.2.1 Exemplo de aplicações.....	19
2.2.2 Aplicações Biomédicas Aplicação em Estudo.....	19
2.2.3 Modelo Elétrico da Célula.....	20
2.3 Geração de Impulsos Bipolares com Largura Inferior ao Microsegundo.....	24
2.3.1 Circuitos baseados na descarga direta de condensadores sobre a carga.....	24
2.3.1.1 Utilização de circuitos em ponte e meia ponte.....	29
2.3.1.2 Gerador de Marx.....	31
2.3.1.3 "Inductive Adder".....	36
2.3.1.4 Conclusões.....	40
2.3.2 Circuitos baseados na carga/descarga de linhas de transmissão.....	40

2.3.2.1	Caracterização de uma linha de transmissão	40
2.3.2.2	Propagação e índices de transmissão e reflexão numa LT	42
2.3.2.3	Utilização de Linhas Blumlein	46
3.	Gerador Híbrido de Alta Tensão, GHAT	55
3.1	Introdução	55
3.1.1	Requisitos do gerador	55
3.1.2	Método escolhido para geração de impulsos	56
3.2	Topologia e funcionamento do gerador	58
3.2.1	Conceito	58
3.2.2	Gerador com $m \times n$ estágios	60
3.2.3	Dimensionamento do gerador de Marx	69
3.2.3.1	Dimensionamento dos semicondutores	71
3.2.3.2	Falha de sincronismo no comando dos semicondutores	72
3.2.3.3	Dimensionamento dos condensadores	72
3.2.3.4	Perdas de condução e de comutação	74
3.2.3.5	Diagrama temporal de tensões num gerador de Marx	76
3.2.4	Dimensionamento do Gerador Blumlein	77
3.2.4.1	Modelação do gerador Blumlein com $n=1$ estágios	79
3.2.4.2	Modelação do gerador Blumlein com $n=2$ estágios	81
3.2.4.3	Modelação do gerador Blumlein com $n=3$ estágios	84
3.2.4.4	Modelação do gerador Blumlein com n estágios	87
3.2.4.5	Cálculo da impedância da carga e da impedância de modo secundário	90
3.2.4.6	Diagrama de Bewley e Propagação das ondas de tensão	94
3.2.4.7	Tensão na carga	101
3.2.4.8	Exemplos de aplicação	102
3.2.5	Balço Energético	110
3.2.5.1	Trânsito de energia no gerador Blumlein	112

3.2.5.2 Eficiência energética do gerador de Marx para o gerador Blumlein..	118
3.2.6 Simulação com Componentes Ideais.....	119
3.3 Conclusões.....	121
4. Resultados Experimentais e de Simulação	123
4.1 Introdução.....	123
4.2 Dimensionamento do Protótipo Laboratorial do GHAT	123
4.2.1 Gerador de Marx monopolar de impulsos positivos.....	123
4.2.1.1 Circuito de comando e disparo dos MOSFETs.....	126
4.2.2 Gerador Blumlein	130
4.3 Simulação do GHAT tendo em conta as Características Reais do Circuito.....	132
4.4 GHAT	134
4.4.1 Sinais de comando nas portas dos MOSFETs.....	134
4.4.2 Formas de onda de tensão V_{Marx} e V_{out}	136
4.5 Modelação do GHAT	138
4.5.1 Circuito de simulação	138
4.5.2 Formas de onda de tensão em cada estágio do Gerador de Marx	138
4.5.3 Formas de onda de tensão no Gerador Blumlein.....	142
4.6 Balanço Energético do GHAT.....	149
4.6.1 Trânsito de energia do gerador de Marx para o gerador Blumlein	151
4.7 Comparação das Formas de Onda de Tensão na Carga do GHAT com 1 até 5 Estágios no Gerador de Marx e com 2 e 3 Estágios no Gerador Blumlein.....	154
4.8 Comparação das Formas de Onda de Tensão na Carga do GHAT com os resultados de outros autores.....	160
5. Conclusões.....	163
5.1 Considerações finais	163
5.2 Trabalho realizado	163
5.3 Principais resultados alcançados	165

5.4 Perspetivas de trabalho futuro	166
Bibliografia.....	167
Anexos.....	173
Anexo I - Impulsos num Gerador Blumlein Usando o Teorema de Laplace	173
Anexo II - Imagens do protótipo construído	177
Anexo III - Placa de cada estágio do gerador de Marx	179

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Exemplo de um sistema de PP, [Mankowski et al., 2000]	11
Figura 2.2 – Diagrama de blocos associado com a geração de impulsos de um sistema de PP.....	13
Figura 2.3 – a) Símbolo do MOSFET (tipo N); b) Esquema simplificado e símbolo do IGBT	15
Figura 2.4 – Esquema simplificado de uma célula biológica com núcleo, [Schoenbach et al., 2004]	17
Figura 2.5 – Efeito da aplicação de um campo elétrico sobre uma célula, [Klonowski et al., 2006]	18
Figura 2.6 – Efeito da aplicação de um campo elétrico à membrana de uma célula [Klonowski et al., 2006]	18
Figura 2.7 – Esquemático da acumulação de carga após um campo elétrico muito curto aplicado a uma célula [Stacey et al., 2011]	20
Figura 2.8 – Estrutura de uma célula biológica e o seu modelo elétrico equivalente simplificado [Schoenbach et al., 2004]	21
Figura 2.9 – Necessidades de Campos elétricos/largura de impulso para aplicações em potência pulsada [Schoenbach et al., 2002]	22
Figura 2.10 – Exemplos de tipo de impulsos, a) bipolares e b) monopulares	23
Figura 2.11 – Circuito RC simples	25
Figura 2.12 – Diagrama de tensões do circuito RC simples	27
Figura 2.13 – Gráfico da razão da energia E_{C1i}/E_p , versus queda de tensão do condensador em cada impulso em [%]	28
Figura 2.14 – Circuito simplificado de geração de impulsos bipolares com recurso a 2 fontes de alimentação	29
Figura 2.15 – Diagrama geral de tensões do circuito da Figura 2.14.	30
Figura 2.16 – Circuito simplificado gerador de Marx [Jiang et al., 2009; Liu et al., 2009; Redondo et al., 2005a]	31
Figura 2.17 – Exemplo de resultados experimentais do circuito da Figura 2.16, eixo vertical 1kV/div, eixo horizontal 50 μ s/div [Redondo et al., 2005a]	32
Figura 2.18 – Diagrama de tensões do circuito gerador de Marx	33
Figura 2.19 – Circuito simplificado da nova topologia de geração de impulsos bipolares de alta tensão [Canacsinh et al., 2008]	34
Figura 2.19a) – Circuito simplificado de carga dos condensadores da nova topologia de geração de impulsos bipolares de alta tensão [Canacsinh et al., 2008]	34
Figura 2.19b) – Circuito simplificado de geração de impulsos de tensão positivos da nova topologia de geração de impulsos bipolares de alta tensão [Canacsinh et al., 2008]	35
Figura 2.19c) – Circuito simplificado de geração de impulsos de tensão negativos da nova topologia de geração de impulsos bipolares de alta tensão [Canacsinh et al., 2008]	35
Figura 2.20 – Resultado experimental de impulso bipolar na carga do circuito gerador de Marx da Figura 2.18, eixo horizontal 5 μ s/div, eixo vertical 500 V/div, [Canacsinh et al., 2008]	36

Figura 2.21 – Circuito simplificado da topologia somador de tensão, para geração de impulsos bipolares de alta tensão [Gao et al., 2011]	37
Figura 2.21a) – Carga dos condensadores do circuito simplificado da topologia somador de tensão, para geração de impulsos bipolares de alta tensão [Gao et al., 2011] .	38
Figura 2.21b) – Geração de impulsos de tensão negativos do circuito simplificado da topologia somador de tensão, para geração de impulsos bipolares de alta tensão [Gao et al., 2011]	38
Figura 2.21c) – Geração de impulsos de tensão positivos do circuito simplificado da topologia somador de tensão, para geração de impulsos bipolares de alta tensão [Gao et al., 2011]	39
Figura 2.22 – Resultado experimental de impulso bipolar na carga do circuito somador de tensão da Figura 2.20, eixo horizontal 50ns/div, eixo vertical 500V/div [Gao et al., 2011]	39
Figura 2.23 – Exemplo de uma LT	41
Figura 2.24 – Modelo eléctrico equivalente de uma LT [Sluis, 2001]	41
Figura 2.25 – Exemplo de um circuito de propagação de onda de tensão numa LT, e uma carga	43
Figura 2.26 – a) Circuito formado por uma fonte de tensão, uma LT, e uma carga; b) forma de onda de tensão na carga; c) diagrama de Bewley	44
Figura 2.27 – Diagrama de Bewley do circuito da Figura 2.26, para valores de carga Z_{Load} , indicados	46
Figura 2.28 – Exemplo de uma linha Blumlein: a) circuito; b) forma de onda de tensão na carga; c) circuito equivalente de impedâncias no ponto de descontinuidade, ponto b	47
Figura 2.29 – Propagação de uma onda de tensão numa Blumlein line e tensão na carga	48
Figura 2.30 – Exemplo do gerador de impulsos bipolar de Feng Chen [Chen et al., 2000]	49
Figura 2.31 – Forma de onda do gerador de impulsos bipolar [Chen et al., 2000]	50
Figura 2.32 – Esquema do gerador de impulsos bipolar [Angelis et al., 2006]	50
Figura 2.33 – Forma de onda de tensão e na carga do gerador Blumlein [Angelis et al., 2006]	51
Figura 2.34 – Circuito simplificado do gerador de impulsos bipolar [Rebersek et al., 2009]	52
Figura 2.35 – Forma de onda de tensão na carga do gerador Blumlein [Rebersek et al., 2009]	52
Figura 3.1 – Esquema simplificado do circuito GHAT, considerando um gerador de Marx ligado a uma associação de linhas Blumlein, respetivamente, com m e n estágios	59
Figura 3.2 – Esquema simplificado do circuito GHAT, com 1 estágio no gerador de Marx ligado a 1 estágio do gerador Blumlein	60
Figura 3.3 – Formas de onda teóricas do circuito GHAT da Figura 3.2, a) tensão na gate do MOSFET M_1 , b) tensão na gate dos MOSFETs M_2 , c) tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} , d) tensão na carga V_{out}	61
Figura 3.4 – Esquema simplificado do circuito GHAT, com 2 estágios no gerador de Marx ligado a 2 estágios no gerador Blumlein	62

Figura 3.5 – Formas de onda teóricas do circuito GHAT da Figura 3.4, a) tensão na gate dos MOSFETs M_1, M_3 , b) tensão na gate dos MOSFETs M_2, M_4 , c) tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} , d) tensão na carga V_{out}	63
Figura 3.6 – Esquema simplificado do circuito GHAT, com 3 estágios no gerador de Marx ligado a 3 estágios no gerador Blumlein	64
Figura 3.7 – Formas de onda teóricas do circuito GHAT da Figura 3.6, a) tensão na gate dos MOSFETs M_1, M_3 e M_5 , b) tensão na gate dos MOSFETs M_2, M_4 e M_6 , c) tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} , d) tensão na carga V_{out}	65
Figura 3.8 – Esquema simplificado do circuito GHAT, com m estágios no gerador de Marx ligado a n estágios no gerador Blumlein	67
Figura 3.9 – Formas de onda teóricas do circuito GHAT da Figura 3.8, a) tensão na gate dos MOSFETs M_{2m-1} , b) tensão na gate dos MOSFETs M_{2m} , c) tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} , d) tensão na carga V_{out}	69
Figura 3.10 – Esquema simplificado do circuito de potência do gerador de Marx do GHAT	70
Figura 3.10a) – Modo de carga dos condensadores de potência do gerador de Marx do GHAT	70
Figura 3.10b) – Modo de geração de impulsos de alta tensão do gerador de Marx do GHAT	70
Figura 3.11 – Capacidade do condensador em cada estágio que garante o decaimento da tensão à saída do gerador de Marx	74
Figura 3.12 – Formas de onda de tensão e corrente num MOSFET em comutação, considerando uma carga resistiva	75
Figura 3.13 – Diagrama geral de tensões do gerador de Marx do GHAT	76
Figura 3.14 – Circuito simplificado do gerador Blumlein com 3 estágios [Verma et al., 2006]	78
Figura 3.15 – a) Circuito de potência de um gerador Blumlein com 1 estágio. Ponto a, entrada da linha ativa; ponto b, ponto de união entre as linha ativa e a linha passiva; ponto c, saída da linha passiva. b) Circuito equivalente de impedâncias na zona b	79
Figura 3.16 – a) Circuito de potência de um gerador Blumlein com 2 estágios. Ponto a, entrada das linhas ativas; ponto b, ponto de união entre as linhas ativas e as linhas passivas em cada estágio; ponto c, saída das linhas passivas. b) circuito equivalente de impedâncias na zona b, circuito que inclui os pontos b_1 e b_2	81
Figura 3.17 – a) Circuito de potência do gerador Blumlein do GHAT. Ponto a, entrada das linhas ativas; ponto b, ponto de união entre as linhas ativas e as linhas passivas em cada estágio; ponto c, saída das linhas passivas. b) circuito equivalente de impedâncias na zona b, circuito que inclui os pontos b_1, b_2 e b_3 ...	84
Figura 3.18 – a) Circuito de potência do gerador Blumlein do GHAT. Ponto a, entrada das linhas ativas; ponto b, ponto de união entre as linhas ativas e as linhas passivas em cada estágio; ponto c, saída das linhas passivas. b) circuito equivalente de impedâncias na zona b, circuito que inclui os pontos b_1, b_2 até b_n .	87
Figura 3.19 – Troços de linhas de transmissão onde se verifica o efeito das correntes de fuga I_{z2}	91
Figura 3.20 – Corte transversal de um toroide rectangular	92
Figura 3.21 – Condensador equivalente para cálculo de Z_2 num gerador Blumlein	93
Figura 3.22 – Influência da distância d em [m], no cálculo de Z_2 em [Ω], num gerador Blumlein	94

Figura 3.23 – Diagrama de Bewley para o gerador Blumlein com carga adaptada	95
Figura 3.24 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $0 \leq t \leq \delta$	96
Figura 3.25 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $\delta \leq t \leq 2\delta$	97
Figura 3.26 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $2\delta \leq t \leq 3\delta$	97
Figura 3.27 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $t \geq 3\delta$	98
Figura 3.28 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $0 \leq t \leq \delta$	98
Figura 3.29 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $\delta \leq t \leq 2\delta$	99
Figura 3.30 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $2\delta \leq t \leq 3\delta$	99
Figura 3.31 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $t \geq 3\delta$	100
Figura 3.32 – Circuito equivalente do ponto b do gerador Blumlein para cálculo da tensão na carga	101
Figura 3.33 – Gerador Blumlein com 2 estágios	103
Figura 3.34 – Gerador Blumlein com 3 estágios	106
Figura 3.35 – Formas de onda teóricas de tensão na carga, V_{out} , para os exemplos especificados no ponto 3.2.4.8.2	109
Figura 3.36 – Energia no gerador Blumlein em $t=\delta$	112
Figura 3.37 – Energia no gerador Blumlein em $t=2\delta$	113
Figura 3.38 – Energia no gerador Blumlein em $t=3\delta$	114
Figura 3.39 – Energia no gerador Blumlein em $t=\delta$	115
Figura 3.40 – Energia no gerador Blumlein em $t=2\delta$	116
Figura 3.41 – Energia no gerador Blumlein em $t=3\delta$	117
Figura 3.42 – Esquema simplificado do GHAT	119
Figura 3.43 – Circuito do GHAT, simulado no PSPICE com componentes com características ideais	120
Figura 3.44 – Resultados de simulação do circuito do GHAT, constituído por componentes ideais	121
Figura 4.1 – Esquema simplificado do circuito de potência do gerador de Marx do GHAT (Figura 3.10)	123
Figura 4.2 – Circuito simplificado de comando e de disparo dos MOSFETs	127
Figura 4.3 – Sinais de comando de carga e impulso do gerador de Marx da Figura 4.1, com um período de 10ms e uma largura de impulsos de 50 μ s com um tempo morto de 10 μ s	128

Figura 4.4 – Sinais de comando da gate dos MOSFETs à entrada (linha azul, ganho vertical 2V/div) e à saída (linha roxa, ganho vertical 5V/div) da drive TC1410N, ganho horizontal 100ns/div, $f=100\text{Hz}$	129
Figura 4.5 – Circuito de potência do gerador Blumlein do GHAT	131
Figura 4.6 – Circuito de simulação no PSPICE do GHAT com características reais	133
Figura 4.7 – Forma de onda de tensão no primeiro estágio do gerador de Marx, linha amarela; à saída do gerador de Marx, linha vermelha; e forma de onda de tensão na carga do gerador GHAT, linha azul, ganho vertical 1kV/div, ganho horizontal 50ns/div	133
Figura 4.8 – Forma de onda na gate dos MOSFETs que compõem o gerador de Marx, CH1 na gate dos MOSFETs de impulso e CH2 na gate dos MOSFETs de carga dos condensadores, ganho vertical 5V/div, ganho horizontal 10 μs /div	134
Figura 4.9 – Formas de onda dos impulsos na gate dos MOSFETs do gerador de Marx, ganho vertical 5V/div, ganho horizontal 50ns/div	135
Figura 4.10 – Formas de onda de tensão V_{Marx} (azul escuro), I_{Marx} (roxo) e V_{out} (azul claro)	137
Figura 4.11 – Formas de onda de tensão no 1º estágio do Gerador de Marx com ganho vertical 100V/div e ganho horizontal 100 μs /div	139
Figura 4.12 – Simulação das formas de onda de tensão no 1º estágio do gerador de Marx, correspondentes às formas de onda da Figura 4.11 ganho vertical 50V/div e ganho horizontal 1 μs /div	140
Figura 4.13 – Resultados experimentais e de simulação das formas de onda de tensão aos terminais do condensador C_1 e à saída do gerador de Marx	141
Figura 4.14 – Resultados experimentais e de simulação das formas de onda de tensão aos terminais do MOSFET de carga dos condensadores do 1º estágio e à saída do gerador de Marx	142
Figura 4.15 – Resultados experimentais e de simulação das formas de onda de tensão à entrada das linhas passivas T_2 , T_4 e T_6 , no condutor interior do gerador Blumlein	143
Figura 4.16 – Resultados experimentais e de simulação das formas de onda de tensão à entrada das linhas passivas T_2 , T_4 e T_6 , no condutor exterior do gerador Blumlein	145
Figura 4.17 – Formas de onda de tensão à saída do gerador de Marx e na carga do gerador Blumlein com $Z_{\text{out}}=600\Omega$ (azul), o dobro de carga adaptada	146
Figura 4.18 – Formas de onda de tensão à saída do gerador de Marx e na carga do gerador Blumlein com $Z_{\text{out}}=300\Omega$, igual a carga adaptada	147
Figura 4.19 – Formas de onda de tensão à saída do gerador de Marx e na carga do gerador Blumlein com $Z_{\text{out}}=150\Omega$, igual a metade do valor da carga adaptada	148
Figura 4.20 – Cálculo da Energia utilizando o método das áreas por integração das imagens da Figura 4.10, V_{Marx} 500V/div, V_{out} 2kV/div e I_{Marx} 50A/div	151
Figura 4.21 – Esquema simplificado do GHAT	153
Figura 4.22 – Formas de onda de tensão V_{Marx} (200V/div) e V_{out} (500V/div), com 1 estágio no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein	155
Figura 4.23 – Formas de onda de tensão V_{Marx} (500V/div) e V_{out} (500V/div), com 2 estágios no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein	156
Figura 4.24 – Formas de onda de tensão V_{Marx} (500V/div) e V_{out} (500V/div), com 3 estágios no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein	157

Figura 4.25 – Formas de onda de tensão V_{Marx} (500V/div) e V_{out} (1000V/div), com 4 estágios no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein	158
Figura 4.26 – Formas de onda de tensão V_{Marx} (500V/div) e V_{out} (1000V/div), com 5 estágios no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein	159
Figura 4.27 – Formas de onda de tensão V_C , V_{Marx} e V_{out} , com 1 estágio no gerador de Marx e 3 estágios no gerador Blumlein	160
Figura 4.28 – (1) Forma de onda de tensão num sistema alimentado por uma fonte de alta tensão e 3 estágios no gerador Blumlein, [Verma et al., 2006]	160
Figura 4.29 – (Experimental) Forma de onda de tensão num sistema alimentado por uma fonte de alta tensão e 5 estágios no gerador Blumlein, [Rossi et al., 2003b]	161
Figura AI.1 – Esquemático de um circuito Blumlein	173
Figura AI.2 – Circuito equivalente da transformada de Laplace de um circuito Blumlein .	173
Figura AII.1 – Vista geral	177
Figura AII.2 – Pormenor do Gerador Blumlein	178
Figura AII.3 – Comando e controlo do GHAT	178
Figura AIII.1 – Vista de baixo	179
Figura AIII.1 – Vista de cima	179

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resumo dos principais parâmetros dos interruptores usados nas aplicações de potência pulsada [Schamiloglu et al., 2004]	16
Tabela 2.2 – Parâmetros de uma mitocôndria [Schoenbach et al., 2004]	21
Tabela 2.3 – Valores de capacidade do condensador C_1 para que $\Delta v_{C1}(\%)$ seja inferior ao valor indicado e os valores de E_{C1i} em C_1 e E_p	28
Tabela 2.4 – Propagação de uma onda de tensão para o caso de carga desadaptada Z_{out}	45
Tabela 3.1 – Gama de valores dos parâmetros elétricos GHAT de outros autores para aplicações biológicas semelhantes aos especificados para este trabalho	56
Tabela 3.2 – Valores dos parâmetros elétricos pretendidos para o GHAT a ser construído neste trabalho	56
Tabela 3.3 – Consequências da falha de sincronismo de 1 dos MOSFETs durante a carga/descarga dos condensadores	72
Tabela 4.1 – Resumo das características consideradas mais importantes do MOSFET ...	124
Tabela 4.2 – Resumo das características principais da IXRFD630	130
Tabela 4.3 – Resumo das características principais dos impulsos de tensão V_{Marx} , I_{Marx} e V_{out}	137

Lista de Abreviaturas e Terminologia

- α – razão entre o valor da impedância de carga e de carga adaptada;
- Γ – coeficiente de transmissão;
- $\Gamma_{n,x}^k$ – coeficiente de transmissão num gerador Blumlein com n estágios, no estágio x e para o fator de impedância de carga k;
- $\Gamma_{x,i}^n$ – coeficiente de reflexão num gerador Blumlein com n estágios, no estágio x depois de consideradas as influências dos outros estágios com $i = 1, \dots, n$;
- ΔQ – variação de carga de uma linha de transmissão;
- Δt – intervalo de tempo;
- Δv_{C1} – queda de tensão no condensador C_1 ;
- Δx – segmento de uma linha de transmissão;
- $\Delta x/\Delta t$ – velocidade com que a onda eletromagnética percorre uma linha de transmissão;
- η – eficiência;
- η_t – eficácia;
- ρ – coeficiente de reflexão;
- $\rho_{n,x}^k$ – coeficiente de reflexão num gerador Blumlein com n estágios, no estágio x e para o fator de impedância de carga k;
- $\rho_{x,i}^n$ – coeficiente de reflexão num gerador Blumlein com n estágios, no estágio x depois de consideradas as influências dos outros estágios com $i = 1, \dots, n$;
- ρ_1 – resistividade do meio extracelular;
- ρ_2 – resistividade do citoplasma;
- ϕ – fluxo magnético;
- ψ – fluxo elétrico;
-
- a – diâmetro da célula;
- B – Indução magnética;
- c – velocidade da luz no vácuo;
- C – capacidade do cabo coaxial;
- C_1 – condensador de potência;
- C_2 – condensador de potência;
- C_3 – condensador de potência;
- C_4 – condensador de potência;
- C_5 – condensador de potência;
- $C_{(1, \dots, 5)}$ – condensadores do circuito de potência do gerador de Marx C_1 a C_5 ;
- C_{ai} – Condensadores do circuito de potência de impulso negativo do Inductive Adder $\{C_{a1}, C_{a2}, \dots, C_{ai}, \dots, C_{an}\}$;
- C_{bi} – Condensadores do circuito de potência de impulso positivo do Inductive Adder $\{C_{b1}, C_{b2}, \dots, C_{bi}, \dots, C_{bn}\}$;
- $C_{Blumlein}$ – capacidade total do gerador Blumlein;
- CERN – Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear;
- C_m – condensadores do circuito de potência do gerador de Marx C_1 a C_5 ;
- C_{Marx} – capacidade total do gerador de Marx em cada impulso de tensão à saída do gerador de Marx;
- C_{mc} – capacidade específica da membrana por unidade de área;
- d – Diâmetro do condutor interior do cabo coaxial;

D – Diâmetro exterior do cabo coaxial;
 DNA – composto orgânico com informação genética que se encontra no núcleo das células de um organismo;
 E – campo elétrico;
 e – exponencial;
 E_{Blumlein} – energia armazenada no gerador Blumlein;
 E_{C1} – energia inicial armazenada no condensador C_1 ;
 $E_{\text{crítico}}$ – campo elétrico crítico;
 E_{Marx} – energia armazenada no gerador Marx;
 E_{Marxi} – energia armazenada no gerador Marx no início do impulso de tensão;
 E_{Marxf} – energia armazenada no gerador Marx no final do impulso de tensão;
 E_{MB} – energia enviada do gerador de Marx para o gerador Blumlein;
 E_p – energia do impulso;
 f – fator determinado pelas características da célula;
 H – campo magnético;
 $i(x, t)$ – onda de corrente numa linha de transmissão;
 I_{DM} – valor limite para a máxima corrente de dreno admissível;
 I_{pico} – corrente máxima de pico;
 I_1 – conjunto de interruptores;
 IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor;
 k – factor de impedância de carga;
 $k_{(n=1)}$ – factor de impedância de carga num gerador Blumlein com n estágios, quando $n=1$;
 L – indutância do cabo coaxial;
 LT – linha transmissão;
 LT_1 – linha transmissão;
 LT_2 – linha transmissão;
 LT_3 – linha transmissão;
 LT_4 – linha transmissão;
 LT_5 – linha transmissão;
 LT_6 – linha transmissão;
 LT_{2n} – linha transmissão;
 LT_{2n-1} – linha transmissão;
 m – número de estágios do gerador de Marx;
 M_1 – MOSFET de impulso do circuito de potência do 1º estágio do gerador de Marx;
 M_2 – MOSFET de carga dos condensadores do circuito de potência do 1º estágio do gerador de Marx;
 M_3 – MOSFET de impulso do circuito de potência do 2º estágio do gerador de Marx;
 M_4 – MOSFET de carga dos condensadores do circuito de potência do 2º estágio do gerador de Marx;
 M_5 – MOSFET de impulso do circuito de potência do 3º estágio do gerador de Marx;
 M_6 – MOSFET de carga dos condensadores do circuito de potência do 3º estágio do gerador de Marx;
 M_7 – MOSFET de impulso do circuito de potência do 4º estágio do gerador de Marx;
 M_8 – MOSFET de carga dos condensadores do circuito de potência do 4º estágio do gerador de Marx;
 M_9 – MOSFET de impulso do circuito de potência do 5º estágio do gerador de Marx;

M_{10} – MOSFET de carga dos condensadores do circuito de potência do 5º estágio do gerador de Marx;
 $M_{(1,3, \dots, 9)}$ – MOSFETs de impulso do circuito de potência do gerador de Marx $\{M_1, M_3, \dots, M_9\}$;
 $M_{(2,4, \dots, 10)}$ – MOSFETs de carga dos condensadores do circuito de potência do gerador de Marx $\{M_2, M_4, \dots, M_{10}\}$;
 M_{2m-1} – MOSFETs de impulso do circuito de potência do gerador de Marx M_1 a M_9 ;
 M_{2m} – MOSFETs de carga dos condensadores do circuito de potência do gerador de Marx M_2 a M_{10} ;
 M_{ai} – interruptor de estado sólido (MOSFET) $\{M_{a1}, M_{a2}, \dots, M_{ai}, \dots, M_{an}\}$;
 M_{bi} – interruptor de estado sólido (MOSFET) $\{M_{b1}, M_{b2}, \dots, M_{bi}, \dots, M_{bn}\}$;
 M_{c1} – interruptor de estado sólido (MOSFET);
 M_{c2} – interruptor de estado sólido (MOSFET);
 M_{d1} – interruptor de estado sólido (MOSFET);
 M_{d2} – interruptor de estado sólido (MOSFET);
MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor;
 n – número de estágios do gerador Blumlein;
 ns – nanossegundos;
PEF – Pulsed Electric Fields;
PP – potência pulsada;
 ps – picossegundos;
 R_1 – resistência;
 R_{Load} – resistência da carga do circuito de potência;
 $R_{DS(on)}$ – resistência equivalente de funcionamento na zona de resistência constante dos MOSFETs;
 R_{g1} – resistência de proteção da fonte de alimentação;
 R_{g2} – resistência de proteção da fonte de alimentação;
 S – interruptor;
 S_1 – interruptor de estado sólido;
 S_2 – interruptor de estado sólido;
 S_{I0} – interruptor de estado sólido (IGBT);
 S_{Iai} – interruptor de estado sólido (IGBT) $\{T_{a1}, \dots, T_{an}\}$;
 S_{Ibi} – interruptor de estado sólido (IGBT) $\{T_{b1}, \dots, T_{bn}\}$;
 S_{Ici} – interruptor de estado sólido (IGBT) $\{T_{c1}, \dots, T_{cn}\}$;
 S_{Idi} – interruptor de estado sólido (IGBT) $\{T_{e1}, \dots, T_{en}\}$;
 t_1 – tempo de carga do condensador C_1 ;
 t_c – tempo de carga da membrana da célula;
 t_{on} – duração de um impulso;
 t_x – largura do impulso aplicado à célula;
 T – período de uma forma de onda;
 T_{on} – tempo de subida, “rise-time”, dos MOSFETs;
 $u(x, t)$ – onda de tensão numa linha de transmissão;
 v – velocidade de propagação da onda eletromagnética;
 V – volume de concentração da célula;
 V_1 – fonte de alimentação do circuito de potência;
 $V_{Blumlein}$ – tensão de entrada do gerador Blumlein;
 V_i – tensão no início do impulso nos condensadores do circuito de potência;
 V_{C1} – tensão do condensador C_1 ;

V_{C1max} – tensão máxima no condensador C_1 ;
 V_{C1min} – tensão mínima no condensador C_1 ;
 V_{cc} – tensão de alimentação do circuito de comando do GHAT;
 $V_{crítico}$ – potencial crítico;
 V_{dc} – tensão de alimentação do GHAT;
 V_{DSS} – tensão de disrupção dreno-fonte dos MOSFETs;
 V_f – tensão no final do impulso nos condensadores do circuito de potência;
 V_{Load} – tensão na carga;
 V_{Marx} – tensão à saída do gerador de Marx;
 V_{out} – tensão à saída do gerador de Blumlein;
 V_V – volume de concentração da célula.
 W – energia necessária para provocar a disrupção de uma membrana;
 Z_0 – impedância característica do cabo coaxial que constitui os troços do gerador Blumlein;
 Z_2 – impedância de modo secundário do gerador Blumlein;
 $Z_{Blumlein}$ – impedância de entrada do gerador Blumlein;
 Z_g – impedância interna da fonte de alimentação;
 Z_i – representa a impedância vista pela onda refletida para a massa;
 Z_{out} – impedância da carga;
 Z_r – representa a impedância vista pela onda incidente para a massa.

1. Introdução

1.1 Motivação

A evolução verificada na área dos semicondutores de potência, motivada pelos novos dispositivos desenvolvidos para os conversores de potência, usados na tração ferroviária na década de 90 do século XX até aos modernos conversores para os geradores eólicos no início deste século XXI, assim como o fim da guerra fria, promoveu o desenvolvimento das aplicações industriais na área da Potência Pulsada (PP). A PP passou de uma ciência e tecnologia desenvolvida no início dos anos quarenta com aplicações para fins militares, por exemplo para a simulação dos efeitos eletromagnéticos associados com a explosão de dispositivos nucleares, ou usada em grandes laboratórios de física, como o CERN (Organização Europeia de Pesquisa Nuclear), por exemplo para aceleração dos feixes de partículas, para uma ferramenta industrial que nos dias de hoje apresenta um enorme potencial em aplicações civis, na área alimentar, ambiente, saúde ou engenharia de materiais, sendo hoje chave no desenvolvimento da sociedade e no seu bem-estar, propósito que deve acompanhar qualquer tecnologia.

Atualmente, a PP tornou-se uma ferramenta muito útil em diversas áreas de aplicação, nomeadamente: no tratamento de gases e águas contaminadas por aplicação de plasmas não térmicos, na diminuição de custos na indústria alimentar com a redução da temperatura de muitos processos, no tratamento revolucionário do cancro por meio da eletroquimioterapia até à moldagem e corte a alta velocidade de chapas metálicas utilizando pressão de origem magnética. Em todas estas áreas de aplicação são utilizados impulsos repetitivos positivos e/ou negativos de alta tensão, de forma a melhorar as propriedades de um produto ou a eficiência de um processo. Dependendo da aplicação específica, os impulsos elétricos gerados podem ser extremamente curtos (alguns nanossegundos) e possuir taxas de repetição até dezenas de milhares por segundo, ou longos (milissegundos) com taxas de repetição na ordem de alguns impulsos por segundo, sendo que as potências instantâneas variam de alguns watts até dezenas de megawatts, mas com potências médias pedidas à rede, normalmente, inferiores à centena de kilowatts.

O que torna a PP interessante é este conceito eficiente de entregar energia, em que se podem gerar potências de pico extremamente elevadas, durante intervalos de tempo muito bem determinados e curtos, sem a necessidade de utilização de grandes fontes de armazenamento de energia, vulgarmente usadas nos sistemas de tensão contínua e alternada. No passado esta tecnologia era dominada por interruptores baseados em tubos de gás e de vácuo (i. e. válvulas eletrónicas) para comutar potências elevadas necessárias para aplicações militares e de física de partículas. Com o advento tecnológico dos semicondutores nos anos setenta, e em particular dos semicondutores de potência nos anos noventa, foi possível iniciar-se o desenvolvimento de geradores de PP baseados em semicondutores, ainda, com potências reduzidas quando comparados com as válvulas, sendo

necessário o recurso a técnicas e topologias especiais para distribuir a tensão e corrente por vários dispositivos associados em série ou paralelo, para aumentar a tensão e a corrente comutadas, respectivamente. Esta limitação de potência é largamente compensada com a elevada flexibilidade e eficiência, juntamente com a redução do tamanho do equipamento e custos associados.

A utilização de impulsos repetitivos de alta tensão monopolares ou bipolares, associados às técnicas de PP, está hoje disseminada em todos os campos industriais, que vão desde o processamento de alimentos (e.g. pasteurização), tratamento de água (e.g. processos de oxidação avançada), moldagem eletromagnética (e.g. cravação de cabos eléctricos), tratamentos de gases tóxicos (e.g. catalisadores), aplicações médicas (e.g. regeneração), fragmentação de rochas até lasers. Nestas aplicações, a PP apresenta como principais vantagens a poupança de energia, aumento do valor acrescentado aos produtos, otimização de processos, rendimentos energéticos elevados, processos ambientalmente limpos e a redução de custos.

Em Portugal, a PP está a dar os primeiros passos, tendo-se iniciado a transferência desta tecnologia para a indústria. A mais-valia desta área de investigação está presente, de forma direta, no aumento de qualidade do produto final, na melhoria da eficiência do processo de fabrico e na transferência de conhecimento para a indústria. De forma indireta, na criação e consolidação de conhecimento, na transferência destes para a sociedade através das pessoas formadas e no desenvolvimento interdisciplinar das áreas relacionadas com as aplicações.

Todas estas razões impulsionaram este trabalho, a modelação e a construção de um protótipo de um Gerador Híbrido de Alta Tensão (GHAT) versátil capaz de gerar impulsos bipolares repetitivos de alta tensão com largura inferior ao microssegundo, tendo em vista as aplicações na área da biomedicina. Este desafio foi motivado pela tentativa de reunião do melhor de duas tecnologias, o Gerador de Marx baseado em semicondutores, previamente validado pela comunidade científica, e desenvolvido pelo Grupo de Investigação em Aplicações Avançadas de Potência Pulsada (GIAAPP), do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), onde o autor deste trabalho está inserido, mas que tem problemas em relação ao número de estágios usados devido ao valor relativamente reduzido da tensão de bloqueio dos semicondutores assim como os seus tempos de passagem à condução e ao corte; e pelo uso de linhas de transmissão associadas na topologia Blumlein, circuito usado geralmente para a geração de impulsos de tensão monopolares, positivos ou negativos, e que apesar da sua simplicidade tem reduzida versatilidade, tendo problemas associados com dimensão, peso e adaptação da impedância com uma carga.

Este trabalho foi desenvolvido inicialmente no laboratório do GIAAPP do ISEL e concluído na empresa EnergyPulse Systems (EPS), com o apoio do QREN (Quadro de Referência Estratégico Nacional), através do projeto QREN, 1600, Aplicações Avançadas em Potência Pulsada.

Deste trabalho resultaram duas publicações principais em revistas científicas internacionais com arbitragem científica de especialidade nesta área:

- Mendes, J. P. M., Canacsinh, H., Redondo, L. M., and Rossi, J. O. 2011. Solid State Marx Modulator with Blumlein Stack for Bipolar Pulse Generation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, pp. 1199-1204.
- Mendes, J. P. M., Redondo, L. M., Canacsinh, H. and Rossi, J. O. 2012. Modeling of a Solid-State Bipolar Blumlein Generator for n Stages. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40(10): 2611-2617.

E quatro publicações em conferência:

- João Mendes, Manuela Vieira and Luís Redondo, 2010. Hybrid Pulsed Power Modulator for Biomedical Applications – The use of semiconductors with Transmission lines; conferência doutoral DoCEIS'10, Caparica, Portugal, 22 – 24 February.
- Mendes, J. P. M., Redondo, L. M., Canacsinh, H. and Rossi, J. O. 2011. Bipolar Pulse Generation Based on Unipolar Solid-State Marx Modulator with Blumlein Line Stack. *Pulsed Power Conference*, Chicago, Illinois, USA, 19 – 23 June.
- João P. M. Mendes, Luís M. Redondo, H. Canacsinh, M. Vieira and José O. Rossi. Modelling of n Stage Blumlein Stacked Lines for Bipolar Pulse Generation; conferência doutoral DoCEIS'12, Caparica, Portugal, 27 – 29 February.
- J. Mendes, L. Redondo, M. Pereira, 2014. New Semiconductor Based Blumlein Modulator for Non-Thermal Plasma Discharges in Water, IEEE ICOPS 2014, 41st IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) & 20th International Conference on High Power Particle Beams (BEAMS), Washington, USA, 25 – 29 May.

1.2 Objetivos

Tendo em conta a motivação apresentada no ponto 1.1, neste trabalho pretende-se, ainda, contribuir para o desenvolvimento em Portugal da técnica de geração de impulsos curtos de alta tensão, ordem da centena de microssegundos, para aplicações na área da biomédica. A geração de impulsos bipolares repetitivos, inferiores ao microssegundo, de alta tensão é ainda hoje uma tarefa complexa devido às limitações dos dispositivos semicondutores existentes, nomeadamente em termos de tensão e tempos de comutação, assim como das linhas de formatação de impulsos, em termos de dimensão, peso, adaptação de impedância e flexibilidade dos impulsos gerados.

Assim, os principais objectivos deste trabalho são:

- Desenvolver uma nova metodologia de projeto e construção de um gerador de impulsos bipolar de alta tensão, para impulsos da ordem da centena de nanossegundos, baseado no conceito inovador de uma topologia híbrida que funde um gerador de Marx, com semicondutores de potência, para gerar impulsos monopolares positivos, e que comande de uma forma flexível um gerador Blumlein para obtenção de impulsos bipolares com largura na ordem da centena de nanossegundos para ser testado em cargas equivalentes às das aplicações na área da biomedicina. Para o gerador poder ser usado para aplicações biomédicas tem que gerar impulsos de tensão com as características (amplitude, forma, frequência e largura de impulso) requeridas para este tipo de aplicações. Para este protótipo, escolheram-se as aplicações em que os impulsos são idealmente bipolares rectangulares e apresentam tipicamente tensões até 10 kV e largura de impulso até 100ns, sendo que a carga é do tipo resistivo.
- De forma a justificar a propagação da onda de tensão na associação de linhas Blumlein, vai sintetizar-se um modelo matemático genérico inovador para um gerador Blumlein com n estágios, com o cálculo dos coeficientes de reflexão e transmissão, para vários valores de amplitude da carga, que permitiram estimar a amplitude da tensão em cada ponto da linha e o tempo em que ocorre. Serão comparadas as amplitudes dos impulsos teóricos no domínio do tempo, nos diversos estágios do gerador Blumlein em relação à carga, com resultados experimentais e resultados obtidos da simulação com o Software PSPICE.

No dimensionamento e construção deste protótipo foi considerada a utilização de meios técnicos e componentes facilmente disponíveis e pouco dispendiosos.

1.3 Pergunta de Investigação

1.3.1 Introdução ao problema

A utilização de semicondutores de potência, na realização do gerador de Marx, em conjunto com linhas de transmissão para geração de impulsos de alta tensão até à dezena de kV com largura de impulso até 100ns é inovador. Esta proposta de fonte pulsada permite juntar o que as duas tecnologias têm de melhor, atenuando algumas das suas limitações, possibilitando a geração de impulsos bipolares de forma mais flexível. Sendo que a modelação do funcionamento do circuito, para n estágios, permite o projeto deste para várias condições de funcionamento e vários valores de amplitude da carga.

O uso de semicondutores em combinação com linhas de transmissão para geração de impulsos de alta tensão bipolares não é comum. Existem vantagens nesta associação, do melhor de duas

tecnologias, para gerar impulsos de sub-microsegundos bipolares: i) tornar o gerador mais compacto; ii) a flexibilidade para comandar a condução e ao corte os semicondutores; iii) a fiabilidade e custo das linhas de transmissão, iv) a menor complexidade em gerar impulsos curtos com as linhas de transmissão.

No entanto, existem limitações inerentes: i) a reduzida tensão de bloqueio, o tempo de passagem à condução e ao corte dos semicondutores; ii) a dimensão e peso das linhas de transmissão; iii) a complexidade na adaptação de impedância entre uma linha de transmissão e uma carga dinâmica.

Ainda que exista descrita a modelação de associação e linhas Blumlein até dois estágios, nunca foi descrita sua generalização para n estágios.

1.3.2 Questões de investigação

1) Como gerar impulsos bipolares de alta tensão (i.e. até 10kV), com flexibilidade de alteração do tempo entre o impulso positivo e negativo, recorrendo à ligação em cascata de um gerador de Marx monopolar com uma associação de linhas de transmissão do tipo Blumlein?

2) Como gerar impulsos de alta tensão (i.e. até 10kV), com largura da ordem da centena de nanossegundos, com base em semicondutores de potência e linhas de transmissão?

3) Qual a influência do sincronismo e tempos de comutação, na operação dos semicondutores de potência dum gerador de Marx, no comando de linhas de transmissão para gerar impulsos na ordem da centena de nanossegundos?

4) Como modelar o funcionamento dum circuito baseado num gerador de Marx monopolar ligado a uma associação de linhas Blumlein, para n estágios, considerando várias condições de funcionamento?

1.3.3 Hipótese e aproximação

Questão 1): Com o recurso a um gerador de Marx conseguem-se obter impulsos monopolares que permitem carregar e descarregar uma linha Blumlein e assim gerar impulsos positivos e negativos, respectivamente.

Então com a associação do gerador Blumlein, com a associação de várias linhas, ao gerador de Marx conseguem-se gerar impulsos de alta tensão bipolares, sendo necessário apenas uma fonte de alimentação. A distância entre os dois impulsos depende da largura do impulso monopolar do gerador de Marx.

Questão 2): Com a utilização de semicondutores de potência capazes de comutar na dezena de nanossegundos, para comandar uma linha Blumlein, podem obter-se impulsos com formato quase retangular na ordem da centena de nanossegundos.

Então da associação do gerador de Marx, baseado em semicondutores, com o gerador Blumlein resulta uma fonte pulsada que disponibiliza impulsos de alta tensão com a forma de onda retangular e tempos da ordem da centena de nanossegundos. Sendo que o tempo de comutação dos dispositivos semicondutores é fator determinante na qualidade da onda disponibilizada pela fonte pulsada.

Questão 3): A geração dos impulsos bipolares é realizada pela carga e descarga da linha Blumlein pelo gerador de Marx. O sincronismo da comutação dos semicondutores nos diferentes estágios, assim como os tempos de comutação dos mesmos, definem o tempo de carga e descarga da linha, que vai condicionar a forma de onda, dos impulsos bipolares na carga, que se pretende quadrada.

Então, considerando a largura dos impulsos na carga, na ordem da centena de ns, os semicondutores escolhidos, para gerar o impulso na linha e a sua descarga subsequente, devem ter tempos de comutação na ordem de alguns ns, e serem disparados por circuitos que permitam o seu sincronismo, considerando tempos de defasagem entre sinais para os diversos semicondutores na gama de alguns ns.

Questão 4): O recurso à modelação matemática dos coeficientes de reflexão e transmissão consegue calcular a propagação da onda de tensão na associação de linhas Blumlein.

Então, é possível estimar a amplitude da tensão em cada ponto da linha e o tempo em que ocorre, para n estágios.

1.4 Metodologia de Investigação Adotada

De forma a dar resposta às questões de investigação apresentadas no ponto 1.3.2, deu-se especial atenção aos seguintes itens.

- Foram identificadas as diversas aplicações da PP com principal incidência nas aplicações biomédicas, no comportamento das células perante a aplicação de um campo elétrico pulsado, de onde saíram os requisitos para o gerador a construir, bem como o tipo de carga a considerar para as experiências;
- Foram analisados os circuitos eletrónicos mais comuns, usados atualmente, para a geração de impulsos de alta tensão bipolares, bem como a tecnologia utilizada;

- Foi analisada e caracterizada a propagação de ondas de tensão em linhas de transmissão, num gerador Blumlein, para a situação de carga adaptada e para a situação de carga não adaptada;
- Desenvolveu-se o conceito de modularidade para definir metodologias de projeto e construir, com base no circuito anterior, um protótipo de uma fonte de alta tensão pulsada para tensões na ordem dos 10kV;
- Construiu-se um circuito equivalente para simulação do GHAT, para analisar o seu desempenho, eficácia e eficiência;
- Comparam-se os resultados do modelo teórico obtido com os resultados de simulação com os resultados experimentais e com os resultados de outros autores para aferir a validade científica dos mesmos, utilizando cargas equivalentes às usadas em aplicações biomédicas;
- Foi realizado o balanço energético do funcionamento do circuito para estimar a eficiência do mesmo.

1.5 Contribuições Originais

De acordo com o trabalho desenvolvido consideram-se originais as seguintes contribuições:

- Projecto de um gerador de Marx monopolar, baseado em semicondutores, com linhas de transmissão associadas sob a forma Blumlein, para obtenção de impulsos bipolares na ordem da centena de nanossegundos;
- Modelação matemática do gerador Blumlein para n estágios, em função do número de estágios e do valor de carga;
- Obtenção de resultados experimentais, por construção de um protótipo de um gerador de impulsos bipolares com dispositivos semicondutores com largura de impulso inferior a 100ns para amplitudes até 10kV.

Como contribuição mais importante e original, foi pela primeira vez comandado um gerador Blumlein através de um gerador Marx monopolar, constituído por semicondutores, para obtenção de impulsos bipolares com largura na ordem da centena de nanossegundos, com possibilidade de variar a distância entre impulso positivo e negativo, e realizada a sua modelação matemática para n estágios.

1.6 Conteúdo

Para tratar os temas propostos, este documento divide-se em 4 capítulos. Para além da introdução (**Capítulo 1**), o conteúdo dos restantes capítulos é o seguinte:

Capítulo 2: Apresenta a técnica de PP, definição e características. Apresenta e caracteriza os dispositivos de comutação mais usados. Descreve algumas aplicações de campos elétricos pulsados, caracteriza o comportamento de uma célula biológica perante um campo elétrico. Define os requisitos dos impulsos de alta tensão adequados para determinada aplicação, apresenta as vantagens da utilização de impulsos de tensão bipolares em relação aos monopolares. Depois de caracterizadas as aplicações e os dispositivos de comutação mais utilizados, descrevem-se as topologias tradicionais, bem como as técnicas mais recentes, dos circuitos de geração de impulsos bipolares. São apresentados resultados, do estado da arte, indicativos do desempenho de circuitos baseados nas topologias consideradas.

Capítulo 3: Define-se a gama dos valores dos parâmetros (amplitude de tensão, frequência e largura de pulso) propostos para os impulsos do GHAT a ser projetado. Propõe-se um circuito inovador baseado em duas topologias já desenvolvidas, para geração de impulsos de alta tensão, alimentado por uma fonte de alimentação contínua de tensão reduzida comparativamente com a amplitude de tensão na carga. Caracteriza-se o comportamento dinâmico do GHAT. Determinam-se as condições para o correto funcionamento do GHAT de modo a obter-se na carga impulsos de alta tensão nas condições desejáveis. Caracteriza-se o GHAT para 1 (um) até m estágios no gerador de Marx combinado com 1 (um) até n estágios no gerador Blumlein. Estuda-se detalhadamente a propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein que dão origem aos impulsos de tensão na carga. Apresenta-se a modelação de um gerador Blumlein para n estágios para o caso de carga adaptada ou para outros valores de carga em função do valor da carga adaptada. Analisa-se o balanço energético do GHAT e a eficiência do processo.

Capítulo 4: Caracterização do protótipo laboratorial do GHAT. Dimensionamento dos principais componentes integrantes do circuito, dá-se especial enfoque à caracterização dos interruptores usados, do tipo MOSFET, e à tensão à saída do gerador de Marx. Cálculo da energia armazenada no gerador de Marx e energia armazenada no gerador Blumlein para os valores dimensionados. Caracteriza-se detalhadamente o circuito de disparo e comando dos MOSFET com o esquema dos respetivos circuitos e formas de onda principais. Cálculo da impedância de modo secundário do gerador Blumlein e da impedância da carga para os 3 estágios. Circuito de simulação do GHAT com componentes equivalentes ou com características equivalentes à do circuito real. Comparação dos resultados de simulação com as formas de onda armazenadas com o protótipo laboratorial. Cálculo do balanço energético do GHAT e sua eficiência. Comparação com os resultados apresentados por outros autores.

Capítulo 5: Apresentação das conclusões mais significativas do trabalho realizado, e as perspectivas de trabalho futuro.

Bibliografia: Listagem das publicações de outros autores que suportam o trabalho realizado.

Anexos: Justificação do valor de carga adaptada para um gerador Blumlein; e imagens do protótipo construído.

2. Estado da Arte da Geração de Impulsos Bipolares

2.1 Introdução

Neste capítulo introduz-se o conceito de potência pulsada, assim como a motivação para sua utilização e aplicações. Serão apresentados alguns dos dispositivos de comutação, vulgarmente conhecidos por interruptores, mais usados neste tipo de circuitos. É feito um breve resumo das aplicações em que esta técnica pode ser uma ferramenta muito importante. Finalmente, são apresentadas técnicas para geração de impulsos bipolares de alta tensão, baseados em dois métodos principais, a descarga capacitiva direta e o recurso a linhas de transmissão.

2.1.1 Potência Pulsada

A potência pulsada (PP), está associada com a tecnologia para armazenamento de energia (e. g. elétrica) durante um período de tempo relativamente longo e com a sua posterior transferência para uma carga num intervalo de tempo relativamente curto, originando uma potência instantânea elevada [Mankowski et al., 2000; Wang, 2016]. Por exemplo, considerando a energia armazenada de 1J no campo electrostático dum condensador com $2\mu\text{F}$ e 1kV, esta pode ser libertada durante 1s, com uma potência de 1W de pico ou num μs com 1MW de pico, como se mostra na Figura 2.1.

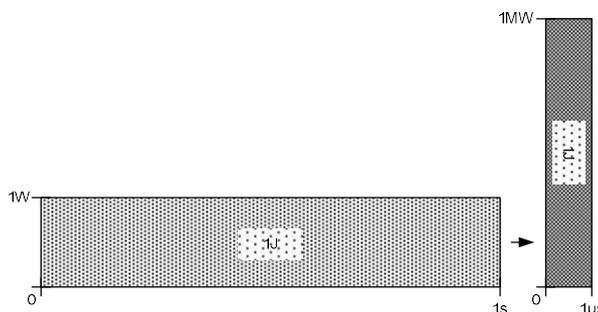


Figura 2.1 – Exemplo de um sistema de PP, [Mankowski et al., 2000].

Normalmente, os sistemas de PP geram impulsos repetitivos, sendo recarregados entre impulsos, e a potência média é reduzida quando comparada com a potência de pico, o que os diferencia em relação a outros sistemas de energia elétrica de tensão contínua ou alternada. Desta forma, durante cada impulso, estes são capazes de produzir efeitos físico-químicos extraordinários, quando aplicados em materiais, que de outra forma era difícil acontecerem.

2.1.2 Evolução histórica

Normalmente associa-se o início da PP ao gerador de Marx, inventado em 1924, pelo alemão Erwin Otto Marx, para simular os efeitos de sobretensões atmosféricas em linhas de energia e nos seus isolantes, o que ainda hoje se faz [Leusenkamp, 2012]. Este sistema é um componente fundamental deste trabalho, sendo um circuito multiplicador de tensão transitória, no qual se geram impulsos de tensão relativamente elevados a partir de uma fonte de tensão contínua com uma amplitude comparativamente reduzida.

A grande evolução da PP veio com a Segunda Guerra Mundial no desenvolvimento dos radares por parte dos ingleses, que utilizavam impulsos curtos de alta tensão. Posteriormente, durante a Guerra-Fria entre os Estados Unidos e a União Soviética, a PP continuou a desenvolver-se devido aos sistemas para a simulação dos efeitos eletromagnéticos produzidos pelas armas nucleares [Levy et al., 1992], aplicações para fontes de micro-ondas de elevada potência, fontes de lasers de elevada potência, armas eletromagnéticas, etc. Nessa altura, surgiram grandes laboratórios de física naqueles países, nos quais existiam grandes máquinas que produziam raios x para várias aplicações. Os sistemas de PP para estas aplicações são tipicamente volumosos, operando com um único impulso ou com baixa taxa de repetição, $>1s$ [Liu, 2008]. O desempenho dos sistemas de PP, em termos de forma de onda da tensão e corrente, era inicialmente para estas aplicações a característica mais importante, enquanto que o custo, a eficiência elétrica, a dimensão e o tempo de vida útil tinham uma importância secundária [Kristiansen, 1993].

Posteriormente, com o fim da Guerra-Fria, houve que dar uso ao equipamento, tecnologia e recursos humanos formados nesta área, e começou, então, o grande crescimento das aplicações industriais, que se prolonga até hoje, na qual são usados impulsos repetitivos ao invés de um único impulso, devido ao processamento em contínuo, como se verifica no caso do ambiente, saúde, biologia, medicina, alimentação, e onde o custo, a eficiência elétrica, a dimensão e o custo têm uma importância crucial.

Durante as últimas duas décadas, a aplicação de campos pulsados estendeu-se a muitas aplicações, das quais se destacam as aplicações militares, aplicações de alta frequência para produção de micro-ondas [Cook et al., 2005; Kristiansen, 1993; Levy et al., 1992]; as aplicações biológicas no tratamento e controlo de poluentes, e a esterilização de águas e alimentos [Barsotti et al., 1999; Behrend et al., 2003; Gaudreau et al., 2001; Kolikov et al., 2005; Raso et al., 2006; Shin et al., 2006; Takaki et al., 2009; Wang, 2016]; aplicações biomédicas no tratamento de cancro de pele [Altunc, 2009; Gundersen et al., 2002; Hair et al., 2003; Mir et al., 1995; Narsetti et al., 2005; Schoenbach et al., 2001; Schoenbach et al., 2004; Schoenbach et al., 2002; Vernier et al., 2003; Wijetunga et al., 2003]. Do estudo efetuado, salienta-se que a tecnologia da PP apresenta um enorme potencial em áreas tais como a descontaminação de gases e águas, extração de nutrientes e sumos de células vegetais, esterilização de alimentos e aplicações médicas.

2.1.3 Dispositivos de comutação

Para que esta tecnologia seja aplicada na indústria, é necessário ter em conta vários aspetos dos sistemas que geram impulsos relacionados com: a eficiência elétrica, a fiabilidade, a portabilidade, a flexibilidade e o custo.

Na Figura 2.2 apresenta-se o diagrama de blocos de um sistema para geração de impulsos associado com a potência pulsada, em que os dispositivos de comutação definem o desempenho do modulador para aplicações industriais.

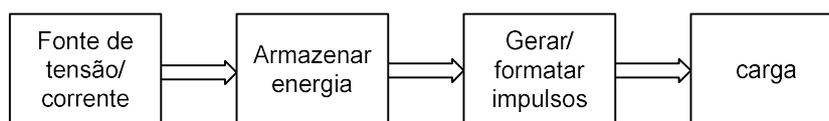


Figura 2.2 – Diagrama de blocos associado com a geração de impulsos de um sistema de PP.

A evolução nas duas últimas décadas dos semicondutores de potência, primeiro alavancada pela tração elétrica e mais tarde pelo desenvolvimento das energias alternativas, levou ao desenvolvimento de dispositivos com características mais próximas dos interruptores ideais [Biela et al., 2008]. Estes semicondutores usados em circuitos clássicos de PP, como o gerador de Marx, permitem a criação de impulsos monopolares ou bipolares de alta tensão de dezenas ou centenas de kV.

Até à década de 1990, os dispositivos de comutação mais utilizados em potência pulsada eram as válvulas eletrónicas, com base em dispositivos de gás, tais como, descarregadores “*spark gaps*” ou retificadores controlados a gás, como tríodos, tétodos ou pêntodos “*thyratrons*”, bem como os “*thyratrons*” de cátodo frio “*pseudospark*”. Os *spark gaps* são ainda muito utilizados em sistemas para comutar tensões até 1MV, correntes na ordem dos 50 a 75kA e com tempo de subida ≤ 5 ns. No entanto, são usados em aplicações com taxas de repetição na ordem das poucas dezenas de Hz, pois os arcos elétricos que se estabelecem causam a sua degradação e alteram as características dos eléctrodos. Os *thyratrons* são interruptores com cátodo de mercúrio que conduzem com plasma de vapor de mercúrio e são adequados para impulsos de tensão até 100kV e impulsos de corrente na ordem dos poucos kA, muito menos que os *spark gaps*, mas têm a vantagem de apresentar uma taxa de repetição superior e uma vida útil mais longa. Os *pseudosparks* conseguem suportar impulsos de tensão até 50kV, no caso de um único interruptor, e 100kV, no caso de 2 ou 3 interruptores e picos de corrente na ordem dos 5 a 10kA, embora existam versões específicas que suportam até 200kA. O tempo de subida é cerca de 25ns, duas vezes mais rápidos que os *thyratrons* mais rápidos [Martin, 1992; Schamiloglu et al., 2004].

Geradores de impulsos modernos baseados na tecnologia das válvulas eletrónicas são capazes de comutar megawatts de potência [Redondo, 2003], sendo usados principalmente em aplicações militares e em laboratórios de física. No entanto existem vários aspetos de engenharia que as tornam pouco atrativas [Redondo, 2003] para utilização em sistemas industriais, tais como:

- i) são volumosas;
- ii) são de difícil manuseamento;
- iii) são pesadas;
- iv) têm eficiência energética reduzida, contrariando a exigência de rendimento para as aplicações modernas;
- v) são, muitas vezes, pouco fiáveis às tensões de interesse;
- vi) tipicamente, requerem uma estrutura de suporte que inclui sistemas de arrefecimento, blindagem para raios-X e fontes de alimentação auxiliar para os filamentos e para polarizar as grelhas de controlo;
- vii) dissipam uma potência significativa no aquecimento dos filamentos e quando em condução (possuem elevada queda de tensão de condução).

Atualmente, todas estas características colidem com as exigências associadas com as aplicações industriais como são as taxas de repetição na ordem das centenas e milhares de Hz, sistemas eletricamente eficientes, de baixo custo, sistemas compactos, modulares e portáteis.

Em aplicações industriais, devido às suas características, os semicondutores de potência conseguiram ganhar vantagem devido às suas propriedades, que incluem:

- i) tensão de bloqueio elevadas (da ordem de kV);
- ii) tensão e resistência de condução reduzidas, V e m Ω ;
- iii) tempos de passagem ao corte e à condução curtos (da ordem de centenas ou mesmo dezenas de ns);
- iv) comutação de potências elevadas (kW) com um mínimo de potência de comando (mW) mesmo a frequências elevadas (kHz);
- v) rendimento elevado (>90%).

Porém, apesar dos progressos significativos no desenvolvimento destes dispositivos, atualmente ainda nenhum deles agrega todas estas propriedades, existindo compromissos, por exemplo, entre perdas à condução e tensão de bloqueio. Em termos práticos, isto significa que nem todos os semicondutores podem ser usados em todas as aplicações.

Dois dispositivos semicondutores de potência têm presentemente a preferência dos engenheiros pelas suas características, também para sistemas de PP, tendo os requisitos próximos do interruptor ideal, o IGBT e o MOSFET. A Figura 2.3 representa o MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) e o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) os mais usados em PP para aplicações industriais.

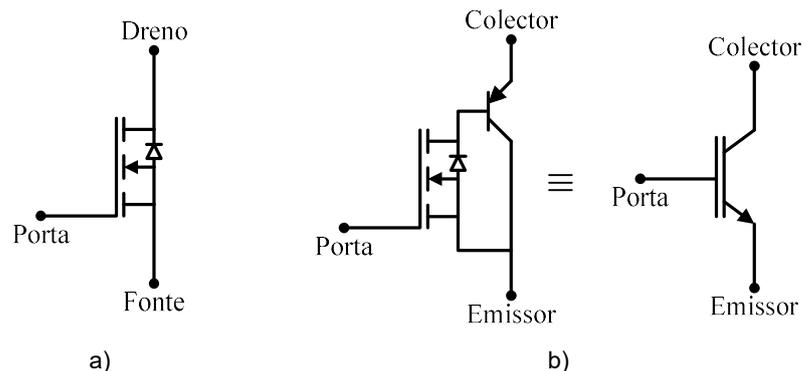


Figura 2.3 – a) Símbolo do MOSFET (tipo N); b) Esquema simplificado e símbolo do IGBT.

Ambos os dispositivos, da Figura 2.3, são capazes de comutar potências elevadas com níveis modestos de potência de comando. Os MOSFETs têm velocidades de comutação maiores, mas os IGBTs comutam maiores potências, conduzem correntes mais elevadas e suportam tensões mais altas [Cook, 2000; Silva, 1998].

No entanto, a máxima tensão suportada pelos semicondutores é ainda um fator limitativo para aplicações de PP. Presentemente, a máxima tensão suportada por dispositivos comerciais é de cerca de 1200V para MOSFETs e 6500V para IGBTs, estes últimos normalmente em módulos volumosos otimizados para aplicações de tração ou energias alternativas, sendo os de 1200V dispositivos discretos a um custo mais reduzido, pois estão massificados para a indústria dos carros elétricos. Assim, para se atingirem as tensões pulsadas requeridas (>10kV) na maior parte das aplicações, utilizam-se topologias com semicondutores ligados em série, que têm que ser comandados sincronamente, e cujas portas (*gates*) estão flutuantes a potenciais elevados [Redondo et al., 2002]. O mesmo acontece quando se pretendem correntes de condução de alguns kA é necessário colocar vários destes dispositivos em paralelo.

Na associação em série e em paralelo de semicondutores é fundamental ter em conta a distribuição uniforme, respetivamente, das tensões e das correntes nos dispositivos para garantir a não destruição dos mesmos.

Além dos anteriores, ainda se usam tirístores (retificador controlado de silício), que suportam elevadas correntes de condução até kA, impulsos de tensão em excesso de alguns kV, sendo o semiconductor mais difundido nas aplicações de eletrónica de potência, contudo é um dispositivo que só é comandado à condução e é lento quando comparado com os outros dois, com tempo de subida na ordem dos μ s; utilizados para aplicações com larguras de impulso superiores ao microssegundo e topologias ressonantes.

Na Tabela 2.1 apresenta-se um resumo com os parâmetros característicos de cada interruptor para as aplicações de PP.

Tabela 2.1 – Resumo dos principais parâmetros dos interruptores usados nas aplicações de potência pulsada [Schamiloglu et al., 2004].

Interruptor	Tensão suportada (kV)	Corrente de pico (kA)	Queda de tensão (V)
<i>Spark gap</i>	100	10 – >1000	20
<i>Thyratron</i>	30	1 – 10	150
<i>Pseudospark</i>	35	5 – 100	200
<i>Thyristor</i>	1 – 5	1 – 50	2
IGBT	20	3.5	3
MOSFET	15	0.3	V_{DS}

Outra característica muito importante dos semicondutores de potência é o seu tempo de comutação. Para que os semicondutores de potência possam satisfazer as necessidades das aplicações industriais é necessário que, para o seu controlo sejam gerados sinais de comando adequados, de forma que possam comutar no menor tempo de comutação possível, por exemplo, para impulsos de largura inferior a 100ns, e amplitudes de 1 a 40kV, é necessário que os dispositivos de comutação, sejam capazes de comutar em cerca de 10% da largura do impulso desejado para que os impulsos a entregar à carga não percam a sua forma quase retangular [Heeren et al., 2006]. Desta forma a energia é fornecida à carga em impulsos com a amplitude e largura desejada.

2.2 Aplicação de campos elétricos pulsados, PEF

A aplicação de campos elétricos a células biológicas, com o objetivo de induzir a permeabilização da membrana celular, aumenta a porosidade da mesma, esta técnica designada por electroporação, não é uma técnica recente [Weaver, 2000]. De facto, na área da medicina, no doseamento de medicamentos e na engenharia genética são aplicados campos elétricos, nomeadamente, para estimular a introdução de DNA para alterar o núcleo das células [Gundersen et al., 2002].

A aplicação de campos elétricos pulsados (*Pulsed Electric Fields*, PEF) tem o objetivo de diminuir a energia depositada no meio, de forma a não provocar um aumento de temperatura, permitindo que se possam atingir amplitudes de campo elevadas, na ordem das dezenas ou centenas de kV/cm.

A electroporação é uma técnica ou processo no qual se aplicam campos elétricos a células biológicas com o objetivo de permeabilizar a membrana das células, por alteração da estrutura da bicamada lipídica da membrana das células, fornecendo um mecanismo para transferir materiais entre o interior e o exterior das células [Gundersen et al., 2002; Kotnik et al., 2012]. Desta forma, pode-se, por exemplo, provocar a morte de células cancerígenas na pele ou inserir novos genes

nas células vivas de modo a corrigir defeitos genéticos [Altunc, 2009]. A eletroporação torna permeável a membrana da célula para uma grande variedade de moléculas hidrófilas que, de outra forma, são incapazes de se difundir. Moléculas tais como corantes, drogas, oligonucleotídeos, proteínas e ácidos podem, com recurso à aplicação de campos elétricos, ser injetadas nas células. O uso de campos elétricos para introduzir DNA é hoje em dia a técnica mais utilizada para modificar geneticamente qualquer tipo de bactéria, planta, fungo ou célula animal [Mir et al., 1995; Luft et al., 2015].

Para estudar os efeitos básicos de um campo elétrico numa célula, Schoenbach et al. (2001), ao descreverem a célula consideraram-na como um meio com uma condutividade elevada (citoplasma) rodeada por uma camada dielétrica (superfície da membrana), em que a membrana celular funciona como uma “porta” seletiva que a célula utiliza para captar do meio exterior os elementos que são necessários para o seu metabolismo e para libertar as substâncias que produz e que devem ser enviadas para o exterior. Na Figura 2.4, apresenta-se o esquema simplificado de uma célula com núcleo (muitas células não têm núcleo), onde se podem identificar as suas partes constituintes.

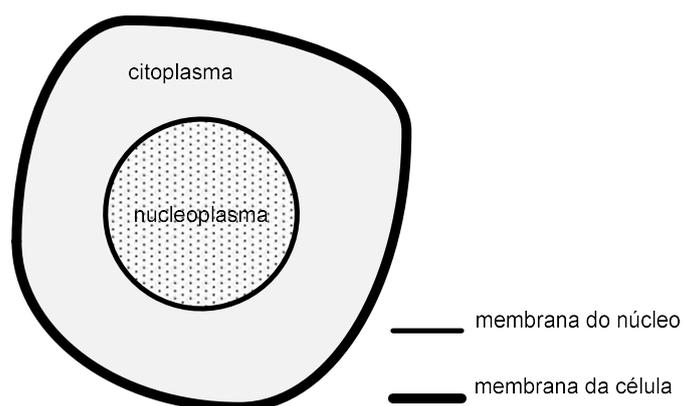


Figura 2.4 – Esquema simplificado de uma célula biológica com núcleo, [Schoenbach et al., 2004].

De acordo com Klonowski et al. (2006) Schoenbach et al. (2006), e como se mostra na Figura 2.5, quando um campo elétrico é aplicado a uma célula, colocada num meio condutor (normalmente, contendo água e sais minerais) entre dois eletrodos, estabelece-se uma corrente entre os eletrodos, causando a acumulação de cargas elétricas na membrana e, conseqüentemente, estabelece-se uma diferença de potencial através da mesma.

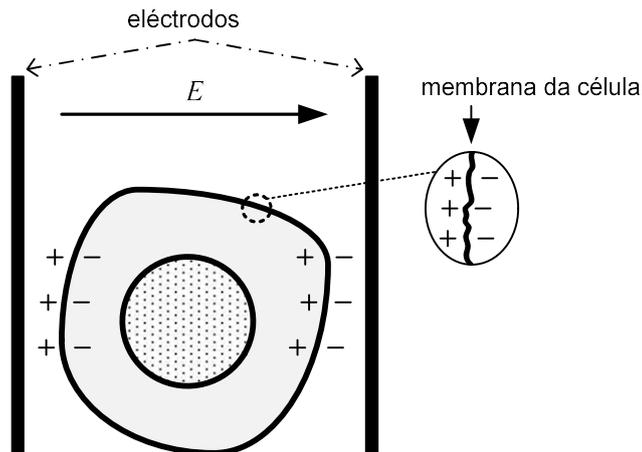


Figura 2.5 – Efeito da aplicação de um campo elétrico sobre uma célula, [Klonowski et al., 2006].

Se o campo elétrico aplicado à membrana celular de espessura entre os 5 e os 10nm, exceder o valor crítico, 1V, podem dar-se mudanças estruturais na superfície da membrana, como a formação de poros que, no limite, se os poros forem permanentes, podem conduzir à morte desta. No entanto, se a diferença de potencial na membrana não for excessiva e a duração do impulso for limitada, a eletroporação da membrana pode ser reversível e a célula pode sobreviver, isto é, se a permeabilização for temporária [Grenier, 2006; Schoenbach et al., 2002], como se mostra na Figura 2.6.

Embora os campos elétricos possam atingir as dezenas de kV/cm, o objetivo destes sistemas pulsados é o de entregar a energia em impulsos na ordem das dezenas de nanossegundos, com potências de pico elevadas de forma a obter os resultados pretendidos. No entanto, sendo a potência média entregue às células cerca de mil vezes menor que num sistema de electroporação com impulsos de tensão com largura superior ao microssegundo, protege-se, desta forma, o citoplasma de distúrbios fisiológicos causados pela subida excessiva da temperatura do meio. Ao invés, com impulsos mais longos pode provocar-se alterações irreversíveis no equilíbrio das células [Vernier et al., 2003], conduzindo à sua destruição.

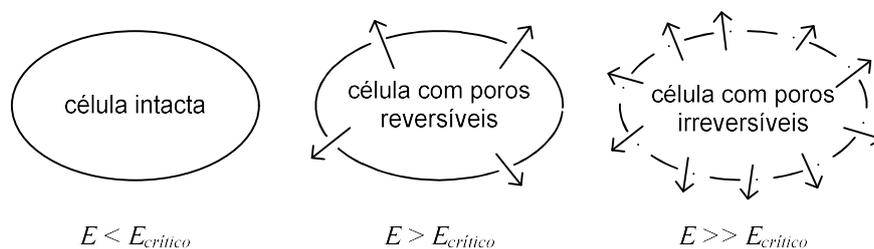


Figura 2.6 – Efeito da aplicação de um campo elétrico à membrana de uma célula [Klonowski et al., 2006].

Da análise da Figura 2.6, pode-se concluir que, se o valor do campo elétrico E , for inferior ao valor do campo elétrico crítico $E_{crítico}$, o efeito da sua aplicação é desprezável; por outro lado, se $E > E_{crítico}$, a membrana celular é permeabilizada facilitando inserção de novos componentes, mas o processo é reversível com o fim da aplicação do campo, mas se o $E \gg E_{crítico}$, a membrana celular é

permeabilizada ao ponto de os poros não se fecharem, originando a morte celular, pois o processo é irreversível. Na prática, este processo é mais complexo, pois para a permeabilização reversível ou irreversível contribuem também a largura do impulso aplicado e o número de impulsos aplicados [Schoenbach et al., 2004].

2.2.1 Exemplo de aplicações

No processamento alimentar [Barba et al., 2015], a aplicação de campos elétricos pulsados tem dois objetivos, campos elétricos até 5kV/cm aumentam a eficiência nos processos de extração do conteúdo intracelular ou transferência de massa, nomeadamente na indústria de sumos, vinho e azeite. Campos na ordem de 30kV/cm produzem a inativação enzimática e a pasteurização a temperaturas mais baixas, eliminando bactérias dos alimentos para conservação [Klonowski et al., 2006]. Este método tem sido aplicado para auxiliar na produção de sumos, no tratamento de microalgas, algas e outras espécies aquáticas; na extração de óleo de plantas, na secagem de produtos, na produção de açúcar e nos tratamentos em carne e peixe [Klonowski et al., 2006]. A principal vantagem deste método é a eficácia a baixas temperaturas, desta forma, os alimentos mantêm o seu sabor, a sua cor e as suas propriedades nutritivas semelhantes ao produto fresco durante mais tempo. A amplitude do campo elétrico aplicado pode variar consoante a aplicação e finalidade. Alguns autores apontam para campos elétricos entre 20 a 80kV/cm, com largura de impulso ou trem de impulsos a variar de 2 a algumas dezenas de microssegundos [Fryer et al., 2008; Ramaswamy et al.].

A aplicação de campos elétricos pulsados surge como uma ferramenta muito importante também no combate à poluição, no tratamento de águas. A aplicação direta de impulsos curtos (submicrossegundos) de alta tensão causa a morte de bactérias não apenas durante o tratamento mas também durante um longo período de tempo, evitando uma segunda contaminação [Kolikov et al., 2005; Li et al., 2015]. Do uso de campos elétricos pulsados combinado com a filtragem por carbono, resulta água altamente purificada e em quantidades industriais [Johnstone, 2001].

2.2.2 Aplicações Biomédicas, Aplicação em Estudo

Como referido anteriormente, a aplicação de impulsos de alta tensão com largura inferior ao microssegundo a células biológicas é uma ferramenta que está a ser usada em aplicações médicas, de que é exemplo o tratamento de cancro de pele, facilitando a inserção de químicos ou genes nas terapias. A aplicação destes impulsos de largura reduzida nos limites da área a tratar não causa tantos danos nos tecidos em torno da área afetada como os tratamentos convencionais [Altunc, 2009; Yarmush et al., 2014].

Consoante a largura do impulso, pode controlar-se a região da célula que se quer permeabilizar. Este facto tem a ver com o tempo de carga da membrana celular, que depende da dimensão da

célula. Com efeito, impulsos de ns permitem deixar a membrana celular exterior intacta e permeabilizar as membranas interiores da célula, que têm um tempo de carga menor. Por outro lado, impulsos de μ s são mais eficazes na membrana celular exterior. Num e noutro caso, devido à curta duração dos impulsos, não se verificam efeitos térmicos significativos. Com impulsos de curta duração em comparação com o tempo de carga da membrana da célula, o campo elétrico penetra através da célula, carrega as suas estruturas internas e cria efeitos intracelulares distintos, como se mostra na Figura 2.7 [Stacey et al., 2011].

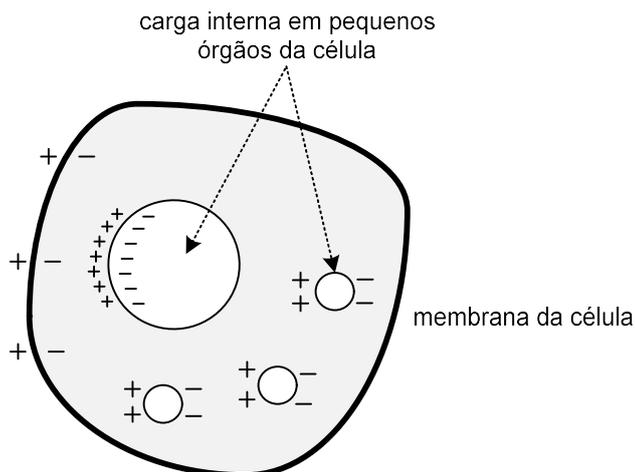


Figura 2.7 – Esquemático da acumulação de carga após um campo elétrico muito curto aplicado a uma célula, [Stacey et al., 2011].

2.2.3 Modelo Elétrico da Célula

De forma a melhor se entender os efeitos da aplicação de campos elétricos pulsados a células biológicas, estas são muitas vezes descritas por um modelo elétrico equivalente. Neste sentido, Schoenbach et al. (2004) desenvolveu um modelo elétrico equivalente simplificado de uma célula, onde se podem observar as equivalências adotadas entre o modelo elétrico equivalente e a célula biológica, Figura 2.8, em que as membranas são caracterizadas por terem baixa condutividade. Segundo o autor, pode-se imaginar a célula como um condutor envolvido por um isolamento contendo subestruturas com propriedades semelhantes. Neste modelo para além de se assumir que a condutância das membranas é reduzida, considera-se desprezável a capacidade dos componentes do citoplasma e do nucleoplasma.

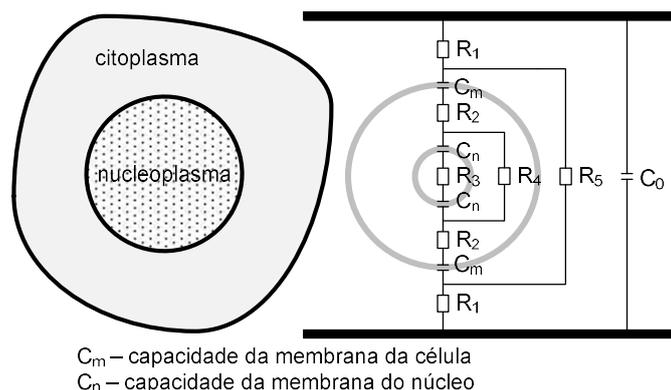


Figura 2.8 – Estrutura de uma célula biológica e o seu modelo elétrico equivalente simplificado [Schoenbach et al., 2004].

Do mesmo modo, na Tabela 2.2, o autor também estabeleceu os parâmetros equivalentes de condutividade e permitividade elétrica que se adequam a cada um dos elementos que constituem a célula de uma mitocôndria.

Tabela 2.2 – Parâmetros de uma mitocôndria [Schoenbach et al., 2004].

	Geometria dos parâmetros	Condutividade [S/m]	Permitividade relativa
Membrana da célula	Espessura 5 nm	0.0	8.0
Citoplasma	Espessura 4.54 μm	0.95	87.7
Membrana externa	Espessura 7 nm	0.95×10^{-6}	12.1
Compartimento exterior	Diâmetro 0.92 μm	0.4	54.0
Membrana interna	Espessura 7 nm	0.95×10^{-6}	3.4
Compartimento interior	Diâmetro 0.832 μm	0.121	54

Da análise dos parâmetros da Tabela 2.2, conclui-se que as membranas funcionam como dielétricos o que facilita a aplicação do campo elétrico nestas regiões.

Uma carga biomédica é constituída por um conjunto de células biológicas num meio salino (i.e. água com sais), com condutividade elevada, $> 1\text{mS/cm}$, o que a torna numa carga do tipo resistivo.

Para o cálculo da amplitude do campo elétrico crítico $E_{\text{crítico}}$, de cada impulso, necessário para carregar a membrana da célula com um potencial crítico $V_{\text{crítico}}$, tem-se em [Schoenbach et al., 2002] que:

$$E_{\text{crítico}} = \frac{V_{\text{crítico}}}{\left\{ fa \left[1 - \exp\left(\frac{-t_x}{t_c}\right) \right] \right\}} \quad (2.1)$$

Onde t_x define a largura do impulso aplicado, t_c define o tempo de carga, f é um fator determinado pelas características da célula e a o diâmetro da célula. O tempo de carga da membrana da célula, considerando desprezável a condutância da membrana, é dado por:

$$t_c = \left[\left\{ \frac{1 + 2V_V}{1 - V_V} \right\} \frac{\rho_1}{2} + \rho_2 \right] C_{mc} a \quad (2.2)$$

Onde V_V é o volume de concentração da célula, ρ_1 a resistividade do meio extracelular, ρ_2 a resistividade do citoplasma e C_{mc} a capacidade específica da membrana por unidade de área.

A energia necessária para provocar a disrupção da membrana é dada por:

$$W = \frac{E_{critico}^2 t_x}{\rho_1} \quad (2.3)$$

Assim, para se poder observar algum efeito nas células $t_x \geq 1,25t_c$ [Schoenbach et al., 2002].

Weaver et al. (1996) apresentam uma revisão sobre a teoria da electroporação, na qual o comportamento da membrana das células, quando expostas a campos elétricos elevados, é caracterizado. Na Figura 2.9 apresenta-se o quadro criado por Schoenbach et al.(2002), para aplicações biológicas, em que o autor define os valores de campo elétrico e largura do impulso adequados para cada aplicação em função do campo elétrico crítico e da temperatura.

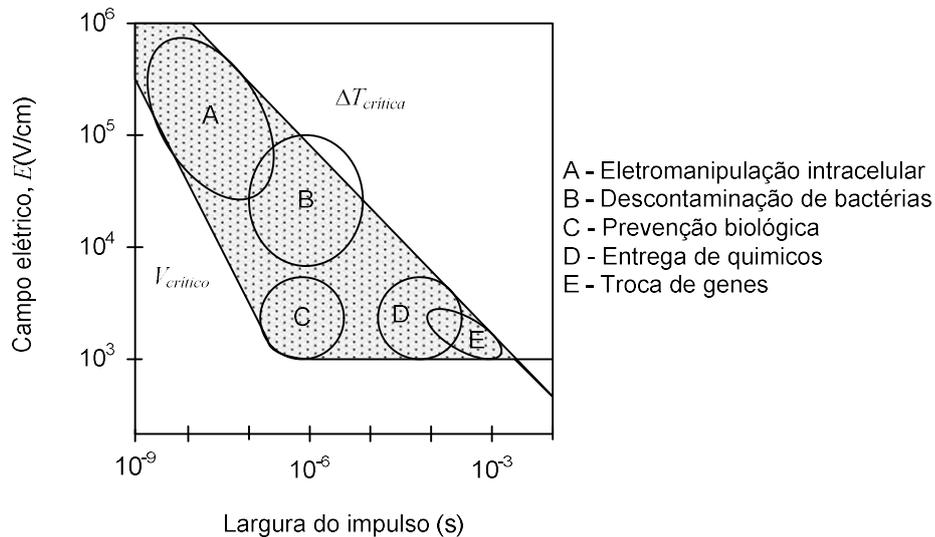


Figura 2.9 – Necessidades de Campos elétricos/largura do impulso para aplicações em potência pulsada, [Schoenbach et al., 2002].

Na Figura 2.9, os limites inferiores são determinados pelas necessidades de carga a uma tensão crítica, do interior das membranas. Os limites superiores são determinados pela temperatura máxima permitida pela membrana sem que esta seja irreversivelmente destruída.

Os fatores que influenciam efetivamente um sistema de PP são: amplitude do campo elétrico, a largura do impulso, o número de impulsos, a forma do impulso, a temperatura do meio, a condutividade do meio, o tipo de microrganismo e o estágio de crescimento da célula [Brito et al., 2012; Johnstone, 2001].

Na Figura 2.10 mostra-se um período de uma forma de onda de tensão com dois impulsos, na Figura 2.10a) impulsos bipolares, na Figura 2.10b) impulsos monopulares. Ao invés da aplicação de campos no mesmo sentido, com base em impulsos monopulares, a aplicação de impulsos bipolares protege as membranas das células minimizando a concentração de moléculas junto dos elétrodos mantendo o campo elétrico uniforme [Kuthi et al., 2005; Zhang et al., 1995], tornando os impulsos bipolares mais eficientes em comparação com os impulsos monopulares para a mesma solução. Kotnik et al. (2001b) defendem que, com a aplicação de impulsos bipolares simétricos para a permeabilização de 50% das células, é suficiente aplicar impulsos com amplitude 20% mais baixa que no caso de aplicação de impulsos monopulares e provam que a concentração de íões junto dos elétrodos é maior quando se aplicam impulsos bipolares com a mesma amplitude e duração, reduzindo bastante a contaminação das células por efeitos eletrolíticos. Kotnik et al. (2001a) depois de realizarem alguns testes concluíram que a erosão eletrolítica, decresce quando se aplicam impulsos bipolares em vez de impulsos monopulares.

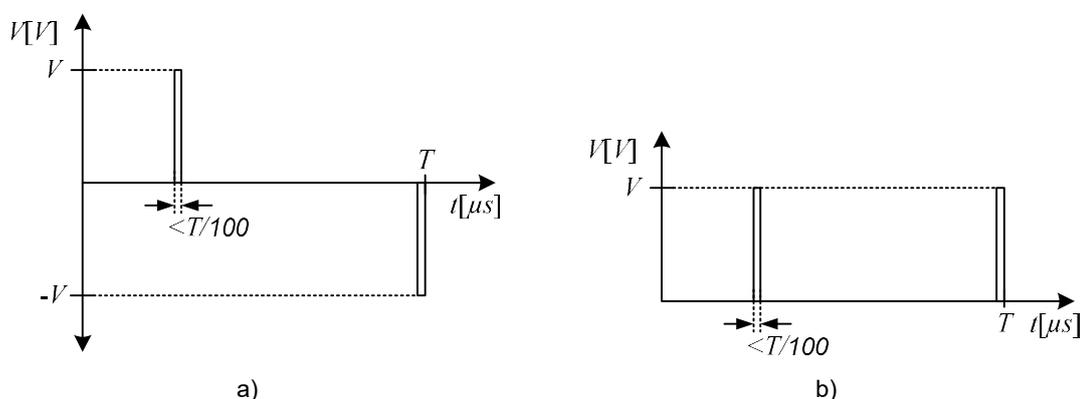


Figura 2.10 – Exemplos de tipo de impulsos, a) bipolares e b) monopulares.

Tendo em conta os dois tipos de impulsos monopulares e bipolares, Schoenbach et al. (2004) concluíram que os impulsos de tensão monopolar são usados para aplicações em que o campo elétrico é aplicado através de elétrodos, enquanto os impulsos de tensão bipolares são preferidos para a aplicação de campos elétricos elevados através de antenas de banda larga.

Em resumo, a aplicação de impulsos bipolares: I) aumenta a eficiência na electroporação; e II) aplicam uma carga media nula, não provocando trocas iónicas, e assim o desgaste dos electrodos e, por conseguinte, o envio de material dos electrodos para o meio tratado.

Considerando o campo de aplicação e as razões pela opção entre impulsos monopulares/bipolares foi decidido construir um modulador híbrido de alta tensão bipolar com as seguintes características: amplitude de tensão até 10kV, largura de impulso 50ns e frequência até 1kHz.

2.3 Geração de Impulsos Bipolares com Largura Inferior ao Microsegundo

Nesta secção são apresentadas as técnicas mais comuns para geração de impulsos bipolares com amplitudes de kV e larguras de impulso inferior ao microsegundo. Para a geração de impulsos de alta tensão com largura inferior ao microsegundo existem vários métodos disponíveis, entre os quais o uso de:

- 1) interruptores magnéticos, e compressão magnética, os quais utilizam a saturação magnética dos núcleos para comutar rapidamente as correntes;
- 2) díodos de recuperação inversa abrupta, com circuitos ressonantes e interruptores magnéticos, os quais utilizam a característica de recuperação inversa dos díodos de potência, em dispositivos especialmente construídos e com propriedades melhoradas para produzir picos de tensão na ordem dos kV durante o corte de correntes em circuitos indutivos;
- 3) linhas de transmissão, concentradas ou distribuídas; os geradores construídos com base em linhas de transmissão podem ser divididos em duas categorias: linhas de transmissão simples ou através do uso de linhas Blumlein. No primeiro caso, a amplitude da tensão à saída é igual a metade da amplitude da tensão de alimentação, enquanto no segundo os impulsos de saída têm a mesma amplitude da tensão de alimentação, embora seja necessário um comprimento de linha duas vezes maior que no primeiro caso [Heeren et al., 2006].
- 4) descargas capacitivas diretas, utilizando semicondutores em série ou montagens do tipo somadores indutivos ou geradores de Marx, em que um conjunto de condensadores é carregado independentemente ou em paralelo, respetivamente, a partir de uma fonte de tensão com uma amplitude relativamente reduzida, e depois é ligado em série com uma carga, fazendo uso de interruptores rápidos.

2.3.1 Circuitos baseados na descarga direta de condensadores sobre a carga

No circuito da Figura 2.11, apresenta-se o conceito associado com a técnica mais usada para gerar impulsos monopulares de alta tensão, a descarga capacitiva direta na carga [Gaudreau et al., 1998].

Neste caso, o condensador C_1 , é carregado pela fonte de tensão V_1 através da resistência R_1 , que limita a corrente de carga de C_1 . A aplicação da tensão na carga, que em aplicações biológicas apresenta um carácter resistivo, Z_L , é controlada pelo conjunto de interruptores S_1 . O controlo e as características de comutação de S_1 definem a largura, a taxa de repetição e a forma do impulso de tensão a aplicar à carga.

Este circuito permite a associação em série dos dispositivos interruptores sempre que se necessita comutar uma tensão superior à tensão nominal que os interruptores suportam para tal, devendo-se garantir que o valor da tensão a que estão sujeitos é igualmente distribuída entre eles. Geralmente esta condição é garantida pela inclusão no circuito de resistências de elevada impedância e circuitos *snubber* em paralelo com cada semiconductor [Gaudreau et al., 2001; Williams, 2005]. Caso a aplicação necessite de uma corrente elevada, superior à corrente máxima de cada interruptor, é necessário associar vários dispositivos em paralelo, garantindo uniformidade na condução da corrente. Em ambos os casos, o seu funcionamento deve ser sincronizado. No primeiro caso, para poder entregar à carga impulsos de tensão quase retangulares, no segundo caso para evitar sobrecorrentes que os possam danificar.

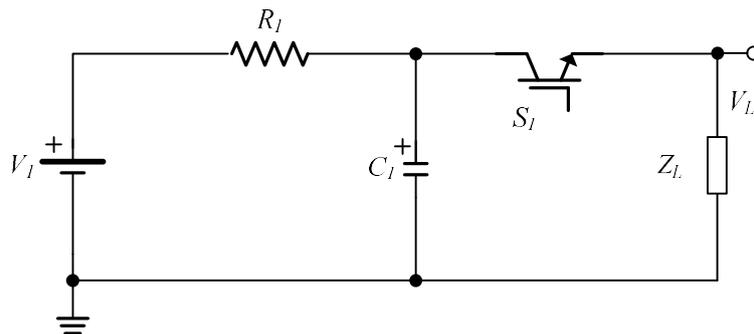


Figura 2.11 – Circuito RC simplificado.

Na Figura 2.12 mostra-se o diagrama de tensões do circuito da Figura 2.11, em que R_1 representa a resistência interna da fonte de tensão V_1 , $R_1 \gg Z_L$, devido ao valor elevado de R_1 , a energia consumida pela carga durante o impulso de tensão é apenas proveniente da energia armazenada no condensador C_1 . Na figura observa-se as formas de onda de tensão na fonte de tensão V_1 , no condensador V_{C1} e na carga V_L . A constante de tempo de carga do condensador C_1 , t_1 é dada pela equação 2.4:

$$t_1 = R_1 C_1 \quad (2.4)$$

A energia armazenada no condensador C_1 , quando está carregado é dada pela equação 2.5:

$$E_{C1i} = \frac{1}{2} C_1 V_{C1\max}^2 \quad (2.5)$$

Com $V_1 = V_{C1\max}$.

A tensão no condensador C_1 em regime permanente, é dada pela equação 2.6:

$$V_{C1}(t) = \begin{cases} 0 & , t = 0 \\ V_1 \left(1 - e^{-\frac{1}{R_1 C_1} t} \right) & , 0 < t < T - t_{on} \\ V_1 e^{-\frac{1}{Z_L C_1} t} & , T - t_{on} < t < T \end{cases} \quad (2.6)$$

Após o qualquer impulso de tensão V_L , $V_1 = V_{C1min}$, conforme a Figura 2.12.

Na equação (2.6), T é o período de repetição da forma de onda V_{C1} .

A energia do impulso E_p , entregue à carga com carácter resistivo Z_L , considerando t_{on} , o tempo em que o interruptor S_1 , permanece fechado e $t_{on} \ll t_1$, é dada pela equação 2.7, [Canacsinh, 2015]:

$$E_p = \int_{T-t_{on}}^T \frac{\left(V_1 e^{-\frac{t}{Z_L C_1}} \right)^2}{Z_L} dt \quad (2.7)$$

A energia armazenada no condensador C_1 , no instante em que termina o impulso aplicado à carga Z_L , é dada por:

$$E_{C1f} = \frac{1}{2} C_1 V_{C1min}^2 \quad (2.8)$$

Em que V_{C1min} é a tensão mínima do condensador C_1 no intervalo de tempo considerado.

A equação que traduz a forma de onda da tensão na carga V_L em regime permanente é dada pela equação 2.9:

$$V_L(t) = \begin{cases} 0 & , 0 < t < T - t_{on} \\ V_{C1max} e^{-\frac{1}{Z_L C_1} t} & , T - t_{on} < t < T \end{cases} \quad (2.9)$$

Em que $Z_L C_1$ é a constante de tempo de descarga do condensador C_1 e V_{C1max} é a tensão máxima do condensador C_1 no intervalo de tempo considerado.

Na Figura 2.12 apresenta-se o diagrama simplificado teórico de tensões do circuito RC simplificado com funcionamento em regime permanente e os semicondutores em regime de comutação, caracterizado pelas equações 2.6 e 2.9.

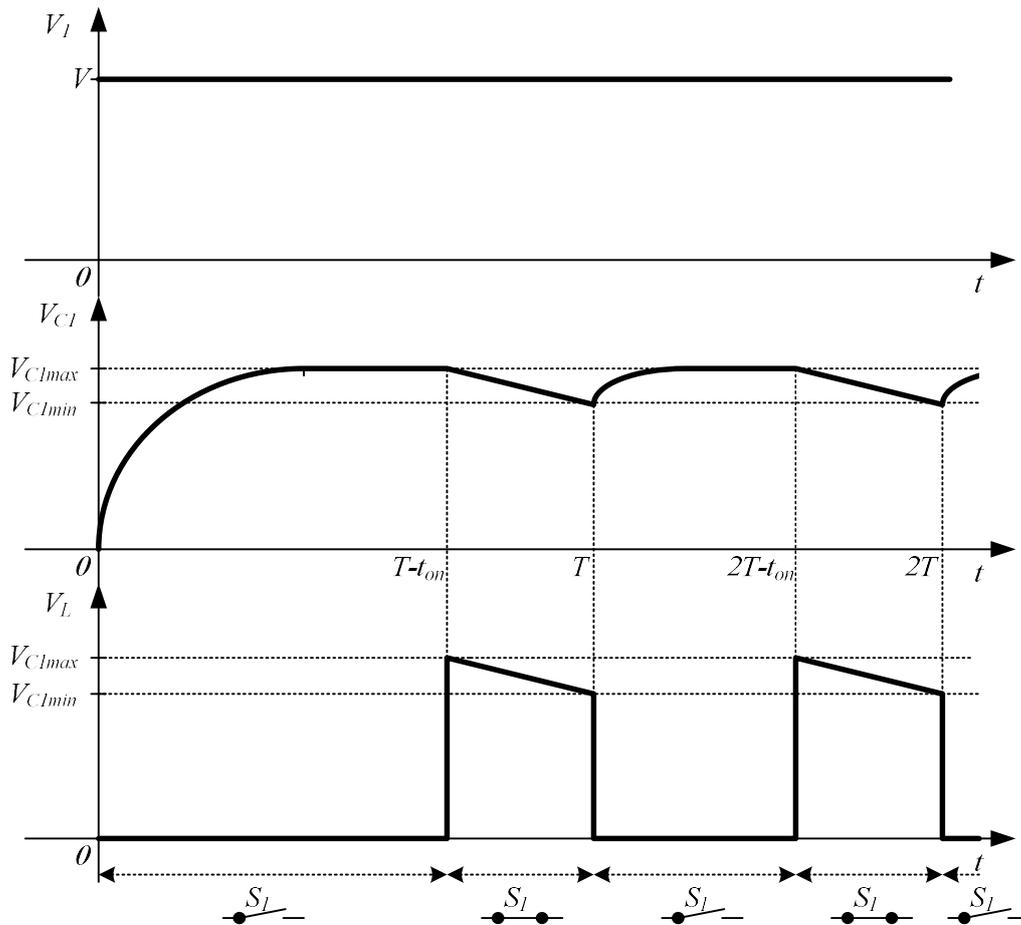


Figura 2.12 – Diagrama de tensões do circuito RC da Figura 2.11.

Da análise da Figura 2.12, conclui-se que o interruptor S_1 tem de suportar e ser capaz de comutar a amplitude da tensão V disponível pela fonte de alimentação V_1 . No desenho das formas de onda de tensão foram desprezadas as perdas por efeito de joule nos elementos passivos e a perdas de comutação nos interruptores.

A queda de tensão que se verifica no condensador C_1 , Δv_{C1} , é calculada por:

$$\Delta v_{C1} = V_{C1max} - V_{C1min} \quad (2.10)$$

Em que V_{C1max} , é tensão no condensador $V_{C1}(t)$ em $t=T-t_{on}$; e V_{C1min} , é tensão no condensador $V_{C1}(t)$ em $t=T$, equação (2.6). Para se dimensionar Δv_{C1} em função da capacidade do condensador C_1 , considerando $V_{C1max}=V_1$, da seguinte igualdade, recorrendo às equações (2.5), (2.7) e (2.8), tem-se que [Redondo et al., 2011]:

$$\begin{aligned}
E_{C1i} - E_p &= E_{C1f} \\
\Leftrightarrow \frac{1}{2} C_1 V_1^2 - \frac{V_1^2}{Z_L} t_{on} &= \frac{1}{2} C_1 (\Delta v_{C1} V_1)^2 \\
\Leftrightarrow C_1 &\geq \frac{2 t_{on}}{Z_L (1 - \Delta v_{C1}^2)}
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

Na Tabela 2.3 apresentam-se alguns valores de capacidade para que a queda de tensão $\Delta v_{C1}(\%)$ seja inferior a 1%, 5% e 10% por aplicação da equação (2.11), para $t_{on}=100\mu s$ e $Z_L=100\Omega$. Desta forma da energia armazenada inicialmente E_{C1i} no condensador C_1 , para $V_{C1max}=10kV$ e da energia consumida pela carga em cada impulso E_p . No gráfico da Figura 2.13 apresentam-se os resultados e a evolução dos valores de queda de tensão, resumidos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valores de capacidade do condensador C_1 para que $\Delta v_{C1}(\%)$ seja inferior ao valor indicado e os valores de E_{C1i} em C_1 e E_p .

$\Delta v_{C1}(\%)$	$C_1(\mu F)$	$E_{C1i}(J)$	$E_p(J)$
1	100	5000	99
5	20	1000	95
10	10	500	90

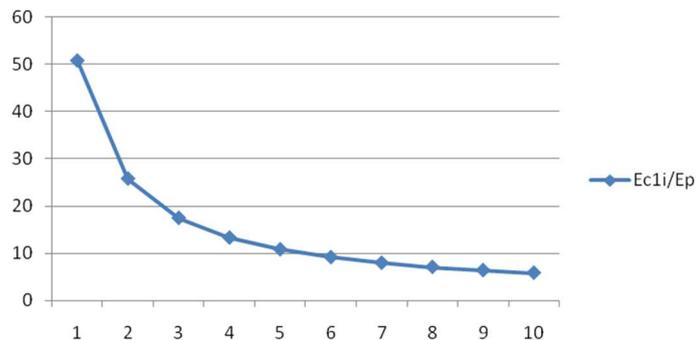


Figura 2.13 – Gráfico da razão da energia E_{C1i}/E_p , versus queda de tensão do condensador em cada impulso em [%].

Da análise da Tabela 2.3 pode-se concluir que para garantir uma queda de tensão do impulso inferior a 5%, a energia acumulada no condensador tem que ser cerca de 10 vezes superior à energia consumida durante o impulso.

Em caso de curto-circuito na carga tem que existir um circuito de proteção que impeça a descarga de toda a energia do condensador, que além de poder danificar a carga pode ainda danificar os interruptores.

E caso exista energia armazenada suficiente no condensador, este circuito permite variar com grande flexibilidade a frequência, a largura e a amplitude dos impulsos aplicados à carga.

2.3.1.1 Utilização de circuitos em ponte e meia ponte

É possível modificar o circuito da Figura 2.11 de forma a gerar também impulsos bipolares de alta tensão, de acordo com o circuito em meia-ponte da Figura 2.14. Este inclui a utilização de duas fontes de alimentação independentes, uma para gerar o impulso positivo e a outra para gerar o impulso negativo. Para além de necessitar de duas fontes de alimentação de alta tensão, cada grupo de interruptores, neste caso dispositivos semicondutores do tipo MOSFET, representado na figura, tem de suportar a soma da tensão disponível em cada fonte de alimentação (V_1+V_2), o que é possível associando vários dispositivos em série. Este circuito apresenta como principal vantagem a facilidade de gerar impulsos de alta tensão bipolares, impulsos de alta tensão monopolares positivos ou negativos, de acordo com as necessidades da aplicação, devido à versatilidade do seu controlo [Keith et al., 2000; Redondo et al., 2011].

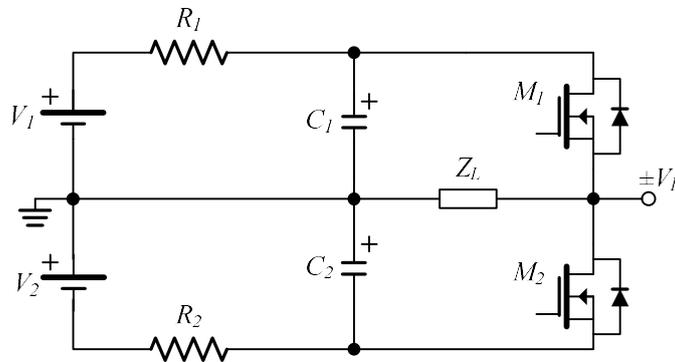


Figura 2.14 – Circuito simplificado de geração de impulsos bipolares com recurso a 2 fontes de alimentação.

Considerando que os condensadores C_1 , C_2 na Figura 2.14 são carregados para uma tensão próxima do valor da fonte de alimentação V_1 , V_2 respetiva, na Figura 2.15, pode-se verificar que o valor da tensão na carga do circuito da Figura 2.14, admitindo os sinais de controlo de tensão a aplicar às *gates* dos MOSFETs M_1 , M_2 apresentados, tem a forma de uma série de impulsos positivos ou negativos.

A equação que traduz a forma de onda da tensão na carga V_L , em regime permanente é a seguinte:

$$V_L(t) = \begin{cases} 0 & , 0 < t < T_1 - t_{on1} \\ V_{C1ma} e^{-\frac{1}{Z_L C_1} t} & , T_1 - t_{on} < t < T_1 \\ 0 & , 0 < t < T_2 - t_{on2} \\ V_{C2max} e^{-\frac{1}{Z_L C_2} t} & , T_2 - t_{on2} < t < T_2 \end{cases} \quad (2.10)$$

Em que t_{on1} e t_{on2} representam o instante em que os MOSFETs M_1 e M_2 entram à condução, respetivamente, T_1 e T_2 é o período da forma de onda de tensão de cada impulso na carga, controlado por cada um dos MOSFETs.

Neste circuito deve-se realçar que a aplicação dos impulsos de tensão de comando das gates dos MOSFETs V_{GM1} e V_{GM2} devem estar desfasados no tempo, porque no caso de se verificar condução simultânea tem-se que a amplitude dos impulsos de tensão na carga: V_L é nula se $V_{C1}=V_{C2}$; e V_L é igual $\pm V_{C1}-V_{C2}$, se $V_{C1}\neq V_{C2}$. No desenho das formas de onda de tensão da Figura 2.15, foram considerados os componentes como ideais.

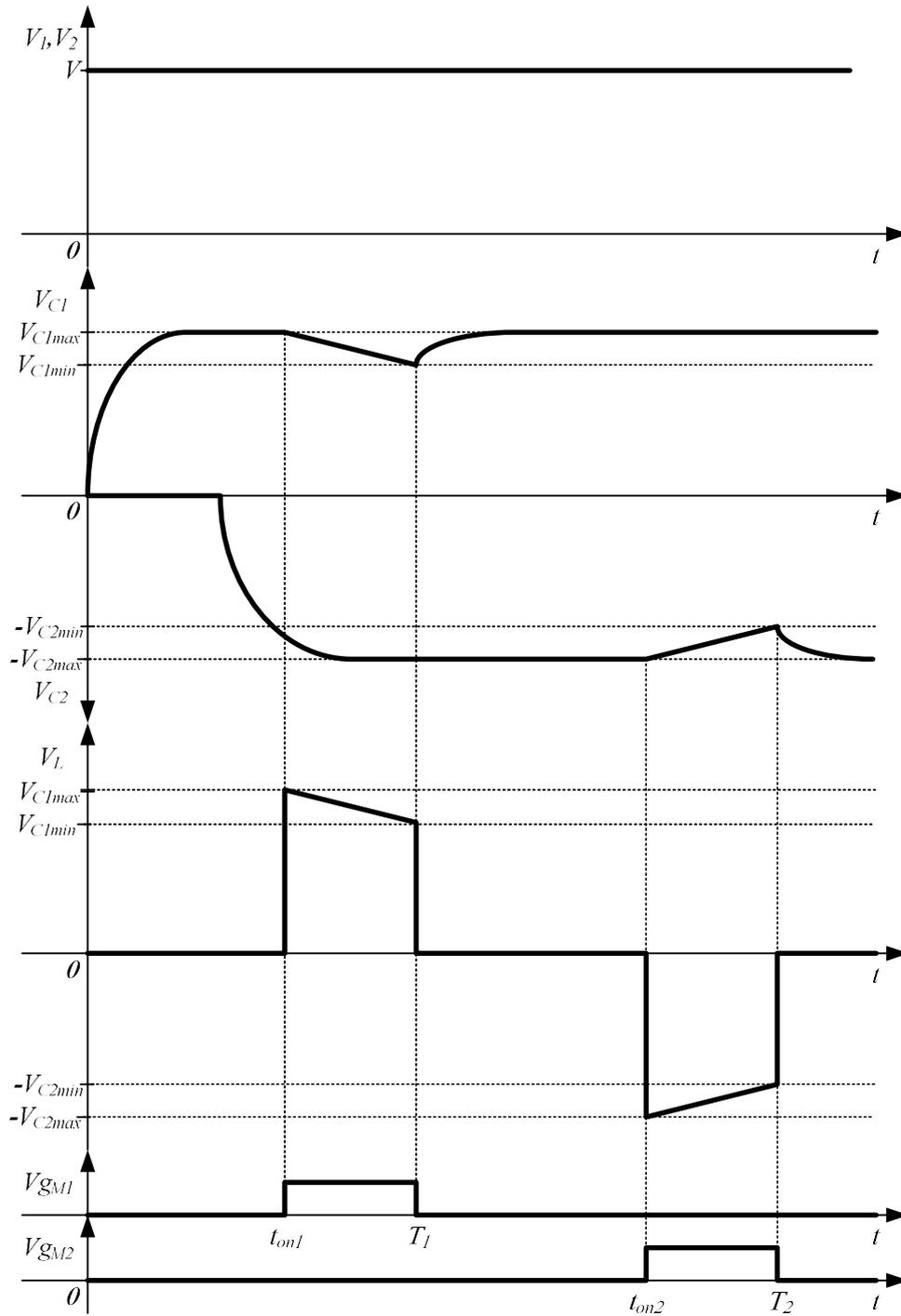


Figura 2.15 – Diagrama geral de tensões do circuito da Figura 2.14.

2.3.1.2 Gerador de Marx

Um dos circuitos mais usados para gerar tensões transitórias é o gerador de Marx, onde um conjunto de condensadores é carregado em paralelo, a partir de uma fonte de tensão contínua com amplitude relativamente reduzida, que depois de carregados são ligados em série com uma carga, de forma a aplicar um impulso correspondente à soma das tensões dos condensadores [Jiang et al., 2009; Liu et al., 2009; Redondo et al., 2005a].

Na Figura 2.16, apresenta-se uma topologia de um circuito Gerador de Marx, para aplicar impulsos de alta tensão positivos numa carga, Z_L , tendo como grande vantagem o facto de que, com o controlo sincronizado dos interruptores, permitir a multiplicação transitória do valor da amplitude da tensão de carga dos condensadores V_c , pelo número de estágios m , do gerador de Marx, com a particularidade de cada interruptor apenas suportar a tensão V , mesmo em caso de avaria durante a operação do circuito [Jiang et al., 2009; Liu et al., 2009; Redondo et al., 2005a].

Neste circuito, durante o modo carga, ou seja, com todos os S_c fechados e todos os S_p em aberto, todos os condensadores estão ligados em paralelo com a fonte de alimentação, ficando carregados ao fim de um determinado tempo, t_1 , com amplitude de tensão praticamente igual à disponibilizada pela fonte de alimentação contínua V_c . De seguida, todos os S_c são abertos e todos os S_p são fechados, colocando todos os condensadores C_i em série com a carga, aplicando na carga a soma da tensão dos condensadores.

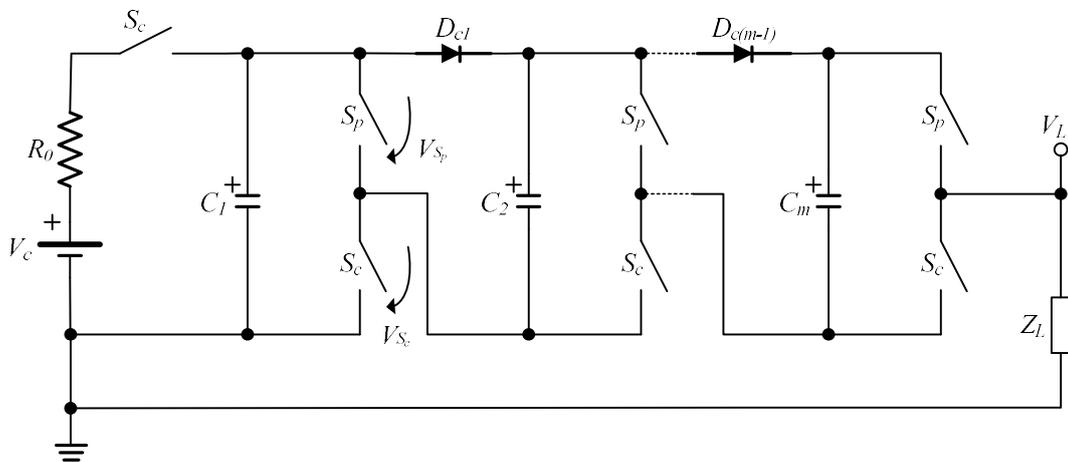


Figura 2.16 – Circuito simplificado gerador de Marx [Jiang et al., 2009; Liu et al., 2009; Redondo et al., 2005a].

O circuito apresentado na Figura 2.16 permite gerar impulsos repetitivos com bastante flexibilidade, como se pode ver na Figura 2.17.

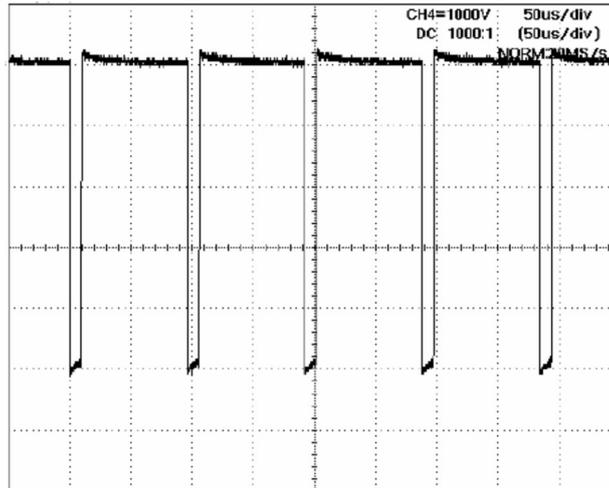


Figura 2.17 – Exemplo de resultados experimentais do circuito da Figura 2.16, eixo vertical 1 kV/div, eixo horizontal 50 μ s/div [Redondo et al., 2005a].

A comutação de cada grupo de interruptores S_p e S_c deve ser alternada e sincronizada de forma a evitar-se a condução simultânea de dispositivos no mesmo braço, que podem curto-circuitar os condensadores e destruir os interruptores, o que se consegue com a introdução de um tempo morto t_m entre a comutação de S_c e S_p .

Em termos de comando dos interruptores S_p , cada dispositivo está referenciado a uma massa diferente e flutuante, o que impõe a existência de massas isoladas independentes para cada um.

Uma das características do gerador de Marx é a modularidade em termos de tensão, o que no entanto, não se mantém para a corrente, uma vez que durante o modo de carga os dispositivos mais próximos da fonte suportam a corrente de carga dos mais afastados, devido à topologia em paralelo.

O impulso de tensão na carga em regime permanente, V_L , é dado por:

$$V_L(t) = \begin{cases} 0 & , 0 < t < T - t_{on} \\ V_{C(m)max} e^{-\frac{1}{Z_L \frac{C_m}{m}} t} & , T - t_{on} < t < T \end{cases} \quad (2.11)$$

Na Figura 2.18, apresenta-se o diagrama simplificado teórico de tensões para o circuito gerador de Marx, onde V_c é tensão na fonte de alimentação para carregar os condensadores, $V_{C(m)}$ a tensão em cada condensador, V_L tensão na carga, V_{S_p} tensão em cada S_p e V_{S_c} tensão em cada S_c . No desenho das formas de onda de tensão foram considerados os componentes como ideais.

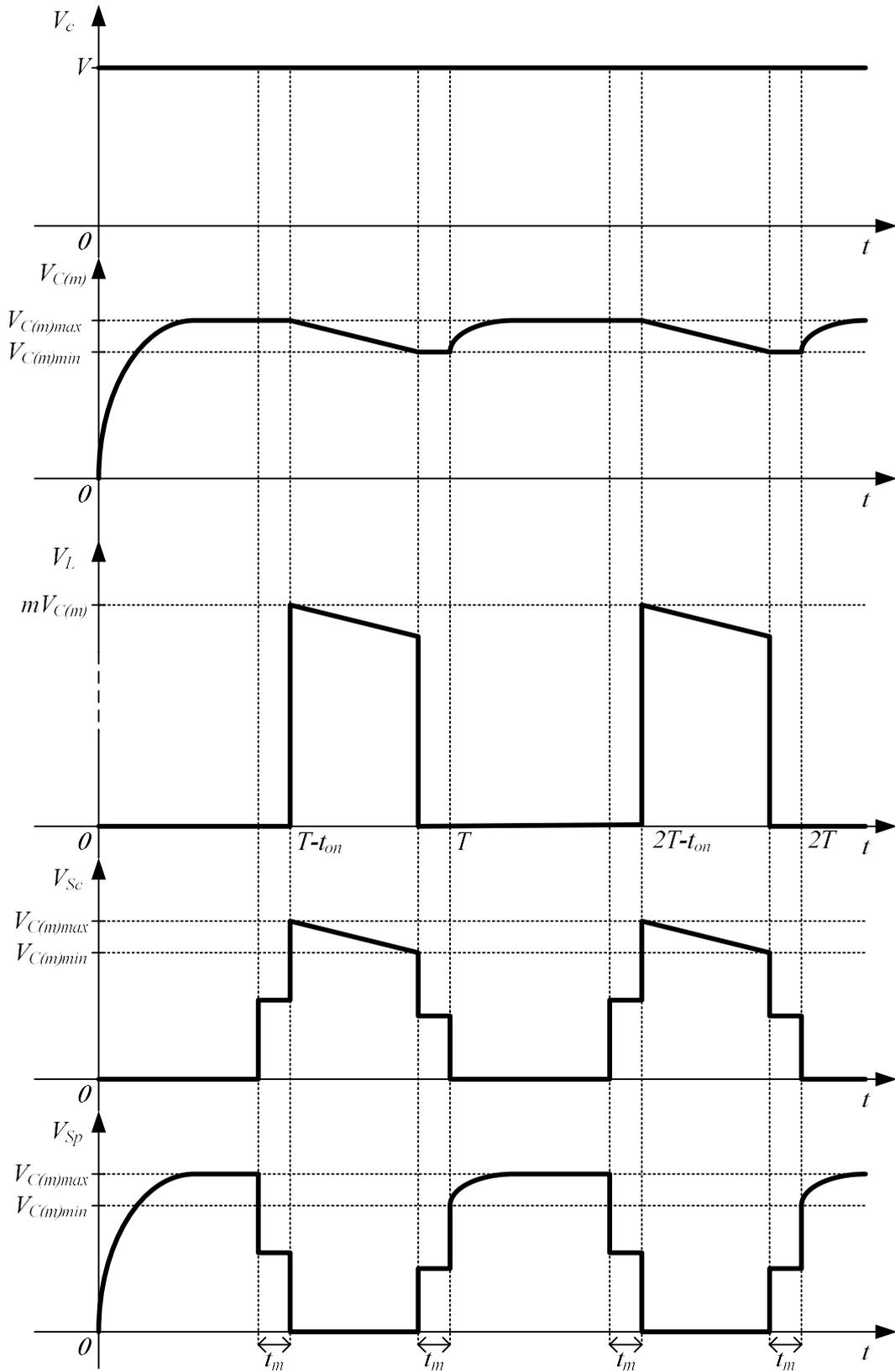


Figura 2.18 – Diagrama de tensões do circuito gerador de Marx.

Esta topologia, baseada em semicondutores de potência comparada com a topologia clássica do gerador de Marx, que utilizava válvulas eletrônicas, apresenta as seguintes vantagens: i) maior

tempo de vida útil, ii) maior taxa de repetição dos impulsos, iii) maior compactação e flexibilidade no controlo dos impulsos produzidos. É uma alternativa à associação série de semicondutores, com a vantagem de usar uma fonte de alimentação com amplitude mais reduzida.

Para gerar impulsos bipolares de alta tensão através da topologia gerador de Marx, Canacsinh et al. (2008), desenvolveram a topologia que se apresenta na Figura 2.19, recorrendo ao uso de semicondutores, permitindo uma enorme versatilidade tanto em termos de impulsos produzidos e aplicações.

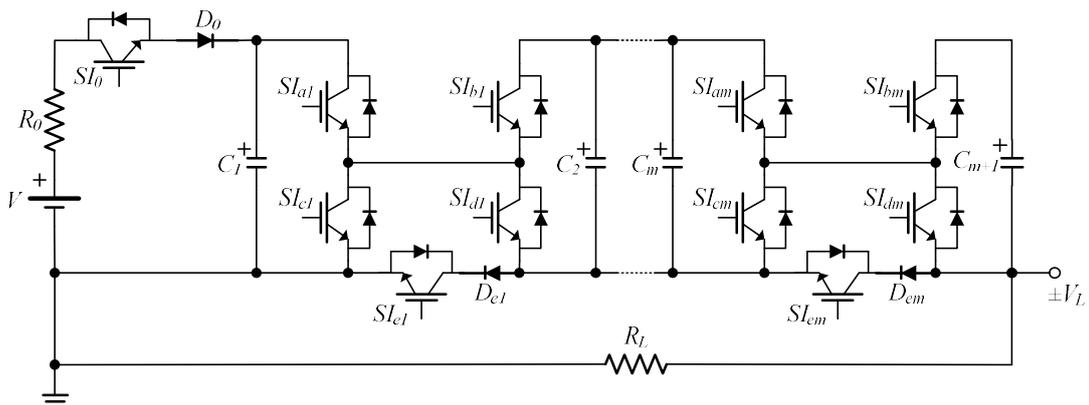


Figura 2.19 – Circuito simplificado da nova topologia de geração de impulsos bipolares de alta tensão [Canacsinh et al., 2008].

Este circuito tem associado três modos de funcionamento: carga dos condensadores, geração de impulsos de tensão positivos e geração de impulsos de tensão negativos. A geração de impulsos pode ser monopolar (impulsos positivos ou impulsos negativos) ou bipolar (impulso positivo e impulso negativo). Para o modo de carga dos condensadores C_i , Figura 2.19a), são postos à condução os semicondutores SI_0 , SI_{ai} , SI_{ei} e utilizado o díodo roda livre dos SI_{bi} ; enquanto são postos ao corte os semicondutores SI_{bi} , SI_{ci} e SI_{di} .

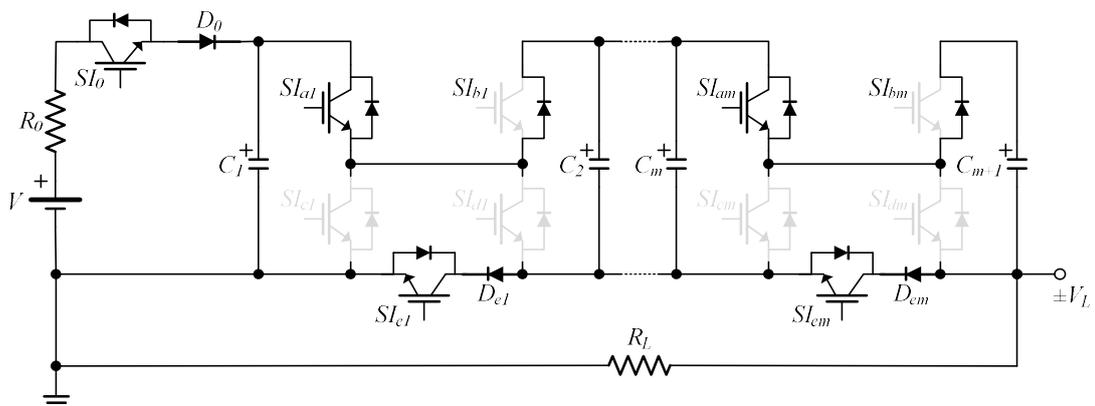


Figura 2.19a) – Circuito simplificado de carga dos condensadores da nova topologia de geração de impulsos bipolares de alta tensão [Canacsinh et al., 2008].

Para o modo de funcionamento de geração de impulsos de tensão positivos, Figura 2.19b), são utilizados os condensadores C_i , exceto o condensador C_{m+1} , e postos à condução os semicondutores SI_{ai} e SI_{di} ; enquanto os semicondutores SI_0 , SI_{bi} , SI_{ci} e SI_{ei} são postos ao corte.

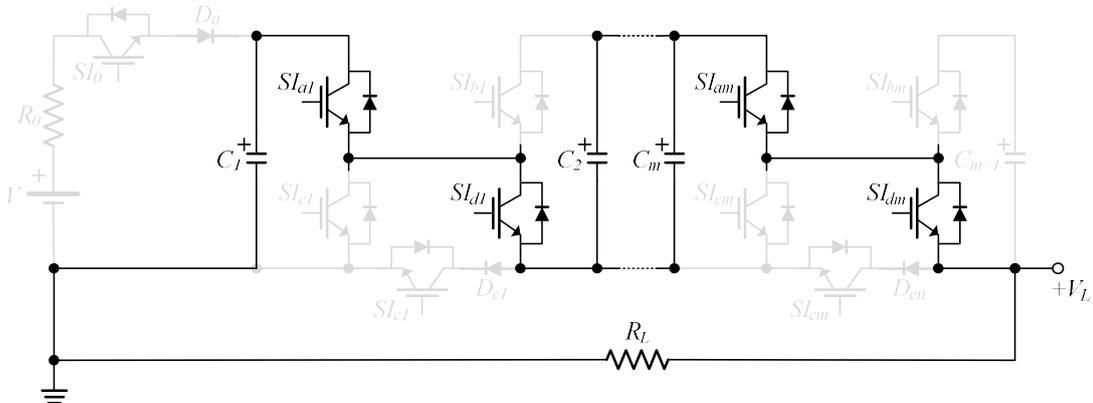


Figura 2.19b) – Circuito simplificado de geração de impulsos de tensão positivos da nova topologia de geração de impulsos bipolares de alta tensão [Canacsinh et al., 2008].

Para o modo de funcionamento de geração de impulsos de tensão negativos, Figura 2.19c), são utilizados os condensadores C_i , exceto o condensador C_1 , e postos à condução os semicondutores SI_{bi} e SI_{ci} ; enquanto os semicondutores SI_0 , SI_{ai} , SI_{di} e SI_{ei} são colocados ao corte.

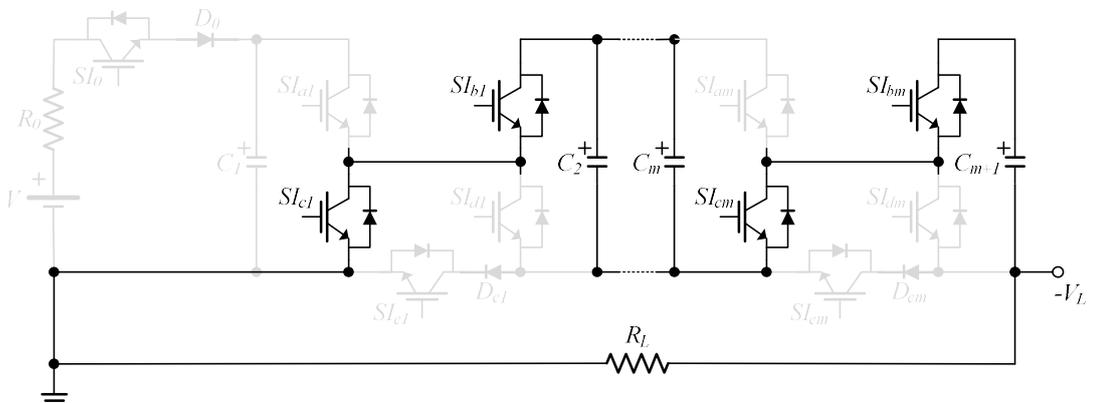


Figura 2.19c) – Circuito simplificado de geração de impulsos de tensão negativos da nova topologia de geração de impulsos bipolares de alta tensão [Canacsinh et al., 2008].

O bom funcionamento dos três modos de operação é garantido por um tempo morto adequado entre qualquer um deles. Na Figura 2.20 apresenta-se uma imagem dos resultados experimentais obtidos pelos autores sobre uma carga resistiva de 400Ω.

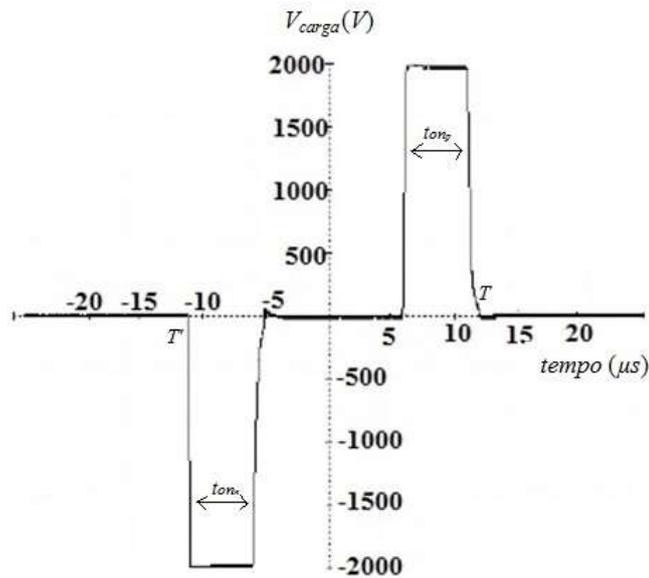


Figura 2.20 – Resultado experimental de impulso bipolar na carga do circuito gerador de Marx da Figura 2.19, eixo horizontal 5 $\mu\text{s}/\text{div}$, eixo vertical 500 V/div, [Canacsinh et al., 2008].

A equação que traduz a forma de onda da tensão na carga, em regime permanente, de acordo com a Figura 2.20, é a seguinte:

$$V_L(t) = \begin{cases} 0 & , 0 < t < T - t_{on} \\ mV_{C1,\dots,m} e^{-\frac{1}{R_L \frac{C_m}{m}} t} & , T - t_{on} < t < T \\ 0 & , 0 > t > T' + t_{on} \\ -mV_{C2,\dots,m+1} e^{-\frac{1}{R_L \frac{C_m}{m}} t} & , -T' + t_{on} > t > T' \end{cases} \quad (2.12)$$

Em que C_m é a capacidade de cada condensador do circuito, T e T' representam o instante em que iniciam o impulso positivo e o impulso negativo respectivamente, da forma de onda do impulso de tensão bipolar na carga.

2.3.1.3 "Inductive Adder"

Na Figura 2.21, apresenta-se uma topologia de um somador indutivo, onde cada condensador é carregado de forma independente por um transformador de isolamento sendo posteriormente colocado em série com os demais e com a carga, da mesma forma que o gerador de Marx. O circuito é capaz de gerar impulsos bipolares ou monopolares de alta tensão, segundo Liu et al. (2009), no qual cada estágio é constituído por dois condensadores em série, carregados independentemente com a mesma tensão a partir de um transformador com isolamento galvânico, para que os impulsos de tensão positivo e negativo tenham a mesma amplitude [Gao et al., 2010; Gao et al., 2011; Holma et al., 2014].

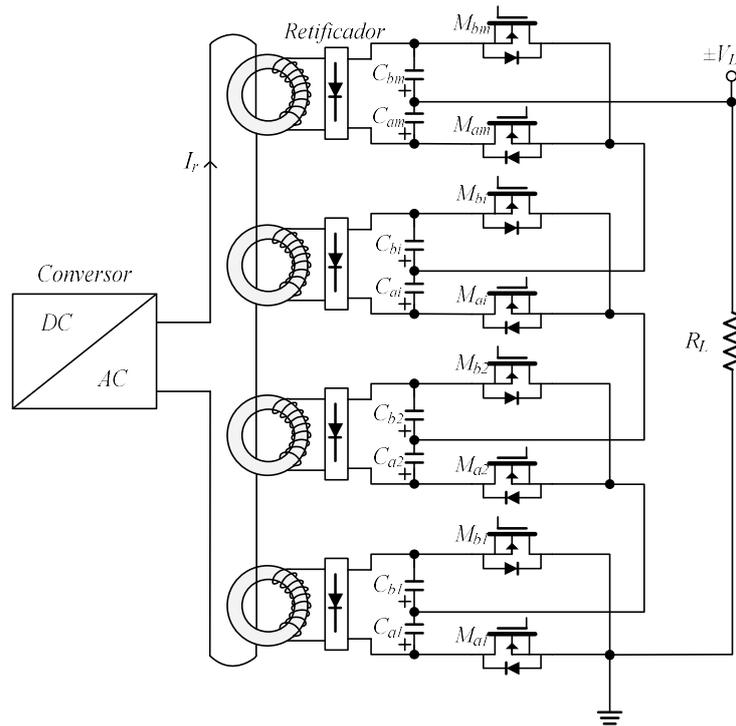


Figura 2.21 – Circuito simplificado da topologia somador de tensão, para geração de impulsos bipolares de alta tensão [Gao et al., 2011].

O funcionamento deste circuito pode dividir-se em três modos de operação: carga dos condensadores, geração do impulso de tensão positivo e geração do impulso de tensão negativo.

A carga dos condensadores, Figura 2.21a), é feita através de um conversor de alta-frequência que gera uma tensão alternada, que alimenta os condensadores C_{ai} e C_{bi} através de transformadores que fornecem o isolamento da alta tensão.

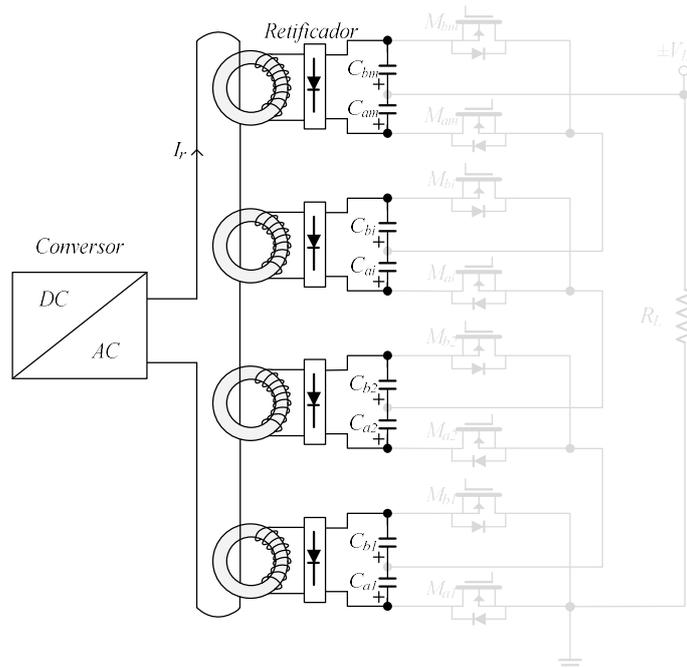


Figura 2.21a) – Carga dos condensadores do circuito simplificado da topologia somador de tensão, para geração de impulsos bipolares de alta tensão [Gao et al., 2011].

Para o modo de funcionamento de geração de impulsos de alta tensão negativos, Figura 2.21b), os condensadores C_{ai} através dos MOSFETs M_{ai} são colocados em série com a carga.

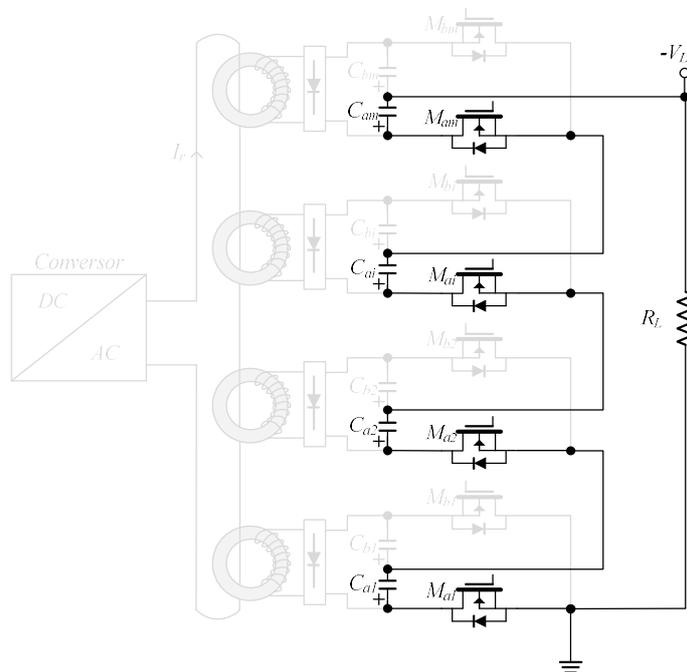


Figura 2.21b) – Geração de impulsos de tensão negativos do circuito simplificado da topologia somador de tensão, para geração de impulsos bipolares de alta tensão [Gao et al., 2011].

Para o modo de funcionamento de geração de impulsos de alta tensão positivos, Figura 2.21c), os condensadores C_{bi} através dos MOSFETs M_{bi} são colocados em série com a carga.

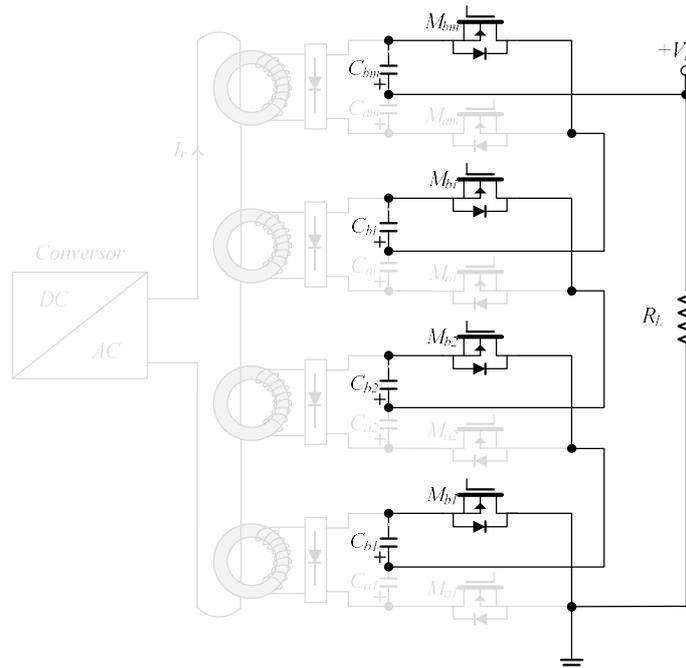


Figura 2.21c) – Geração de impulsos de tensão positivos do circuito simplificado da topologia somador de tensão, para geração de impulsos bipolares de alta tensão [Gao et al., 2011].

A amplitude dos impulsos de alta tensão a aplicar à carga é igual à soma da tensão de cada condensador que compõem o braço do impulso positivo ou do impulso negativo.

Na Figura 2.22 apresenta-se uma imagem dos resultados experimentais obtidos pelos autores sobre uma carga resistiva de 50Ω.

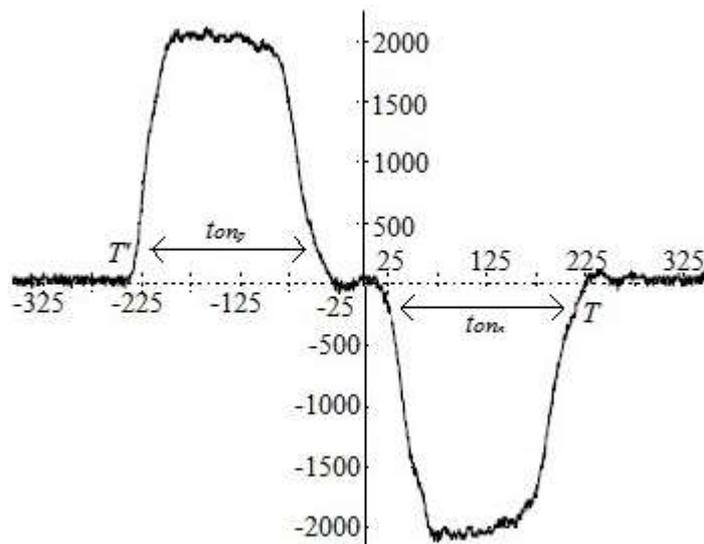


Figura 2.22 – Resultado experimental de impulso bipolar na carga do circuito somador de tensão da Figura 2.21, eixo horizontal 50ns/div, eixo vertical 500V/div, [Gao et al., 2011].

A equação que traduz a forma de onda da tensão na carga, em regime permanente, é a seguinte:

$$V_L(t) = \begin{cases} 0 & , 0 < t < -T' + t_{on} \\ mV_{Cbi}e^{-\frac{1}{R_L\frac{C_{bi}}{m}}t} & , -T' + t_{on} < t < -T' \\ 0 & , 0 < t < T - t_{on} \\ -mV_{Cai}e^{-\frac{1}{R_L\frac{C_{ai}}{m}}t} & , T - t_{on} < t < T \end{cases} \quad (2.13)$$

Em comparação com o circuito da Figura 2.19, o circuito da Figura 2.21 tem modularidade em corrente durante a carga dos condensadores, no entanto para que todos sejam carregados com a mesma tensão, os parâmetros de todos os transformadores devem ser iguais.

No caso de falhar um semiconductor de um estágio, a tensão na carga do circuito da Figura 2.19 é: $V_L = \pm(m-1)V_{C(1,2)}$, enquanto que no circuito da Figura 2.21 é: $V_L = \pm(m-2)V_{C(a,b)i}$, porque, neste caso, o circuito fecha-se pelo díodo roda livre do semiconductor que pertence ao circuito que faz o impulso inverso do impulso bipolar e coloca em série o condensador com tensão inversa do mesmo impulso, ou seja, o impulso perde a tensão do condensador que fica fora de serviço e do condensador com tensão inversa que soma com a tensão dos outros condensadores durante o impulso.

2.3.1.4 Conclusões

No subcapítulo 2.3.1 foram apresentadas soluções capazes de gerar impulsos bipolares de alta tensão baseadas na descarga direta de condensadores sobre uma carga. No entanto, apesar das diferentes técnicas de geração de impulsos de alta tensão, o maior obstáculo prende-se com as características dos semicondutores disponíveis no mercado (e.g. tensão máxima aos terminais, corrente conduzida e tempo de comutação).

2.3.2 Circuitos baseados na carga/descarga de linhas de transmissão

2.3.2.1 Caracterização de uma linha de transmissão

Uma linha de transmissão (LT) pode ser entendida como a associação em paralelo de dois caminhos condutores uniformes, com capacidade e indutância proporcional em cada segmento infinitesimal ao longo do seu comprimento, entre os quais é gerado um campo elétrico e um campo magnético, sempre que num dos extremos é ligada uma fonte ou gerador de energia elétrica. Na Figura 2.23, mostra-se um exemplo de uma LT.

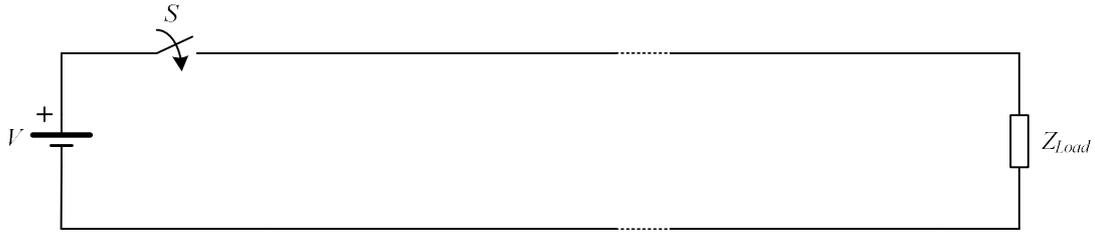


Figura 2.23 – Exemplo de uma LT.

O papel principal de uma LT é transportar a energia elétrica fornecida por uma fonte ou gerador de tensão e entregá-la a uma carga Z_{Load} . Da definição de LT sabe-se que associado ao campo elétrico tem-se os condensadores C e, com o campo magnético as bobinas L distribuídas ao longo da LT, como ilustra a Figura 2.24, no circuito de parâmetros distribuídos [Sluis, 2001; Smith, 2002].

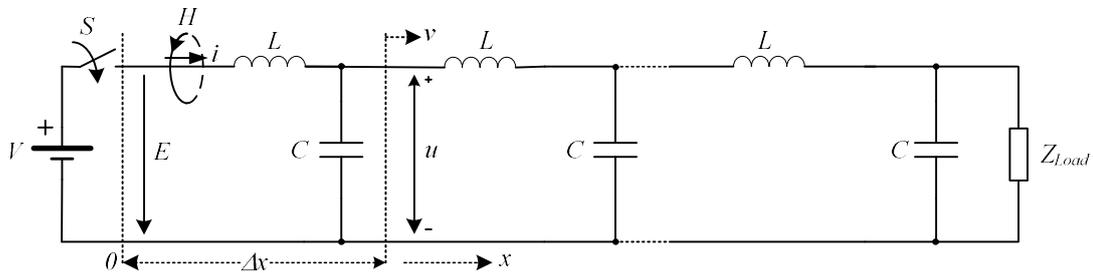


Figura 2.24– Modelo eléctrico equivalente de uma LT [Sluis, 2001].

Se o interruptor S é fechado no instante $t=0$, a fonte de tensão carregará a LT, mas, ao fim de um tempo Δt , apenas um segmento Δx da linha será carregado com a carga [Jonhk, 1988; Moura, 1980; Ramo et al., 1965; Sluis, 2001]:

$$\Delta Q = Cu\Delta x \quad (2.16)$$

Esta carga ΔQ , igualmente distribuída ao longo do segmento da linha Δx , gera um campo elétrico E , e a corrente ou fluxo de cargas gera um campo magnético H . Se o segmento Δx for infinitesimalmente pequeno, a expressão para a corrente é:

$$i = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{Cu\Delta x}{\Delta t} = Cu \frac{dx}{dt} = Cuv \quad (2.17)$$

Porque o segmento de linha Δx é carregado dentro do tempo Δt e $\Delta x/\Delta t$ é a velocidade com que a onda eletromagnética percorre a LT. O fluxo magnético presente no segmento de linha Δx é:

$$\Delta\phi = Li\Delta x \quad (2.18)$$

Substituindo i , da equação (2.17) na equação (2.18), e considerando o segmento Δx , infinitesimalmente pequeno, a expressão para a força eletromotriz e , é:

$$e = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = LCuv \frac{dx}{dt} = LCuv^2 \quad (2.19)$$

Considerando que não há descontinuidade em tensão (linha sem perdas, resistência nula), esta força eletromotriz e é igual à tensão u , assim da expressão (2.19) tem-se a expressão para a velocidade de propagação da onda eletromagnética v :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.20)$$

O comprimento elétrico ou tempo de propagação de uma LT, δ , é definido pela expressão (2.21):

$$\delta = \frac{l}{v} = l\sqrt{LC} \quad (2.21)$$

Substituindo v , na equação (2.17), tem-se:

$$i = Cuv = \frac{Cu}{\sqrt{LC}}$$

E da razão entre a tensão e a corrente ao longo da LT, designada impedância característica da linha Z_0 , tem-se:

$$Z_0 = \frac{u}{i} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cong \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} \quad (2.22)$$

Da análise da equação (2.20) e da equação (2.22), conclui-se que a velocidade de propagação da onda eletromagnética e a impedância característica da LT dependem apenas da sua geometria, da permitividade e permeabilidade do meio que a constituem.

2.3.2.2 Propagação e índices de transmissão e reflexão numa LT

Sempre que se verificar uma descontinuidade (i. e. variação de impedância), quando se propaga uma onda de tensão e/ou corrente ao longo de uma LT, surge no mesmo ponto uma onda refletida e/ou uma onda transmitida. Considere-se por exemplo o ponto A do circuito da Figura 2.25.

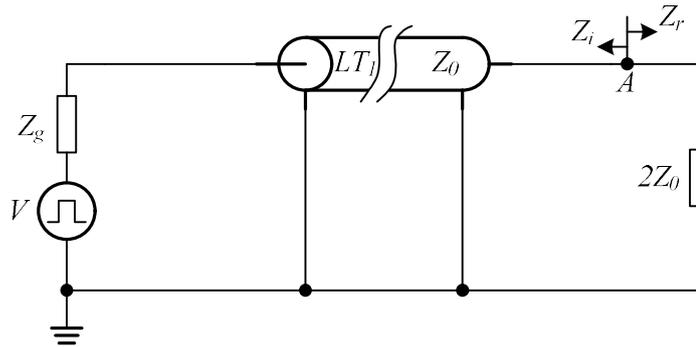


Figura 2.25 – Exemplo de um circuito de propagação de onda de tensão numa LT e uma carga.

Considerando a Figura 2.25, o coeficiente de reflexão ρ é definido, de acordo com [Ramo et al., 1965; Moura, 1980; Jonhk, 1988; Sluis, 2001; Smith, 2002; Mendes et al., 2012] pela expressão (2.23):

$$\rho = \frac{Z_r - Z_i}{Z_r + Z_i} \quad (2.23)$$

em que Z_r representa a impedância vista pela onda incidente para a terra e Z_i representa a impedância vista pela onda refletida para a terra. Também, para o circuito da Figura 2.26, o coeficiente de transmissão Γ é definido pela expressão (2.24):

$$\Gamma = 1 + \rho = 1 + \frac{Z_r - Z_i}{Z_r + Z_i} = \frac{2Z_r}{Z_r + Z_i} \quad (2.24)$$

Considere-se o circuito da Figura 2.26a), em que todos os elementos apresentam uma impedância igual a 50Ω . Devido ao facto do valor da impedância característica da linha LT_1 ser igual ao valor da impedância da carga Z_{Load} em módulo significa que não existem reflexões de ondas de tensão no circuito como se pode ver na Figura 2.26b), neste caso podemos dizer que a carga do circuito está adaptada. Na Figura 2.26c) apresenta-se o diagrama de Bewley que serve para caracterizar a forma de onda na linha de transmissão e na carga durante o impulso de tensão na carga.

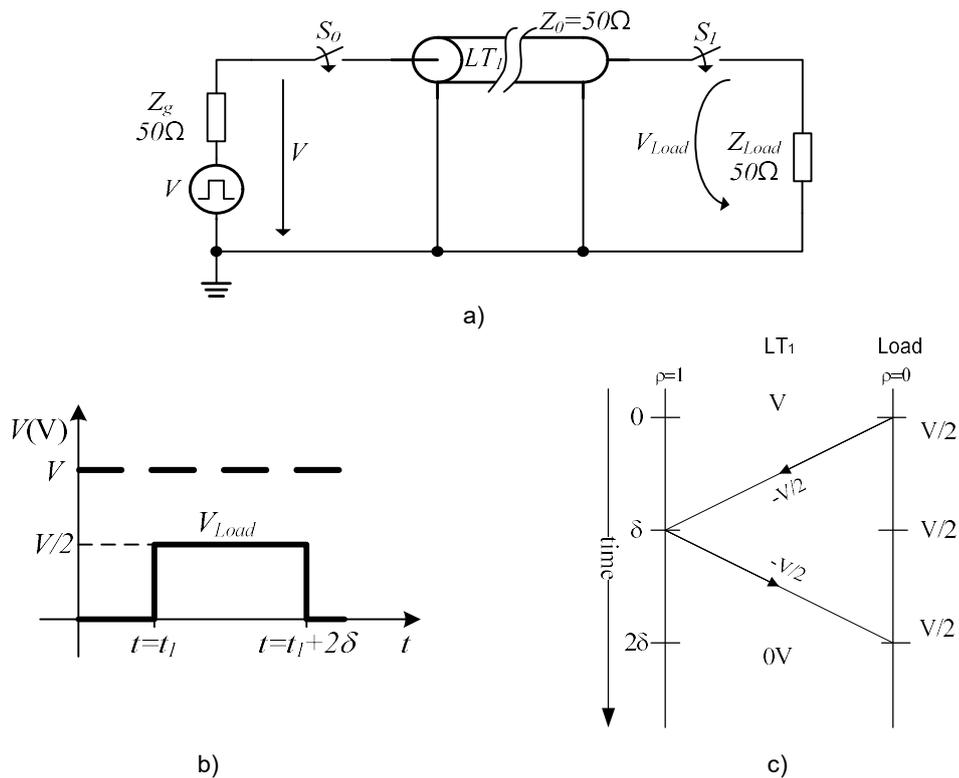


Figura 2.26 – a) Circuito formado por uma fonte de tensão, uma LT, e uma carga; b) forma de onda de tensão na carga; c) diagrama de Bewley.

Inicialmente o circuito está descarregado com os interruptores S_0 e S_1 desligados. Em $t=0$ liga-se o interruptor S_0 e a LT_1 ao fim do tempo δ fica carregada. Em $t=t_1$ desliga-se o interruptor S_0 e liga-se o interruptor S_1 , como a impedância da carga está adaptada com a impedância característica da LT_1 (i. e. 50Ω), surge um impulso de tensão na carga de amplitude $V/2$, equação (2.25), durante o intervalo de tempo 2δ [Roche, 1998; Mankowski et al., 2000; Smith, 2002].

$$V_{Load} = \frac{Z_{Load}}{Z_{Load} + Z_0} V = \frac{1}{2} V \quad (2.25)$$

Na Figura 2.26c) o diagrama de Bewley mostra que no instante inicial a tensão na LT_1 tem amplitude igual a V , em $t=t_1$, que por simplificação do gráfico considerou-se $t=0$, neste instante propaga-se uma onda de tensão de valor igual a $-V/2$ na linha LT_1 de S_1 em direção a S_0 , durante um período de tempo δ , ao atingir o início de LT_1 esta onda de tensão é totalmente reflectida e ao fim de um período de tempo 2δ anula a amplitude de tensão na LT_1 e conseqüentemente na carga Z_{Load} .

Se no caso da Figura 2.26, a carga não estiver adaptada com a LT_1 tem-se os seguintes coeficientes de reflexão e transmissão como mostra a Tabela 2.4:

Tabela 2.4 – Propagação de uma onda de tensão para o caso de carga desadaptada Z_{Load} .

No caso em que $Z_{Load} = Z_0/2$.	No caso em que $Z_{Load} = 2Z_0$.
$Z_g=50\Omega$ $Z_0=50\Omega$ $Z_{Load}=25\Omega$ <hr style="width: 100%;"/> $\rho=0$ $\rho=-1/3$ $\Gamma=1$ $\Gamma=2/3$	$Z_g=50\Omega$ $Z_0=50\Omega$ $Z_{Load}=100\Omega$ <hr style="width: 100%;"/> $\rho=0$ $\rho=1/3$ $\Gamma=1$ $\Gamma=4/3$
Da equação (2.25), tem-se que:	
$V_{Load} = \frac{Z_{Load}}{Z_{Load} + Z_0} V = \frac{\left(\frac{Z_0}{2}\right)}{\left(\frac{Z_0}{2}\right) + Z_0} V = \frac{1}{3} V$	$V_{Load} = \frac{Z_{Load}}{Z_{Load} + Z_0} V = \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_0} V = \frac{2}{3} V$
Quando a fonte de tensão está em aberto:	
$Z_g=\infty\Omega$ $Z_0=50\Omega$ $Z_{Load}=25\Omega$ <hr style="width: 100%;"/> $\rho=1$ $\rho=-1/3$ $\Gamma=2$ $\Gamma=2/3$	$Z_g=\infty\Omega$ $Z_0=50\Omega$ $Z_{Load}=100\Omega$ <hr style="width: 100%;"/> $\rho=1$ $\rho=1/3$ $\Gamma=2$ $\Gamma=4/3$
Tensão na LT_1 e na carga em função do tempo quando $Z_g=\infty$:	

A análise da Figura 2.26b) permite concluir que, no caso em que a impedância característica da LT_1 está adaptada com a impedância da carga, toda a energia armazenada pela LT_1 é consumida pela carga em apenas um impulso de duração 2δ . Da análise da Tabela 2.4, caso em que a impedância característica da LT_1 está desadaptada com a impedância da carga, para os casos analisados $Z_{Load}=Z_0/2$ e $Z_{Load}=2Z_0$, surge um número infinito de reflexões na carga até a energia da LT_1 se anular.

A evolução das formas de onda de tensão na carga V_{Load} , pode ser representada de acordo com (Smith, 2002) pelo diagrama de Bewley, como se mostra na Figura (2.27):

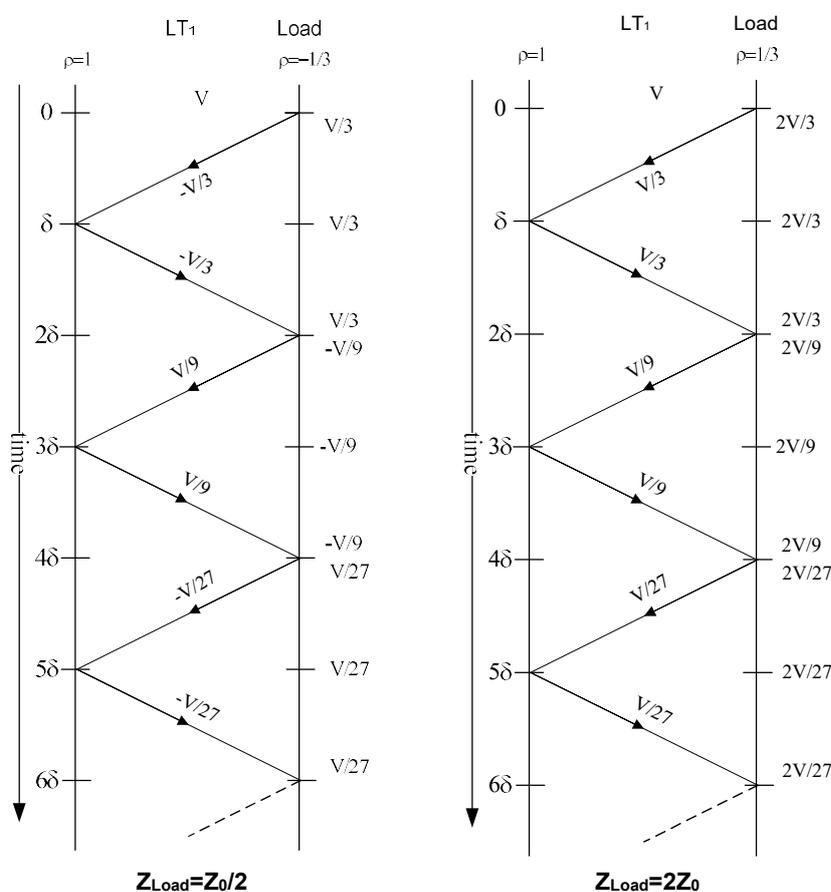


Figura 2.27 – Diagrama de Bewley do circuito da Figura 2.26, para valores de carga Z_{Load} , indicados.

Nestes dois casos e em comparação com o diagrama de Bewley da Figura 2.26c) como a carga não está adaptada com a impedância característica de LT_1 a tensão na carga depende dos factores reflexão e transmissão no circuito. Pela análise dos diagramas verifica-se que no caso em que $Z_{Load} = Z_0/2$ a amplitude do primeiro impulso é inferior a $V/2$ (caso do circuito de carga adaptada) e origina uma sequência alternada decrescente de impulsos de tensão, no caso em que $Z_{Load} = 2Z_0$ a amplitude do primeiro impulso é superior a $V/2$ e origina uma sequência positiva decrescente de impulsos de tensão.

2.3.2.3 Utilização de Linhas Blumlein

A geração de impulsos de alta tensão monopolares e/ou bipolares é possível com recurso à utilização de linhas de transmissão, como se viu na secção anterior. De forma a multiplicar a amplitude da tensão de entrada, a associação de linhas de transmissão é carregada em paralelo e descarregada em série.

Uma das configurações adotadas é a designada por Blumlein, que se apresenta na Figura 2.28 [Mankowski et al., 2000]. Esta configuração permite entregar à carga R_{Load} , que neste caso para estar adaptada $R_{Load}=2Z_0$ (impedância da carga é igual à impedância da malha fechada do gerador Blumlein), impulsos de tensão de amplitude de valor igual à tensão com que as LT_1 e LT_2 são carregadas $V_{Load}=V$, e com largura do impulso igual a 2δ .

O impulso de tensão na carga R_{Load} surge sempre que entre as LT_1 e LT_2 , existe uma diferença de potencial, ou seja, a onda de tensão que carrega LT_1 com o potencial V encontra um ponto de descontinuidade, nesse ponto o condutor interior das LT é o mesmo condutor enquanto que a malha exterior de LT_1 está ligada à massa do circuito e a malha exterior de LT_2 é ligada à carga do circuito R_{Load} , como se mostra na figura seguinte (i.e. a carga é ligada entre a blindagem da linha e a massa, sendo que a energia para o impulso está armazenada no campo eléctrico associado com a capacidade da linha).

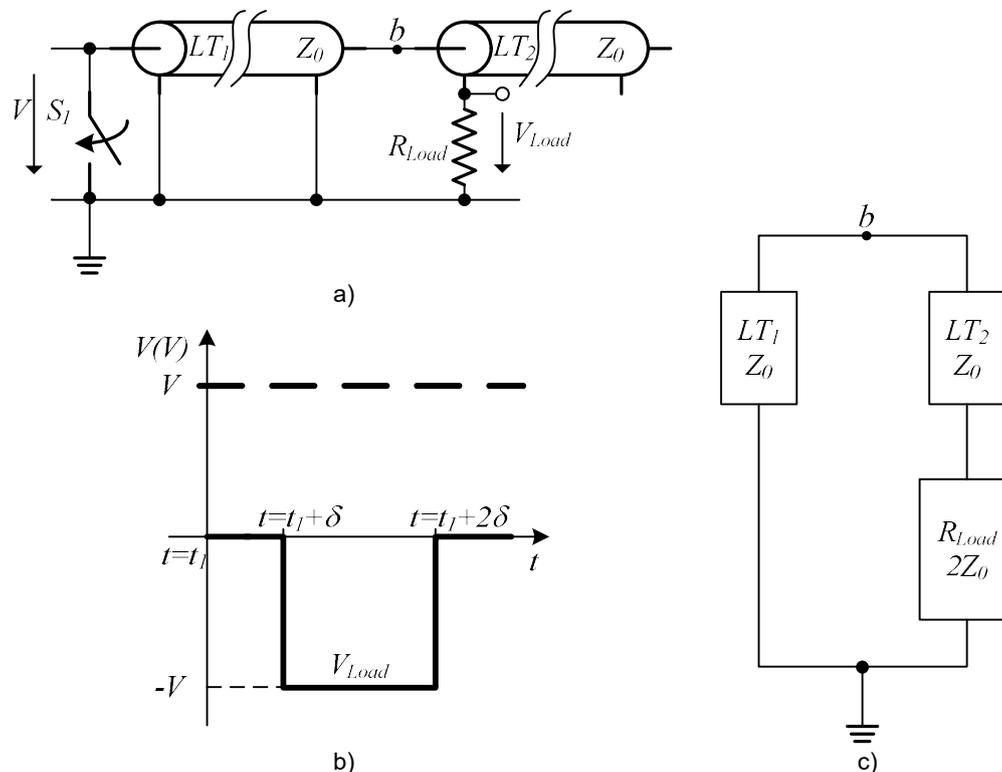


Figura 2.28 – Exemplo de uma linha Blumlein: a) circuito; b) forma de onda de tensão na carga; c) circuito equivalente de impedâncias no ponto de descontinuidade, ponto b.

Neste circuito, circuito Blumlein com 1 estágio e carga adaptada $R_{Load}=2Z_0$, significa que este é o valor que num circuito ideal anula todas as reflexões no circuito após o 1º impulso, conforme se mostra no Anexo I.

Normalmente, neste tipo de circuitos, as LT são carregadas previamente. Então, considerando a linha carregada com a tensão V , quando o interruptor S_i é fechado, $t=t_1$, começa-se a descarregar a LT_1 , propagando-se uma onda de tensão de amplitude igual a $-V$, anulando a tensão presente

nesta secção de LT. Ao fim do tempo δ , LT_1 está descarregada e começa-se a descarregar a LT_2 , com os índices de reflexão e transmissão indicados na Figura 2.29, à entrada da LT_1 , entre LT_1 e LT_2 e no final da LT_2 , surgindo em R_{Load} uma tensão de amplitude $-V$. A tensão na carga mantém-se enquanto existir uma diferença de potencial entre o fim da LT_1 e o início da LT_2 , ou seja, durante 2δ . Depois de descarregadas as LT, o interruptor S_1 é aberto e voltam-se a carregar as LT.

Na Figura 2.28 c) apresenta-se o circuito equivalente de impedâncias no ponto onde se verifica uma descontinuidade no circuito, ou seja, circuito entre o final de LT_1 e o início de LT_2 e a massa do circuito. A transferência de energia para a carga é feita através da impedância característica Z_0 da LT_2 que na configuração do circuito fica ligada em série com a carga. Para que se verifique a máxima transferência de energia para a carga esta deve ser capaz de absorver toda a energia armazenada em LT_1 e LT_2 . Na Figura 2.29 apresenta-se a evolução das formas de onda de tensão quando S_1 é fechado, com os factores de reflexão e transmissão calculados de acordo as equações (2.23) e (2.24).

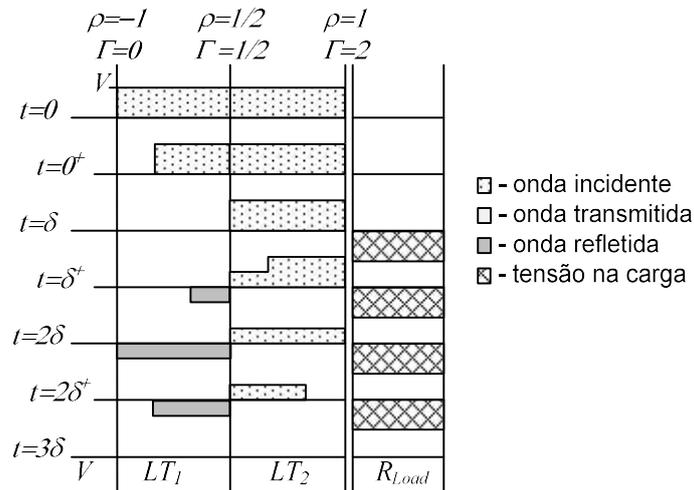


Figura 2.29 – Propagação de uma onda de tensão numa Blumlein line e tensão na carga.

Observando as formas de onda da Figura 2.29, conclui-se que este tipo de montagem, gerador Blumlein com um estágio é usado para formatar os impulsos de tensão, uma vez que se verifica que a amplitude da tensão com que o gerador é carregado é igual à amplitude de tensão do impulso na carga.

Chen et al. (2000) desenvolveram um gerador de impulsos de alta tensão bipolar, com recurso a duas fontes de alimentação, o impulso negativo é usado para excitação de emissão de eletrões em materiais ferromagnéticos por polarização inversa, enquanto o impulso positivo é usado para restabelecer rapidamente a polarização remanescente e preparar o material para o processo seguinte.

O circuito proposto apresenta-se na Figura 2.30, é composto por dois geradores Blumlein, carregados ao mesmo tempo, um com uma tensão positiva e outro com uma tensão negativa, e que

se descarregam em tempos diferentes gerando os impulsos de tensão bipolares. De acordo com este circuito, a carga do impulso de tensão positivo gerado pela energia armazenada em LT_1 e LT_2 , é R_{Load1} ; enquanto que a carga do impulso de tensão negativo gerado pela energia armazenada em LT_3 e LT_4 , é R_{Load2} .

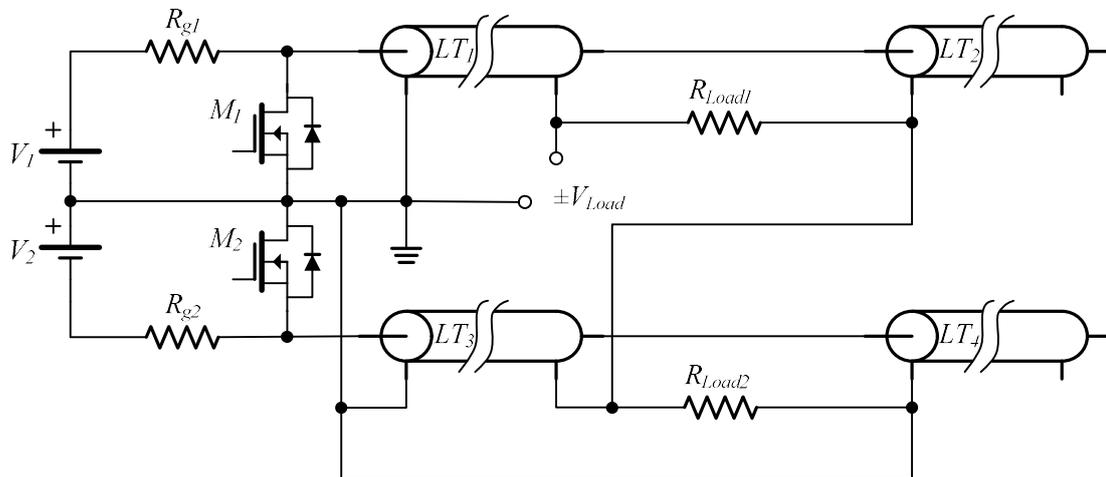


Figura 2.30 – Exemplo do gerador de impulsos bipolar de Feng Chen [Chen et al., 2000].

A configuração do circuito da Figura 2.30 permite a regulação independente da amplitude dos impulsos positivos ou negativos de alta tensão a aplicar à carga. Em função da configuração adotada podem produzir-se impulsos de tensão bipolares e independentes em V_{Load} , de amplitude igual à tensão da fonte de alimentação respectiva, Figura 2.31.

As impedâncias em série com as fontes R_{g1} e R_{g2} , são resistências indutivas de valor tal, de forma a servir de proteção das fontes de alta tensão respectivas, na carga das LT e da ocorrência de curto-circuitos, quando os MOSFETs estão à condução. Neste caso, cada MOSFET tem de suportar a tensão da fonte de alimentação respectiva. Enquanto M_1 estiver ao corte carregam-se os troços LT_1 e LT_2 através de R_{g1} com a tensão V_1 . Assim que M_1 é colocado à condução descarrega LT_1 e LT_2 , sobre $R_{Load1}=2Z_0$ e surge em V_{Load} um impulso retangular de tensão de amplitude V_1 e duração 2δ . O modo de funcionamento de carga e descarga de LT_3 e LT_4 através de R_{g2} com a tensão V_2 é semelhante ao modo de funcionamento anterior, o impulso de tensão retangular de amplitude $-V_2$ e duração 2δ surge agora na carga R_{Load2} .

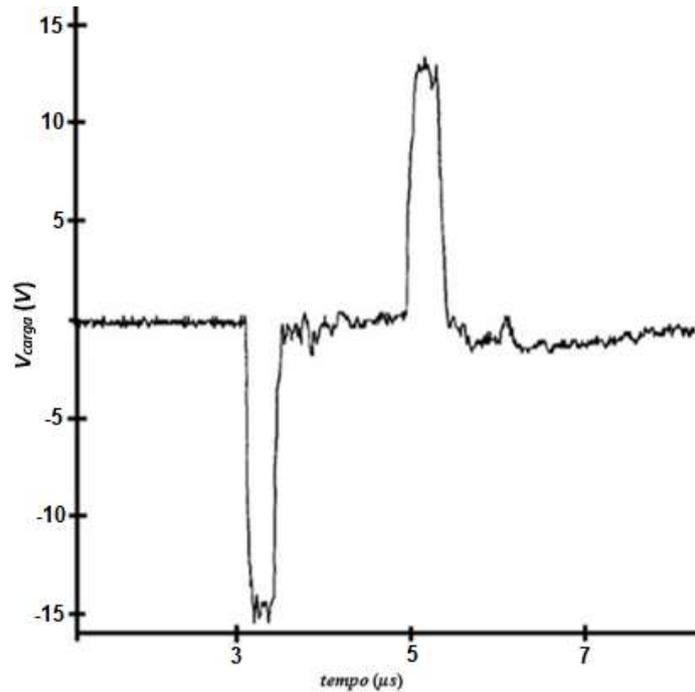


Figura 2.31 – Forma de onda do gerador de impulsos bipolar de Feng Chen [Chen et al., 2000].

Angelis et al. (2006) desenvolveram uma topologia, mais simples em relação à topologia apresentada por Chen et al. (2000), capaz de gerar impulsos bipolares ou monopolares de amplitude igual à tensão da fonte de alimentação e largura regulável limitada a duas vezes o tempo de trânsito da LT ou seja, 2δ . O circuito é apresentado na Figura 2.32:

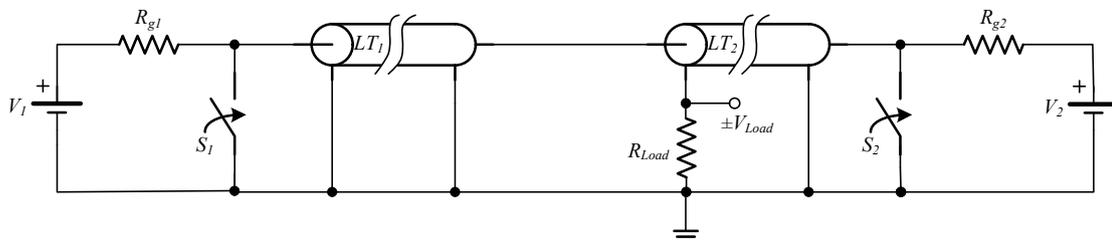


Figura 2.32 – Esquema do gerador de impulsos bipolar de A. de Angelis [Angelis et al., 2006].

Como se mostra na Figura 2.32, comparativamente com a topologia anterior, Figura 2.30, esta topologia também necessita de duas fontes de alimentação. Se os dispositivos de comutação S_1 e S_2 abrirem ou fecharem ao mesmo tempo, nenhum impulso de tensão se verificará na carga R_{Load} , pelo contrário se S_1 é fechado no tempo T_1 , e S_2 é fechado no tempo T_2 , e $T_2 - T_1 = \Delta T > 0$, com $|\Delta T| < 2\delta$, a onda de tensão V_1 atinge a carga ao fim de um tempo de atraso δ_1 , correspondente ao tempo de propagação da onda de tensão na linha de transmissão, e apenas a partir desse momento surge um impulso de tensão em V_{Load} , depois de ΔT a onda de tensão V_2 atinge a carga R_{Load} , com igual amplitude e polaridade inversa, anulando o impulso de tensão que se verificava em V_{Load} , este resultado é traduzido pela seguinte equação:

$$\begin{cases} V_{Load} = \text{sinal}(T_1 - T_2)V, & \min(T_1, T_2) + \delta + |\Delta T| \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (2.26)$$

A forma de onda da tensão na carga é a que se apresenta na Figura 2.33:

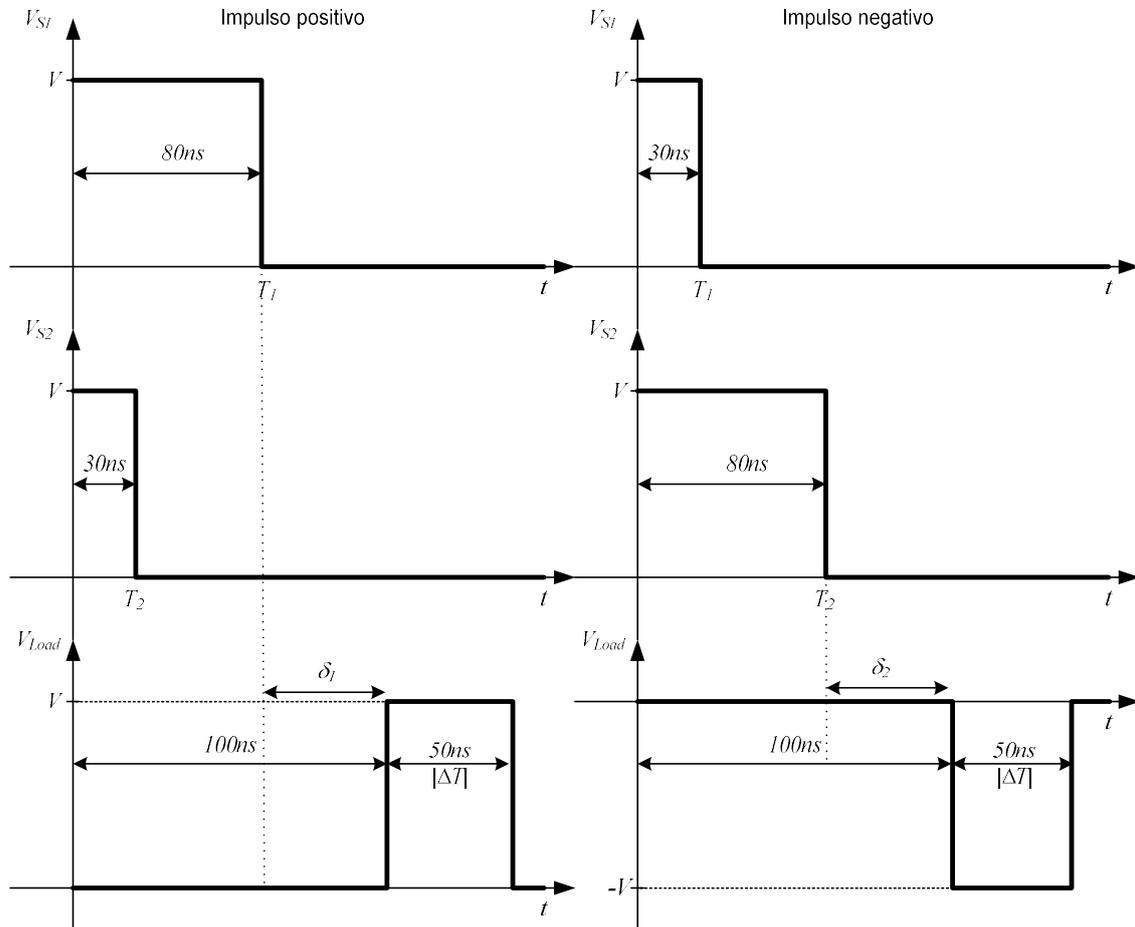


Figura 2.33 – Forma de onda de tensão e na carga do gerador Blumlein de A. Angelis [Angelis et al., 2006].

A análise desta topologia foi feita considerando que os semicondutores S_1 e S_2 abrem ao mesmo tempo, para dar início à carga dos troços das LT, caso contrário surgirá um impulso de tensão na carga. Relativamente à topologia da Figura 2.30, esta topologia permite o controlo da largura dos impulsos através do controlo dos dispositivos de comutação.

Rebersek et al. (2009) apresentaram uma nova topologia, do tipo ponte completa, com apenas uma fonte de alimentação e quatro dispositivos semicondutores do tipo MOSFET, Figura 2.34. Esta topologia permite as mesmas soluções que a aquela apresentada por Angelis et al. (2006), Figura 2.32, com o controlo dos impulsos tanto na carga como na descarga dos troços da LT:

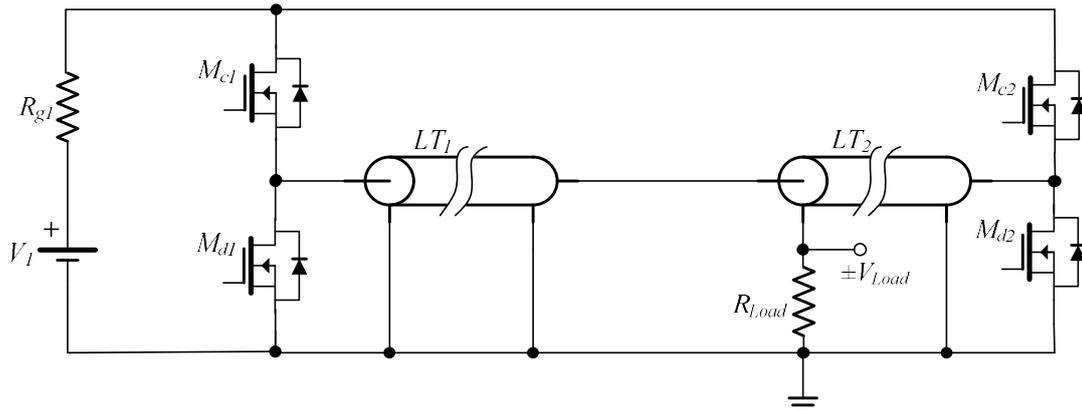


Figura 2.34 – Circuito simplificado do gerador de impulsos bipolar de Matej Rebersek, [Rebersek et al., 2009].

O princípio de funcionamento do gerador é idêntico ao anterior, permite gerar impulsos bipolares ou monopolares, positivos ou negativos, pela ordem que for conveniente ao operador. Um exemplo dos resultados experimentais da forma de onda da tensão na carga V_{Load} , é apresentado na Figura 2.35.

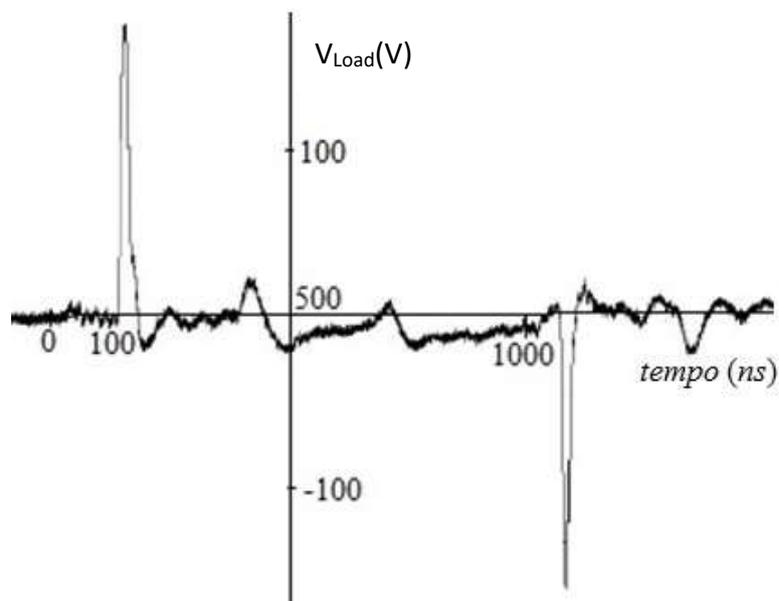


Figura 2.35 – Forma de onda de tensão na carga do gerador Blumlein [Rebersek et al., 2009].

A principal diferença na operação dos circuitos da Figura 2.32 e da Figura 2.34 é que nesta ultima topologia, os autores têm controlo total quer na carga quer na descarga da linha Blumlein, o que permite controlar e gerar automaticamente os impulsos bipolares. Na Figura 2.35, como é resultado de uma implementação experimental com dispositivos interruptores reais, o tempo finito de comutação destes influencia a forma de onda, que não é retangular.

A principal vantagem das diferentes topologias de geradores de impulsos apresentadas, que transferem diretamente a energia armazenada para uma carga, é que elas entregam essa energia em impulsos retangulares em sincronismo com o controlo da *gate* dos dispositivos de comutação

[Roche, 1998]. Já com as LT, essa energia é entregue à carga ao fim do tempo de propagação associado a cada LT.

A geração de impulsos monopolares e bipolares de alta tensão com largura inferior ao microssegundo com recurso ao uso de LT é uma técnica bastante usada, dada a dificuldade de se encontrar no mercado dispositivos semicondutores capazes de gerar impulsos de alta tensão com esta especificidade.

Com o uso de LT, as fontes de alimentação e interruptores, estão intrinsecamente protegidos contra curto-circuitos porque a elas está associado o tempo de propagação e impedância característica.

Variando o valor da carga, carga não adaptada, pode-se variar a amplitude dos impulsos, mas com a desvantagem da carga ficar sujeita a reflexões da onda de tensão.

A principal desvantagem do uso de LT nos sistemas de potência pulsada prende-se com a necessidade de encontrar no mercado dispositivos de comutação capazes de comutar num tempo bastante inferior à duração do impulso de tensão para que o sinal a entregar à carga seja o mais retangular possível.

3. Gerador Híbrido de Alta Tensão, GHAT

3.1 Introdução

Considerando as aplicações biomédicas descritas no Capítulo 2, as diferentes topologias capazes de gerar impulsos de alta tensão bipolares com largura inferior ao microssegundo, assim como as características da tecnologia baseada em interruptores de estado sólido, foi decidido implementar um gerador de impulsos baseado numa topologia de gerador de Marx ligado a uma associação de linhas Blumlein, tendo em conta que:

- a utilização de um circuito com a flexibilidade de um gerador de Marx, baseado em semicondutores, permite a variação da largura, amplitude e frequência dos impulsos de tensão gerados;
- a ligação de um gerador de Marx a uma associação de linhas de transmissão, permite a sua carga e descarga de forma a gerar impulsos bipolares de alta tensão com recurso a uma fonte de alimentação com amplitude de tensão inferior;
- a associação das linhas de transmissão permite a obtenção de impulsos de tensão com uma largura inferior ao microssegundo;
- a utilização de linhas de transmissão permite uma proteção mais eficaz contra curto-circuitos na carga.

3.1.1 Requisitos do gerador

As cargas biológicas utilizadas nas aplicações biomédicas são caracterizadas eletricamente por serem do tipo resistivo, com valores de condutividade elétrica entre 0,1 e 1S/m, o que para as câmaras de tratamento mais comuns significa resistências entre dezenas e centenas de ohms, quando sujeitas à aplicação de um impulso de tensão, pelo que é objetivo deste trabalho verificar a validade do funcionamento da topologia do circuito proposto para cargas deste tipo, de acordo com os parâmetros normalmente requeridos por estas aplicações.

No âmbito das aplicações de PP, foi selecionado como alvo para este trabalho as aplicações biomédicas, apresentadas na secção 2.2, onde se definiram os objetivos, se caracterizou o tipo de carga, bem como os requisitos energéticos. Concluiu-se para as aplicações biomédicas são necessários impulsos de tensão de amplitude até 10kV e largura de impulso inferior ao μ s, para que durante a aplicação dos impulsos não existam efeitos adversos para as células [Altunc, 2009; Schoenbach et al., 2004], como por exemplo o aumento de temperatura.

Deste modo, com base no trabalho de outros autores em aplicações similares, é possível definir a gama de valores para os parâmetros elétricos, que sirvam de orientação para os impulsos do GHAT a ser construído [Rebersek et al., 2011; Schoenbach et al., 2002; Weaver et al., 1996]. Estes valores são apresentados na Tabela 3.1, onde se observa uma dispersão razoável dos valores de cada parâmetro com a exceção do fator de ciclo que é sempre inferior a 1%.

Tabela 3.1 – Gama de valores dos parâmetros elétricos GHAT de outros autores para aplicações biológicas semelhantes aos especificados para este trabalho.

Parâmetros dos impulsos do GHAT	Valor
Tensão [kV]	1 a 10
Frequência [Hz]	10 a 1000
Largura do impulso [ns]	25 a 300
Fator de ciclo [%]	<1

Os valores dos parâmetros elétricos dos impulsos pretendidos para o GHAT a ser construído neste trabalho são apresentados na Tabela 3.2, e foram escolhidos tendo em conta:

- Os valores apresentados na Tabela 3.1;
- As características dos materiais disponíveis para a construção do GHAT;
- A tecnologia para a conceção do circuito de geração dos impulsos.

Tabela 3.2 – Valores dos parâmetros elétricos pretendidos para o GHAT a ser construído neste trabalho.

Parâmetros dos impulsos do GHAT	Valor
Tensão [kV]	10
Frequência [Hz]	100
Largura de impulso [ns]	100
Fator de ciclo [%]	<1

3.1.2 Método escolhido para geração de impulsos

O estudo realizado na secção 2.3, sobre as diversas topologias capazes de gerar impulsos de alta tensão bipolares, considerando as características das cargas referidas na secção 2.2.2, resultou na conceção de um gerador híbrido compacto de alta tensão baseado na associação em cascata de um gerador de Marx de impulsos positivos, utilizando unicamente semicondutores, com uma linha de formatação de impulsos do tipo gerador Blumlein. As opções tomadas tiveram em conta:

- A largura dos impulsos desejada tendo em vista as características da carga;
- Operação com uma frequência conveniente apresentando à saída impulsos com forma de onda adequada;
- Utilização de dispositivos semicondutores, e de entre estes o MOSFET devido à necessidade de tempos de comutação reduzidos;
- Utilização de topologias que reduzam a tensão máxima aplicada aos semicondutores;
- Utilização de semicondutores em paralelo para aumentar a capacidade em corrente do circuito;
- Utilização de linhas de transmissão para formatar os impulsos;
- Facilidade de operação e segurança;
- Construção do protótipo com materiais disponíveis no mercado adequados ao bom funcionamento do sistema com o menor custo possível.

Tendo em conta as características e os limites da tecnologia a utilizar optou-se por construir um gerador de Marx capaz de satisfazer os seguintes critérios:

- A redução da tensão de trabalho dos semicondutores, que deve ser mais baixa que a tensão do impulso na carga, para uma tensão à saída do gerador de Marx igual a 4kV, temos em cada semicondutor uma tensão de trabalho de 800V, bem como a facilidade das proteções contra sobretensões, sobreintensidades, variações de tensão dv/dt e de corrente di/dt ;
- A facilidade da geração de impulsos de tensão com forma quase retangular e fator de ciclo $<1\%$;
- A simplicidade de operação, baseada na associação em cascata de circuitos carga/descarga de condensadores.

À saída do gerador de Marx optou-se por ligar um gerador Blumlein de forma a garantir os seguintes critérios:

- A aplicação à carga de impulsos de alta tensão bipolares com largura na ordem das dezenas de nanossegundos;
- A autoproteção da carga contra sobretensões e sobreintensidades;
- A multiplicação da amplitude do sinal de entrada;

- A simplicidade de construção;
- Baixo custo.

Tendo em conta as opções tomadas decidiu-se por construir o gerador de Marx com recurso a semicondutores do tipo MOSFET devido ao facto de ser o interruptor com:

- Tensão nominal até 1,5kV;
- Corrente até 0,3kA;
- Queda de tensão baixa V_{DS} , para estas tensões e correntes as resistências de condução são normalmente elevadas, ohms, pelo que se vai optar por dispositivos de especiais de Si com resistência de condução reduzida;
- Taxa de repetição elevada, MHz;
- Tempo de passagem ao corte e à condução inferior a 100ns.

3.2 Topologia e funcionamento do gerador

3.2.1 Conceito

O GHAT resulta da associação de um gerador de Marx com m estágios, com uma associação de linhas do tipo Blumlein com n estágios, conforme se apresenta no circuito simplificado da Figura 3.1. O gerador de Marx carrega e descarrega alternadamente a associação de linhas Blumlein e desta forma gera alternadamente na carga, ligada a esta última, um impulso de tensão de polaridade positiva e um impulso de tensão de polaridade negativa, respetivamente, separados temporalmente pela largura do impulso do gerador de Marx.

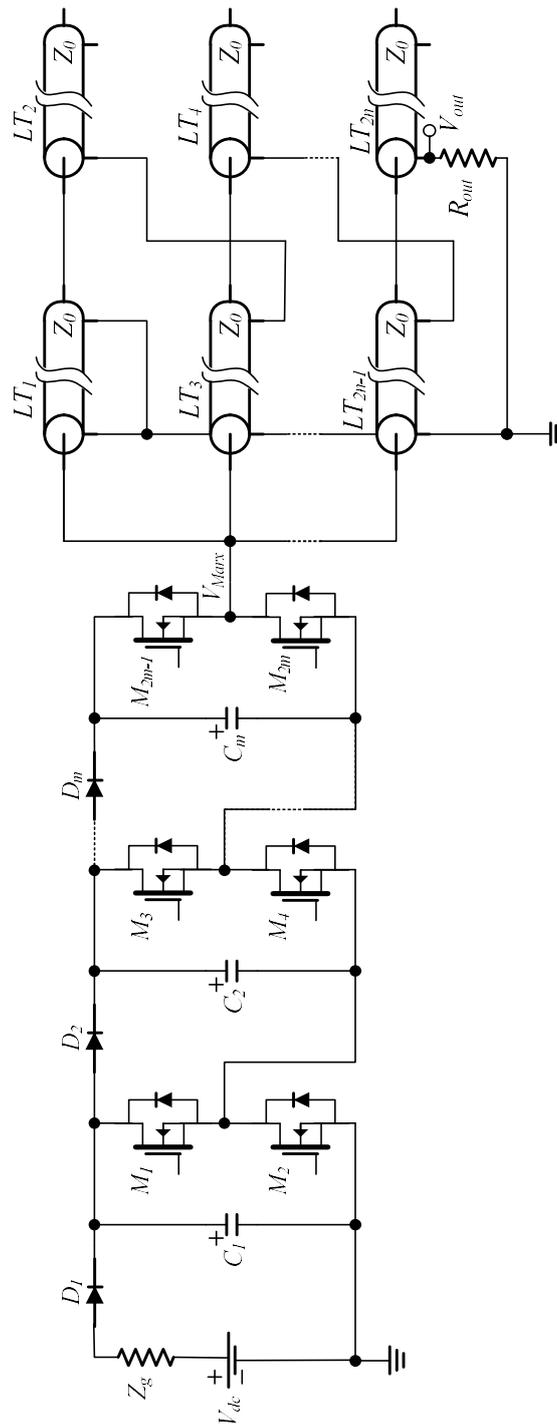


Figura 3.1 – Esquema simplificado do circuito GHAT, considerando um gerador de Marx ligado a uma associação de linhas Blumlein, respetivamente, com m e n estágios.

Nos pontos seguintes será feita a descrição genérica do funcionamento do conjunto, gerador de Marx e gerador Blumlein, para depois se descrever ao pormenor o funcionamento de cada um.

3.2.2 Gerador com mxn estágios

No circuito simplificado da Figura 3.2, apresenta-se o gerador constituído por 1 estágio no Marx e 1 estágio no Blumlein em que a fonte de alimentação V_{dc} carrega o condensador C_1 através do díodo D_1 que suporta a tensão da fonte V_{dc} e a corrente de carga do condensador C_1 , onde a corrente é limitada pela resistência interna de V_{dc} , Z_g , e de C_1 , sendo que a taxa de subida da tensão de V_{dc} em C_1 , até ao seu valor de referência se faz tendo em conta os limites de corrente e constante de tempo de carga do circuito. Quando M_1 é colocado à condução e M_2 ao corte, o condensador C_1 carrega o gerador Blumlein. Durante este período de funcionamento, e ao fim de um tempo δ , tempo de propagação da onda de tensão em cada troço de linha coaxial, surge na carga R_{out} um impulso de tensão positivo de largura igual a 2δ , Figura 3.3. Quando M_1 é colocado ao corte e M_2 à condução o gerador Blumlein é colocado à massa do circuito e descarregado. Durante este período de funcionamento, e ao fim de um tempo δ , surge na carga um impulso de tensão negativo de largura igual a 2δ .

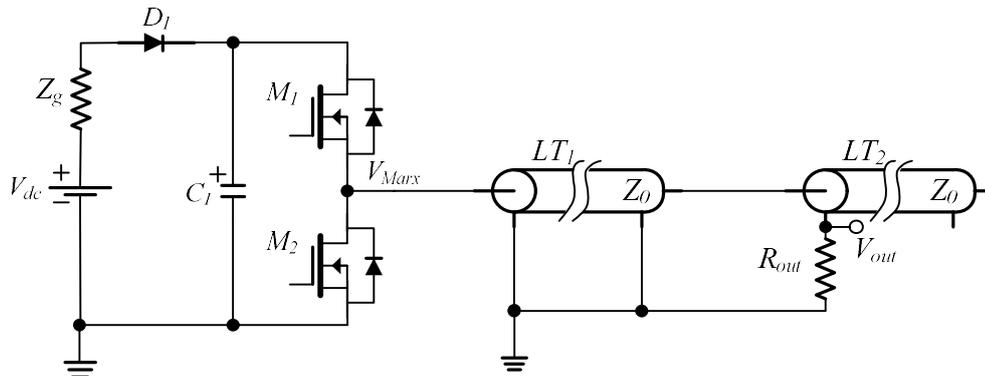


Figura 3.2 – Esquema simplificado do circuito GHAT, com 1 estágio no gerador de Marx ligado a 1 estágio do gerador Blumlein.

Nesta configuração V_{Marx} e V_{out} têm a forma de onda teórica, não considerando perdas nos componentes e linhas, bem como comutações instantâneas, definida na Figura 3.3, em sincronismo com as tensões de comando dos interruptores M_1 e M_2 .

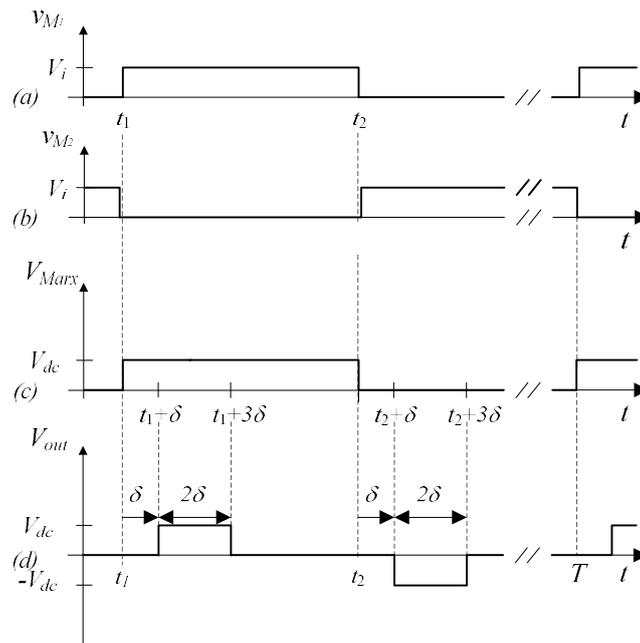


Figura 3.3 – Formas de onda teóricas do circuito GHAT da Figura 3.2, a) tensão na gate do MOSFET M_1 , b) tensão na gate dos MOSFETs M_2 , c) tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} , d) tensão na carga V_{out} .

Assim para o circuito da Figura 3.2, e da equação (2.11) e da equação (2.26) que traduzem a amplitude da tensão na carga V_{out} , do gerador de Marx e no gerador Blumlein respetivamente, considerando todos os componentes do circuito ideais, sem perdas nas linhas ou semicondutores, tem-se:

$$V_{Marx} = \begin{cases} V_{dc}, & [t_1; t_2] \\ 0, & [0; t_1] \wedge [t_2; T] \end{cases} \quad (3.1)$$

$$V_{out} = \begin{cases} V_{dc}, & [t_1 + \delta; t_1 + 3\delta] \\ -V_{dc}, & [t_2 + \delta; t_2 + 3\delta] \\ 0, & [0; t_1 + \delta] \wedge [t_1 + 3\delta; t_2 + \delta] \wedge [t_2 + 3\delta; T + t_1 + \delta] \end{cases} \quad (3.2)$$

Toda a energia para os impulsos na carga é fornecida pelo condensador C_1 , que depois é reposta entre impulsos pela fonte V_{dc} , enquanto que, o estágio do gerador Blumlein formata a largura do impulso. O condensador C_1 só entrega uma pequena fração da sua energia ao gerador Blumlein, pelo que a sua tensão não diminui, normalmente, mais que 10%, por cada impulso, este assunto será explicado em mais detalhe no ponto 3.2.3.3.

No circuito simplificado da Figura 3.4, apresenta-se o gerador constituído por 2 estágios no Marx e 2 estágios no Blumlein, mantendo-se os limites de funcionamento referidos anteriormente, a fonte de alimentação V_{dc} carrega em paralelo os condensadores C_1 e C_2 através de M_2 . Quando M_1 e M_3 são colocados à condução e M_2 , M_4 ao corte, colocam em série os condensadores C_1 e C_2 , que aplicam à entrada do gerador Blumlein uma tensão com o dobro da amplitude da tensão com que cada um foi carregado, ou seja, $2V_{dc}$. Durante este período de funcionamento, e ao fim de um tempo

$t_1 + \delta$, surge na carga um impulso de tensão positivo de amplitude igual a $4V_{dc}$ e largura igual a 2δ , Figura 3.5. Quando M_1, M_3 são colocados ao corte e M_2, M_4 à condução o gerador Blumlein é descarregado. Durante este período de funcionamento, e ao fim de um tempo $t_2 + \delta$, surge na carga um impulso de tensão negativo de amplitude igual a $4V_{dc}$ e largura igual a 2δ .

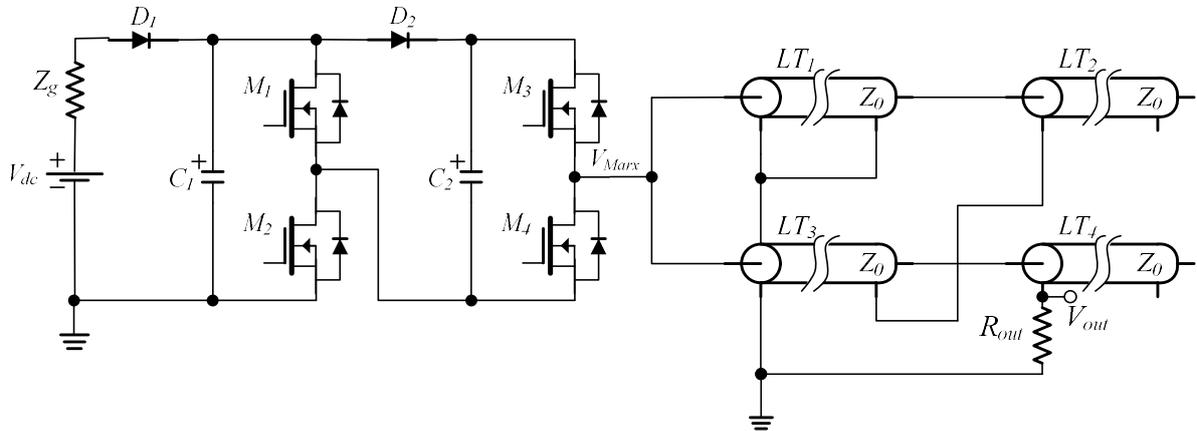


Figura 3.4 – Esquema simplificado do circuito GHAT, com 2 estágios no gerador de Marx ligado a 2 estágios no gerador Blumlein.

Assim para o circuito da Figura 3.4, tendo em conta a equação (2.11) e a equação (2.26), que traduzem a amplitude da tensão na carga V_{out} , do gerador de Marx e no gerador Blumlein respetivamente, considerando todos os componentes do circuito ideais, sem perdas nas linhas ou semicondutores, tem-se:

$$V_{Marx} = \begin{cases} 2V_{dc}, & [t_1; t_2] \\ 0, & [0; t_1] \wedge [t_2; T] \end{cases} \quad (3.1)$$

$$V_{out} = \begin{cases} 4V_{dc}, & [t_1 + \delta; t_1 + 3\delta] \\ -4V_{dc}, & [t_2 + \delta; t_2 + 3\delta] \\ 0, & [0; t_1 + \delta] \wedge [t_1 + 3\delta; t_2 + \delta] \wedge [t_2 + 3\delta; T + t_1 + \delta] \end{cases} \quad (3.2)$$

Em que, t_1 é o instante em que são colocados à condução os MOSFETs M_1, M_3 e t_2 o instante em que são colocados à condução os MOSFETs M_2, M_4 . Na Figura 3.5 pode-se ver as formas de onda teóricas do GHAT para o exemplo da Figura 3.4, em sincronismo com as tensões de comando dos interruptores M_i .

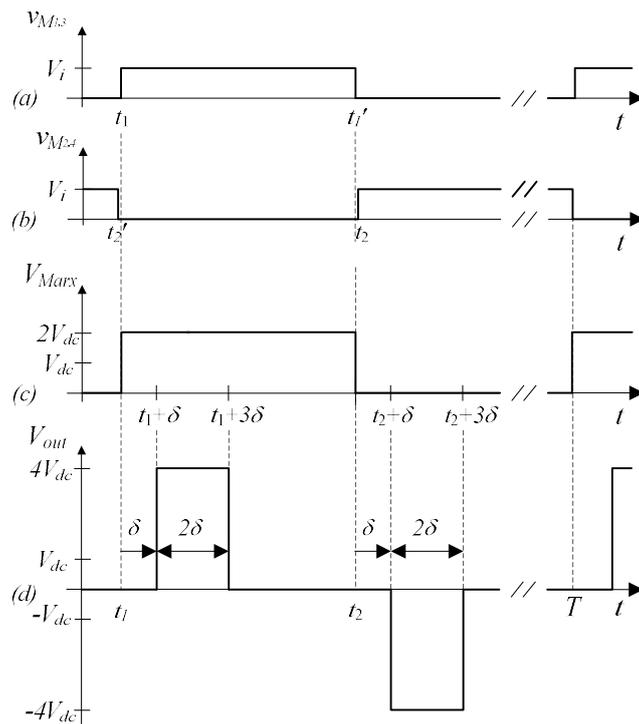


Figura 3.5 – Formas de onda teóricas do circuito GHAT da Figura 3.4, a) tensão na gate dos MOSFETs M_1, M_3 , b) tensão na gate dos MOSFETs M_2, M_4 , c) tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} , d) tensão na carga V_{out} .

No circuito simplificado da Figura 3.6, apresenta-se o gerador constituído por 3 estágios no Marx e 3 estágios no Blumlein, mantendo-se os limites de funcionamento referidos anteriormente, a fonte de alimentação V_{dc} carrega em paralelo os condensadores C_1, C_2 e C_3 através de M_2 e M_4 . Quando M_1, M_3 e M_5 são colocados à condução e M_2, M_4, M_6 ao corte, colocam em série os condensadores C_1, C_2 e C_3 , que aplicam à entrada do gerador Blumlein uma tensão com o triplo da amplitude da tensão com que cada um foi carregado, ou seja, $3V_{dc}$. Durante este período de funcionamento, e ao fim de um tempo $t_1+\delta$, surge na carga um impulso de tensão positivo de amplitude igual a $9V_{dc}$ e largura igual a 2δ , Figura 3.7. Quando M_1, M_3 e M_5 são colocados ao corte e M_2, M_4 e M_6 à condução o gerador Blumlein é descarregado. Durante este período de funcionamento, e ao fim de um tempo $t_2+\delta$, surge na carga um impulso de tensão negativo de amplitude igual a $9V_{dc}$ e largura igual a 2δ .

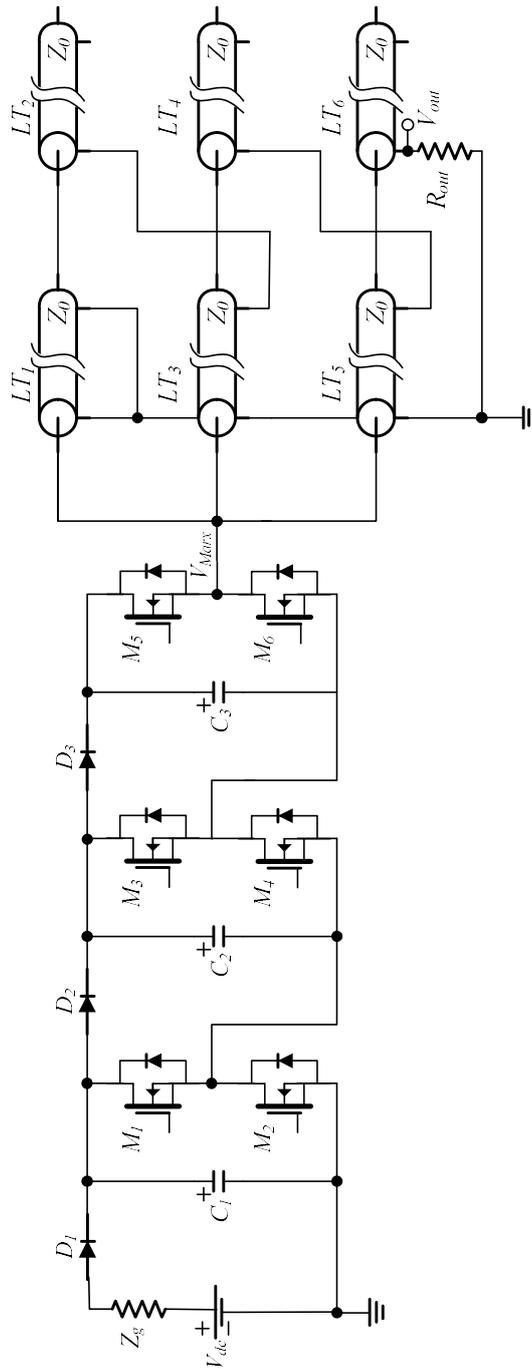


Figura 3.6 – Esquema simplificado do circuito GHAT, com 3 estágios no gerador de Marx ligado a 3 estágios no gerador Blumlein.

Assim para o circuito da Figura 3.6, tendo em conta a equação (2.11) e a equação (2.26), que traduzem a amplitude da tensão na carga V_{out} , do gerador de Marx e no gerador Blumlein respetivamente, considerando todos os componentes do circuito ideais, sem perdas nas linhas ou semicondutores, tem-se:

$$V_{Marx} = \begin{cases} 3V_{dc}, & [t_1; t_2] \\ 0, & [0; t_1] \wedge [t_2; T] \end{cases} \quad (3.1)$$

$$V_{out} = \begin{cases} 9V_{dc}, & [t_1 + \delta; t_1 + 3\delta] \\ -9V_{dc}, & [t_2 + \delta; t_2 + 3\delta] \\ 0, & [0; t_1 + \delta] \wedge [t_1 + 3\delta; t_2 + \delta] \wedge [t_2 + 3\delta; T + t_1 + \delta] \end{cases} \quad (3.2)$$

Em que, t_1 é o instante em que são colocados à condução os MOSFETs M_1 , M_3 e M_5 e t_2 o instante em que são colocados à condução os MOSFETs M_2 , M_4 e M_6 . Na Figura 3.7 pode-se ver as formas de onda teóricas do GHAT para o exemplo da Figura 3.6, em sincronismo com as tensões de comando dos interruptores M_i .

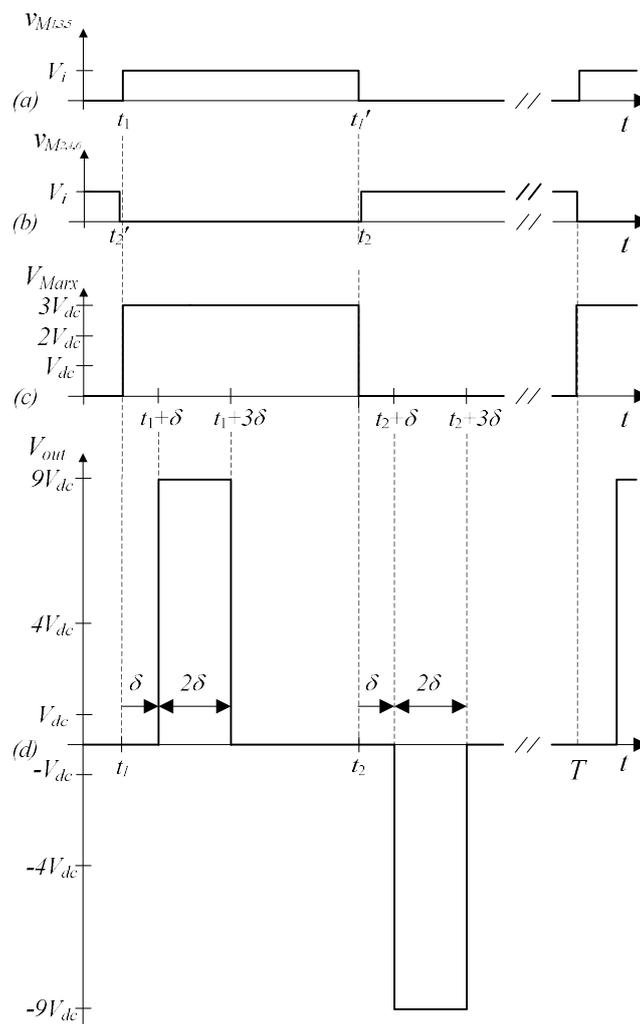


Figura 3.7 – Formas de onda teóricas do circuito GHAT da Figura 3.6, a) tensão na gate dos MOSFETs M_1 , M_3 e M_5 , b) tensão na gate dos MOSFETs M_2 , M_4 e M_6 , c) tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} , d) tensão na carga V_{out} .

No circuito simplificado da Figura 3.8, apresenta-se o gerador constituído por m estágios no Marx e n estágios no Blumlein, mantendo-se os limites de funcionamento referidos anteriormente, a fonte

de alimentação V_{dc} carrega em paralelo os condensadores C_1, C_2, \dots, C_m através dos $M_2, M_4, \dots, M_{2m-2}$. Quando os $M_1, M_3, \dots, M_{2m-1}$ são colocados à condução e os M_2, M_4, \dots, M_{2m} ao corte, colocam em série os condensadores C_1, C_2, \dots, C_m , que aplicam à entrada do gerador Blumlein uma tensão com m vezes a amplitude da tensão com que cada um foi carregado, ou seja, mV_{dc} . Durante este período de funcionamento, e ao fim de um tempo $t_1 + \delta$, surge na carga um impulso de tensão positivo de amplitude igual a mV_{dc} e largura igual a 2δ , Figura 3.9. Quando os $M_1, M_3, \dots, M_{2m-1}$ são colocados ao corte e os M_2, M_4, \dots, M_{2m} à condução o gerador Blumlein é descarregado. Durante este período de funcionamento, e ao fim de um tempo $t_2 + \delta$, surge na carga um impulso de tensão negativo de amplitude igual a mV_{dc} e largura igual a 2δ .

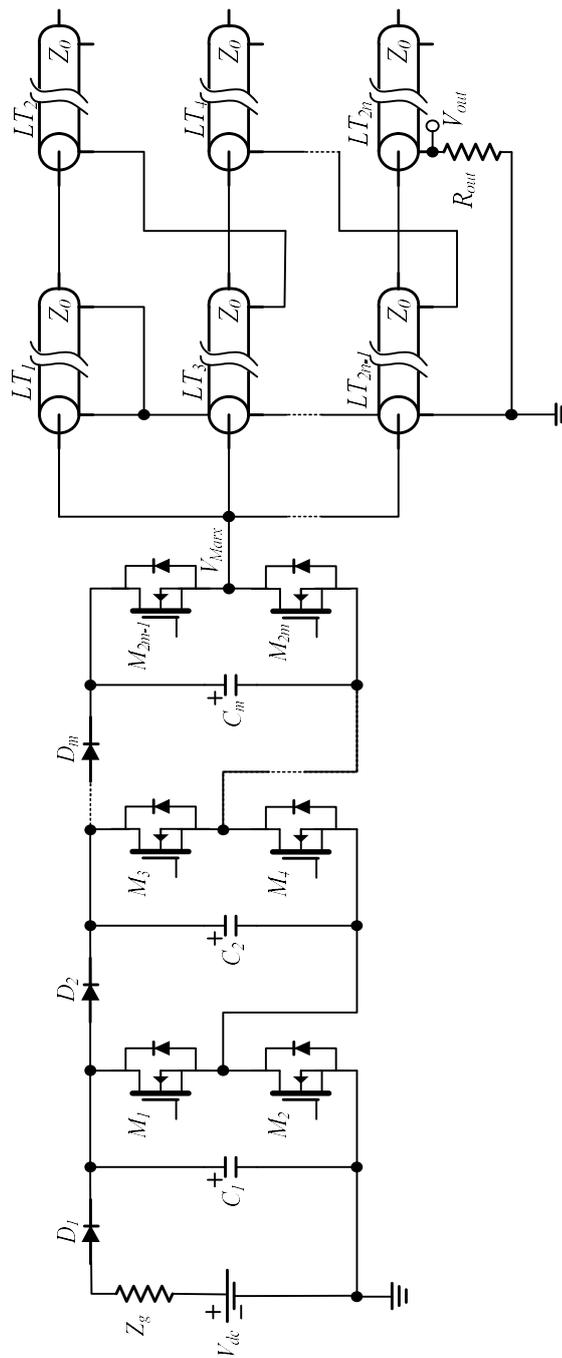


Figura 3.8 – Esquema simplificado do circuito GHAT, com m estágios no gerador de Marx ligado a n estágios no gerador Blumlein.

Assim para o circuito da Figura 3.8, tendo em conta a equação (2.11) e a equação (2.26), que traduzem a amplitude da tensão na carga V_{out} , do gerador de Marx e no gerador Blumlein respetivamente, considerando todos os componentes do circuito ideais, sem perdas nas linhas ou semicondutores, tem-se:

$$V_{Marx} = \begin{cases} mV_{dc}, & [t_1; t_2] \\ 0, & [0; t_1] \wedge [t_2; T] \end{cases} \quad (3.1)$$

$$V_{out} = \begin{cases} mnV_{dc}, & [t_1 + \delta; t_1 + 3\delta] \\ -mnV_{dc}, & [t_2 + \delta; t_2 + 3\delta] \\ 0, & [0; t_1 + \delta] \wedge [t_1 + 3\delta; t_2 + \delta] \wedge [t_2 + 3\delta; T + t_1 + \delta] \end{cases} \quad (3.2)$$

Em que, t_1 é o instante em que são colocados à condução os MOSFETs $M_1, M_3, \dots, M_{2m-1}$ e t_2 o instante em que são colocados à condução os MOSFETs M_2, M_4, \dots, M_{2m} . Na Figura 3.9 pode-se ver as formas de onda teóricas do GHAT para o exemplo da Figura 3.8, em sincronismo com as tensões de comando dos interruptores M_i .

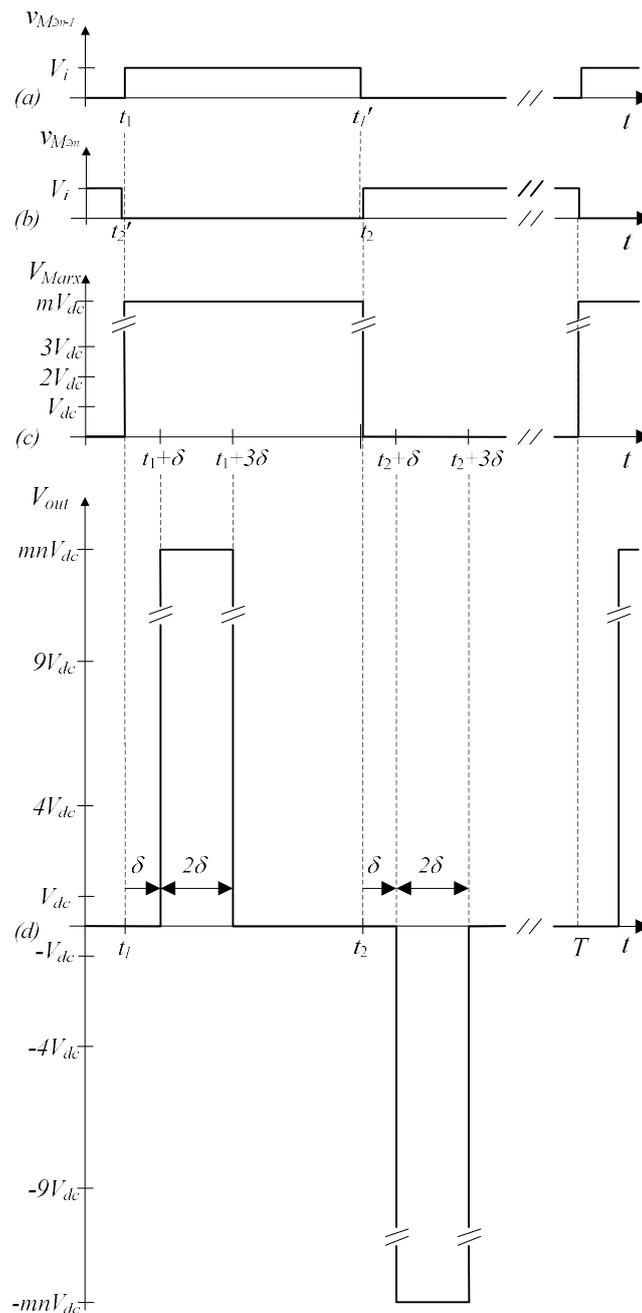


Figura 3.9 – Formas de onda teóricas do circuito GHAT da Figura 3.8, a) tensão na gate dos MOSFETs M_{2m-1} , b) tensão na gate dos MOSFETs M_{2m} , c) tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} , d) tensão na carga V_{out} .

3.2.3 Dimensionamento do gerador de Marx

O gerador de Marx selecionado para construir o GHAT, é um gerador de impulsos positivos constituído por m estágios, nesta seção é feita a descrição detalhada do seu funcionamento. Na Figura 3.10, apresenta-se o circuito de potência do gerador de Marx utilizado.

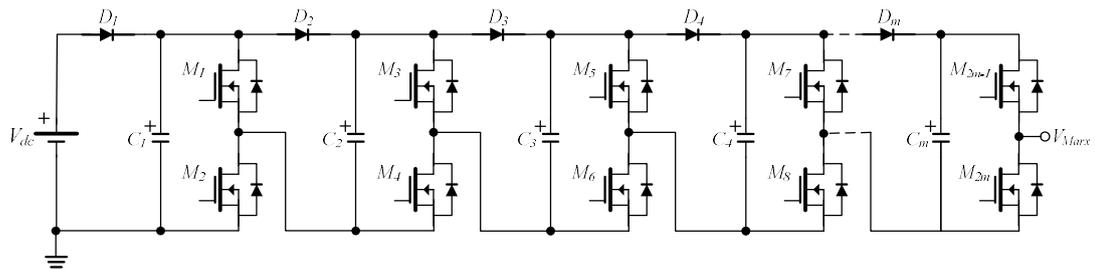


Figura 3.10 – Esquema simplificado do circuito de potência do gerador de Marx do GHAT.

Os condensadores $C_{(1, \dots, m)}$, são carregados em paralelo e descarregados em série. À carga/descarga dos condensadores do gerador de Marx correspondem dois modos de funcionamento. O esquema equivalente do circuito da Figura 3.10 durante o modo de funcionamento de carga é apresentado na Figura 3.10a), e o modo de funcionamento de descarga é apresentado na Figura 3.10b).

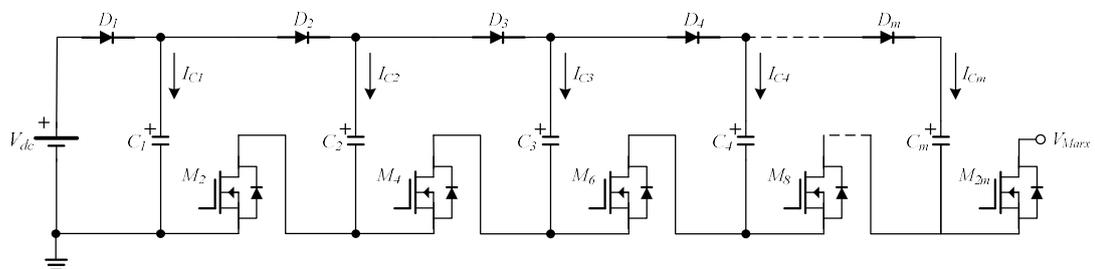


Figura 3.10a) – Modo de carga dos condensadores de potência do gerador de Marx do GHAT.

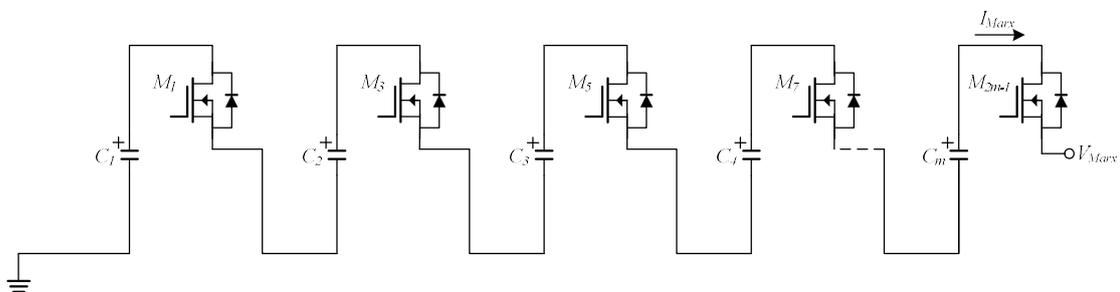


Figura 3.10b) – Modo de geração de impulsos de alta tensão do gerador de Marx do GHAT.

No circuito da Figura 3.10, verifica-se a ausência de resistências ou indutâncias na carga dos condensadores para limitar a corrente de carga, sendo que esta é limitada geralmente pelo comportamento da fonte de alimentação. Segundo Andreev et al. (2005) a impedância total do gerador é calculada pela seguinte equação:

$$Z_{Marx} = \sqrt{\frac{L_{Marx}}{C_{Marx}}} \quad (3.3)$$

Em que no modo de carga do gerador Blumlein tem-se: $C_{Marx} = C_1/m$ e $L_{Marx} = L_1 + L_2 + \dots + L_m$, sendo L_i indutâncias parasitas dos circuitos.

3.2.3.1 Dimensionamento dos semicondutores

As características que se tiveram em conta para a escolha dos semicondutores foram as tensões e correntes a que podem ficar sujeitos, respetivamente, durante o corte e a condução bem como a velocidade de passagem ao corte e à condução, e a resistência de condução.

Considerando a Figura 3.10a) e a Figura 3.10b), as tensões a que os semicondutores ficam sujeitos nos diferentes modos de funcionamento, durante a carga dos condensadores:

$$\begin{cases} V_{DS_{M2m}} \cong 0V \\ V_{AK_{Dm}} \cong 0V \\ V_{DS_{M2m-1}} \approx V_{dc} \end{cases} \quad (3.4)$$

Durante o impulso positivo do gerador de Marx:

$$\begin{cases} V_{DS_{M2m}} \approx V_{dc} \\ V_{AK_{Dm}} \approx V_{dc} \\ V_{DS_{M2m-1}} \cong 0V \end{cases} \quad (3.5)$$

Outro aspeto a ter em conta no circuito da Figura 3.10a), relaciona-se com a corrente que circula nos semicondutores de cada estágio, durante o modo de funcionamento de carga dos condensadores C_i . Devido à topologia do circuito da Figura 3.10a), durante a carga dos condensadores, a corrente que circula em cada estágio é igual à soma da corrente de carga do condensador do próprio estágio com a corrente de carga dos condensadores dos estágios subsequentes.

$$\begin{cases} I_{M2} = I_{C2} + I_{C3} + I_{C4} + I_{C5} + \dots + I_{Cm} \\ I_{M4} = I_{C3} + I_{C4} + I_{C5} + \dots + I_{Cm} \\ I_{M6} = I_{C4} + I_{C5} + \dots + I_{Cm} \\ I_{M8} = I_{C5} + \dots + I_{Cm} \\ I_{M2m} = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Este aspeto, além de conduzir a uma sobrecarga dos primeiros estágios, condiciona as características dos componentes em função da sua posição no circuito. Ainda no modo de carga dos condensadores, supondo o instante inicial de carga dos condensadores onde a tensão dos condensadores é $V_{Ci}=0V$, a corrente de carga dos condensadores inicial tem de ser limitada, podendo-se atuar na fonte de alimentação. Para isso, foi utilizada uma fonte de alimentação de carga de condensadores que tem limite de corrente à saída.

Considerando, as características dos impulsos aplicados pelo gerador de Marx à linha Blumlein, e as tensões e correntes de funcionamento, a escolha dos semicondutores recaiu por MOSFETs, iguais para os de impulso e os de carga, sendo que cada um tem que bloquear uma tensão maior que a da fonte de alimentação e suportar uma corrente maior que a de impulso, tendo em conta que a carga do gerador de Marx é do tipo capacitivo.

3.2.3.2 Falha de sincronismo no comando dos semicondutores

Conforme mencionado no ponto anterior, durante os diversos modos de funcionamento do gerador de Marx da Figura 3.10, os semicondutores em cada estágio ficam sujeitos à tensão de cada estágio, ou seja, V_{dc} . No entanto, em caso de falha de sincronismo no comando dos MOSFETs do gerador de Marx da Figura 3.10, a tensão aos terminais dos MOSFETs é V_{dc} , conforme resumido na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Consequências da falha de sincronismo de 1 dos MOSFETs durante a carga/descarga dos condensadores.

Modo de funcionamento	Falha de sincronismo do MOSFET	Funcionamento na condição de falha de sincronismo do MOSFET	Tensão aos terminais do MOSFET em falha de sincronismo	Tensão de saída durante a falha de sincronismo V_{Marx}
Carga dos condensadores	M_2	Não se efetua a carga dos condensadores C_2 a C_5	$V_{DSM_2} = V_{dc}$	$V_{Marx} \approx V_{dc}$
Impulso positivo	M_1	Díodo antiparalelo do MOSFET M_2 conduz durante a falha de sincronismo	$V_{DSM_1} = V_{dc}$	$V_{Marx} \approx (m - 1)V_{dc}$

3.2.3.3 Dimensionamento dos condensadores

Uma das características das descargas capacitivas, onde se inclui o gerador de Marx, é a queda de tensão durante o impulso, *voltage droop*, que depende da relação entre a carga armazenada nos condensadores do gerador de Marx e do gerador Blumlein (i. e. a carga). Assim, a capacidade dos condensadores C_m , pode ser dimensionada para uma dada queda de tensão ΔV em cada condensador, para uma dada queda de tensão admissível no final do impulso.

Considerando que Q_i , carga inicial igual à carga no final do impulso Q_f , nos condensadores C_m , tem-se que:

$$\begin{aligned}
 Q_i &= Q_f \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow C_{Marx} V_i &= C_{Marx} V_f + C_{Blumlein} V_f \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow V_f &= \frac{C_{Marx}}{C_{Marx} + C_{Blumlein}} V_i
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Em que V_i é a tensão nos condensadores no instante inicial do impulso, e V_f a tensão nos condensadores no final do impulso. Considerando as igualdades na equação (3.7), tem-se:

$$\begin{aligned}
 \frac{V_f}{V_i} &= \frac{\frac{C_1}{m}}{\frac{C_1}{m} + C_{Blumlein}} = \frac{C_1}{C_1 + mC_{Blumlein}} \\
 \Delta V &= V_i - V_f \\
 V_i &= mV_{dc} \\
 V_f &= mV_{dc} - \Delta V
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Considerando as igualdades anteriores e substituindo calcula-se o valor da capacidade de cada condensador do gerador de Marx:

$$\begin{aligned}
 \frac{V_f}{V_i} &= \frac{C_1}{C_1 + mC_{Blumlein}} = \frac{mV_{dc} - \Delta V}{mV_{dc}} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow mC_1 V_{dc} &= mC_1 V_{dc} - C_1 \Delta V + m^2 C_{Blumlein} V_{dc} - mC_{Blumlein} \Delta V \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow C_1 \Delta V &= m^2 C_{Blumlein} V_{dc} - mC_{Blumlein} \Delta V \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow C_1 &= \frac{mC_{Blumlein} (mV_{dc} - \Delta V)}{\Delta V}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Como exemplo, por aplicação da equação (3.9) e considerando que o gerador de Marx é constituído por $m=5$ estágios, $C_{Blumlein}=6nF$, tensão na fonte $V_{dc}=800V$ e para uma queda de tensão em cada condensador a variar entre 1% e 10%. Na Figura 3.11 observa-se o valor da capacidade de cada condensador que garante o valor mínimo da queda de tensão de saída do impulso, em percentagem.

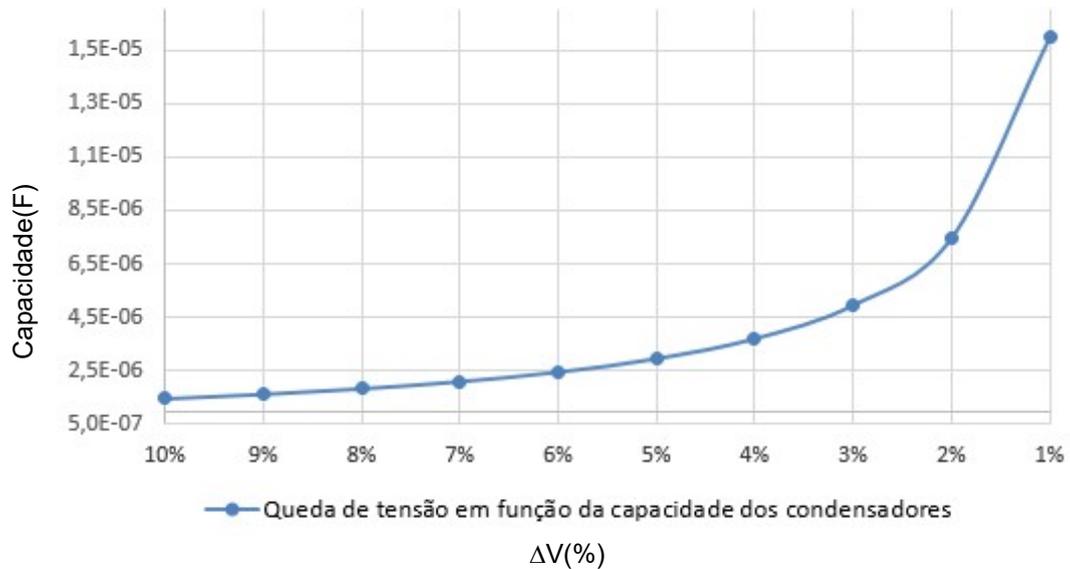


Figura 3.11 - Capacidade do condensador em cada estágio que garante o decaimento da tensão à saída do gerador de Marx.

Neste caso considerou-se que $C_{Blumlein}=6nF$, porque durante a carga do gerador Blumlein o gerador de Marx tem de carregar o gerador Blumlein com energia suficiente para gerar os impulsos positivo e negativo.

3.2.3.4 Perdas de condução e de comutação

Nos dispositivos semicondutores de potência, as perdas têm normalmente duas componentes, uma devida à condução P_{on} , outra devida à comutação P_s , [Canacsinh, 2015]. Considerando desprezáveis as perdas durante o estado de corte, as perdas totais nos dispositivos semicondutores P_d , são dadas pela equação aproximada [Silva, 1998] seguinte:

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T V_{DS}(t) I_D(t) dt \approx P_{on} + P_s \tag{3.10}$$

Onde V_{DS} e I_D correspondem à tensão aos terminais do semicondutor e à corrente de condução durante um período T .

Considerando ainda que os dispositivos semicondutores funcionam como interruptores, as perdas dependem fundamentalmente do valor da tensão bloqueada, da corrente conduzida, dos tempos de entrada à condução t_r e de entrada ao corte t_f , e do período T dos impulsos. Desta forma, durante o modo de impulso, t_{on} , e considerando uma carga capacitiva, assume-se que as formas de onda de corrente e tensão apresentam a forma quase-retangular e um patamar, onde $t_{on} \gg t_r + t_f$, conforme se mostra na Figura 3.12.

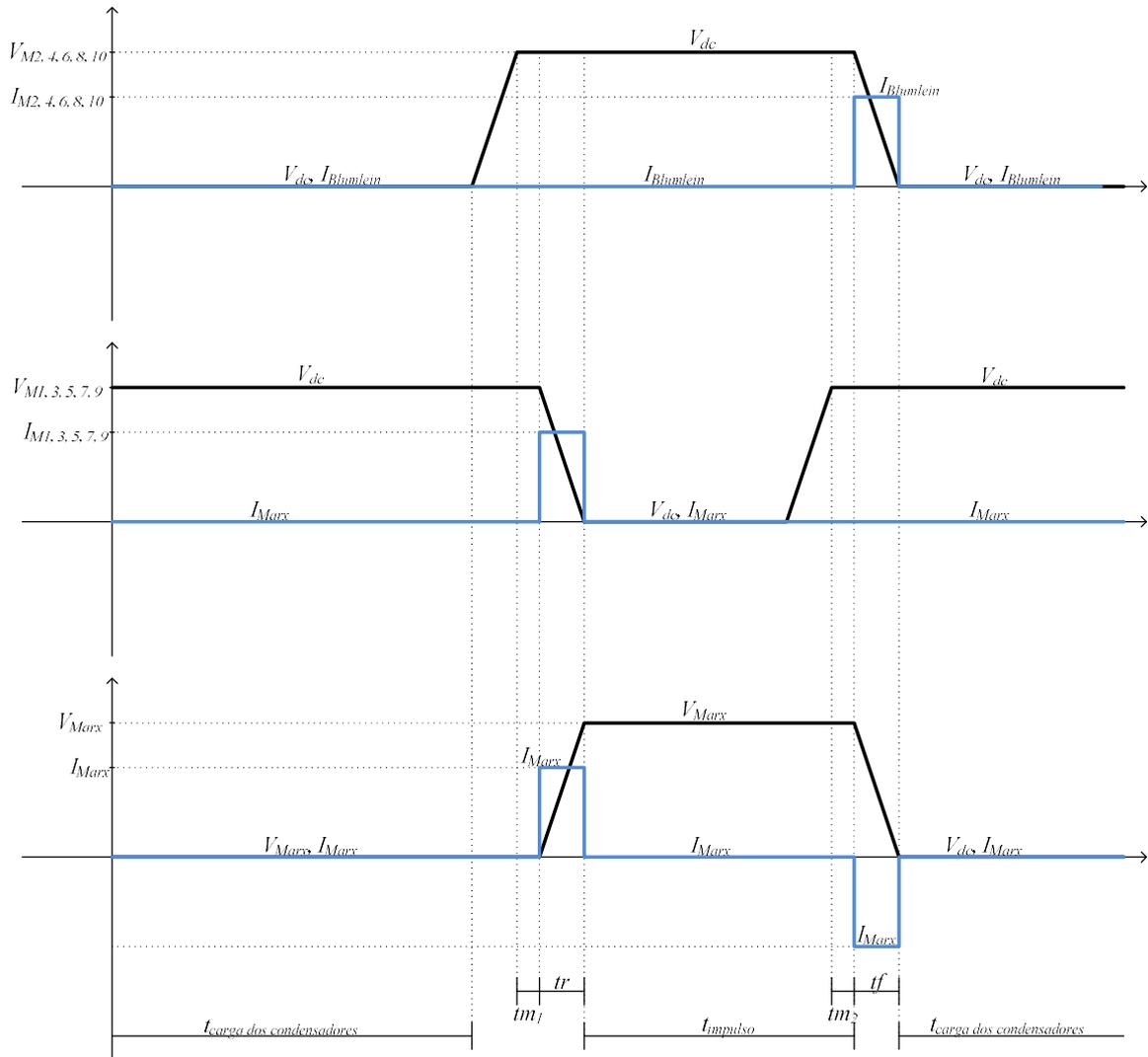


Figura 3.12 – Formas de onda de tensão e corrente num MOSFET em comutação.

No caso particular para os MOSFET a equação (3.10) aproximada, toma a forma seguinte, durante a carga e a descarga da Blumlein:

$$\text{MOSFETs } M_{2n} \quad P_{d_{MOSFET}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} \left(V_{dc} - \frac{V_{dc}}{t_f} t \right) I_{Blumlein} dt = \frac{V_{dc} I_{Blumlein} t_f}{2T} \quad (3.11)$$

$$\text{MOSFETs } M_{2n-1} \quad P_{d_{MOSFET}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_r} \left(V_{dc} - \frac{V_{dc}}{t_r} t \right) I_{Marx} dt = \frac{V_{dc} I_{Marx} t_r}{2T}$$

Nestes cálculos foram desprezadas as perdas de comutação dos díodos de potência de cada estágio e as perdas de comutação nos MOSFETs devido à carga dos condensadores porque este valor é muito menor relativamente às perdas de comutação para descarga do gerador Blumlein. O seu cálculo foi efetuado por [Canacsinh et al., 2012].

3.2.3.5 Diagrama temporal de tensões num gerador de Marx

Na Figura 3.13, apresenta-se o diagrama temporal com as formas de onda da tensão de saída, em função das tensões de comando dos MOSFETs do circuito da Figura 3.10, assim como a tensão da fonte de alimentação e dos condensadores.

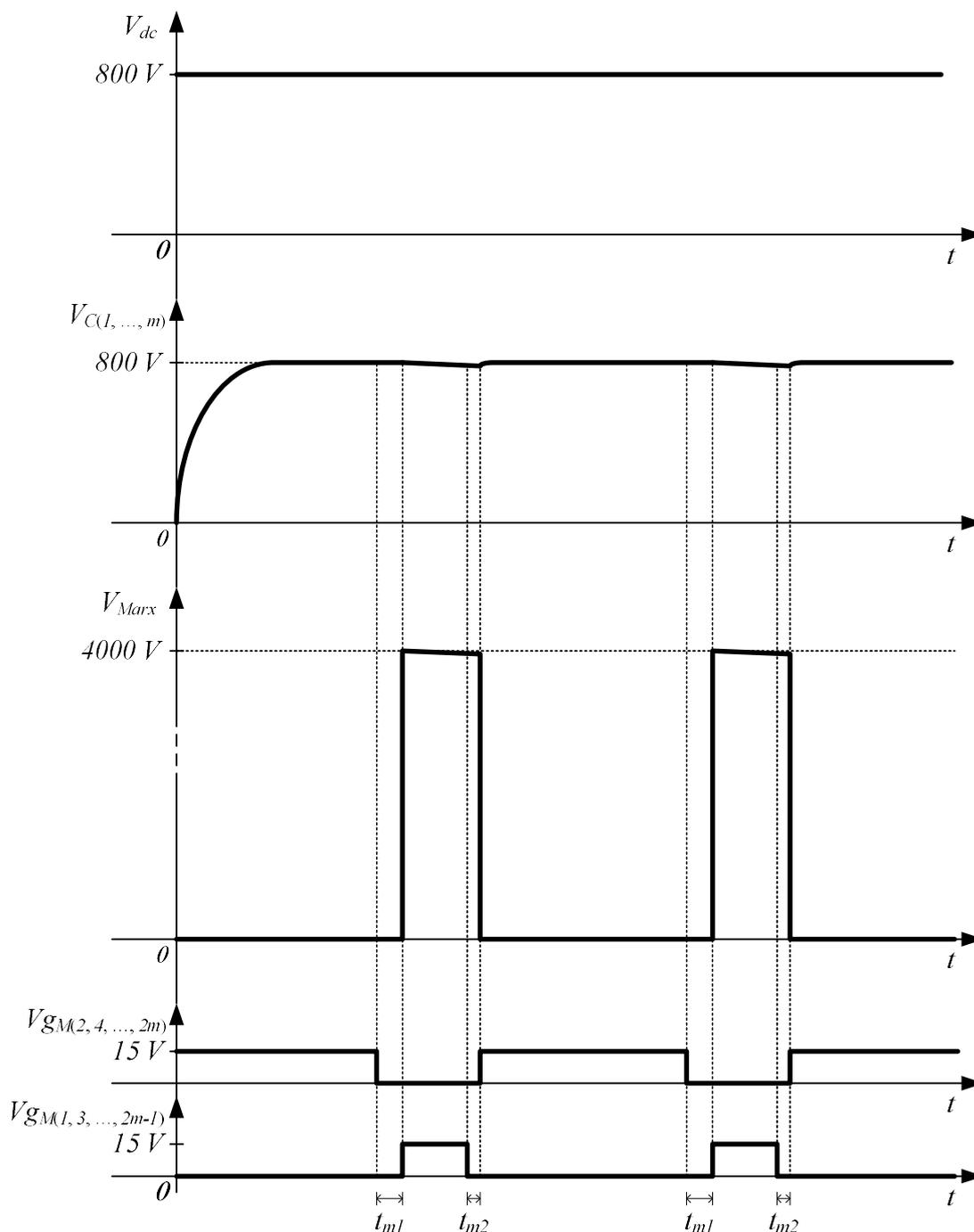


Figura 3.13 – Diagrama geral de tensões do gerador de Marx do GHAT.

Onde V_{dc} é a tensão na fonte de alimentação do circuito de potência, $V_{C(1, \dots, m)}$ tensão em cada condensador do circuito de potência, V_{Marx} tensão à saída do gerador de Marx, $V_{gM(2, 4, \dots, 2m)}$ tensão na gate dos MOSFETs de carga dos condensadores, $V_{gM(1, 3, \dots, 2m-1)}$ tensão na gate dos MOSFETs

que formam o impulso de tensão V_{Marx} , t_{m1} e t_{m2} os tempos “mortos” de operação entre cada grupo dos MOSFETs respectivamente no início e no fim do impulso.

Os tempos mortos garantem que nenhum MOSFET de carga dos condensadores é colocado à condução enquanto os MOSFETs de impulso de tensão estiverem à condução e vice-versa. Evita-se desta maneira a ocorrência de curto-circuitos indesejáveis durante o normal funcionamento do gerador.

O circuito da Figura 3.10, gerador de Marx de impulsos positivos permite que em caso de falha de um estágio, o gerador se mantenha em funcionamento com $V_{Marx}=(m-1)V_{dc}$, em vez de $V_{Marx}=mV_{dc}$ em funcionamento normal.

3.2.4 Dimensionamento do Gerador Blumlein

O gerador Blumlein utilizado neste trabalho é constituído por três estágios, Figura 3.8, cada estágio tem dois troços de cabo coaxial, enrolados em núcleos de ferrite. Cada troço de cabo coaxial foi enrolado em núcleos de ferrite para aumentar a impedância de modo secundário e reduzir as correntes de fuga na malha exterior de LT_3 e LT_5 , conforme se mostra na Figura 3.14.

Outros autores estudaram circuitos baseados na Figura 3.14, por exemplo [Rossi et al., 2002; Rossi et al., 2003a; Verma et al., 2005; Verma et al., 2004; Verma et al., 2006], mas para gerar apenas impulsos monopolares, na qual todos os estágios são carregados em paralelo e depois descarregados em série com a carga, permitindo multiplicar a amplitude da tensão pelo número de estágios do circuito, à semelhança do que sucede com o circuito gerador de Marx. Neste circuito, como no circuito da Figura 2.28, a largura do impulso está limitada ao dobro do tempo de propagação da onda de tensão de cada secção de LT que compõe cada estágio do gerador Blumlein, enquanto que a amplitude dos impulsos de tensão a aplicar à carga depende do número de estágios n , ou seja, a amplitude dos impulsos de tensão na carga R_{Load} será igual à tensão com que o gerador Blumlein é carregado a multiplicar pelo número de estágios, considerando que a carga R_{Load} , está adaptada com a impedância do gerador Blumlein:

$$V_{Load} = nV \quad (3.12)$$

No circuito da Figura 3.14, as linhas T_1 , T_3 e T_5 são consideradas as linhas ativas do gerador Blumlein porque é aí que são originadas as ondas de tensão, enquanto que as linhas T_2 , T_4 e T_6 são consideradas as linhas passivas porque reagem às ondas geradas nas linhas ativas [Rossi et al., 2003a].

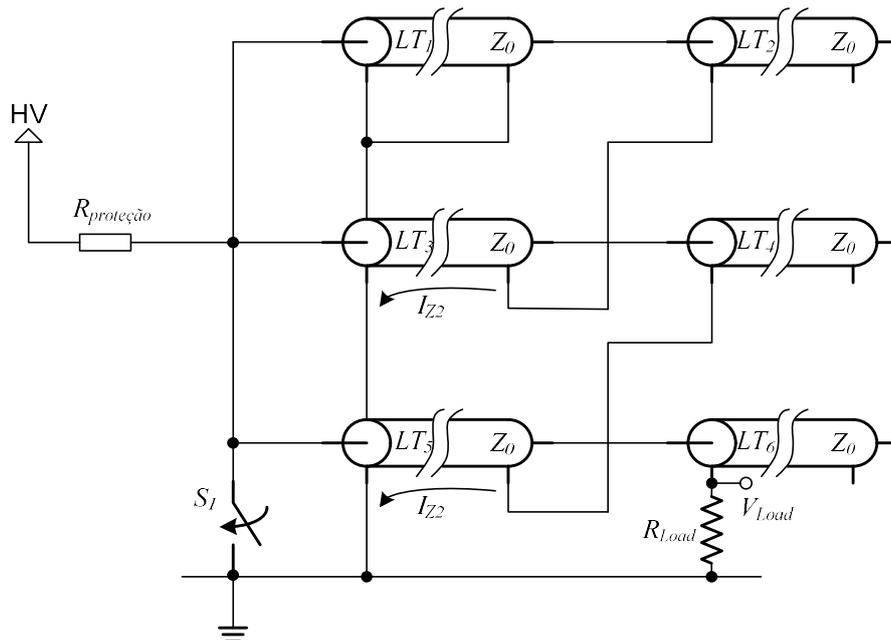


Figura 3.14 – Circuito simplificado do gerador Blumlein com 3 estágios [Verma et al., 2006].

Uma característica da configuração Blumlein é a presença de correntes de fugas I_{Z2} para a massa no condutor exterior, este problema limita o número de estágios no gerador para que não haja grandes perdas no sistema, isto é, a impedância de modo secundário ou impedância longitudinal do condutor exterior Z_2 deve ser muito maior que R_{Load} . O cálculo de Z_2 será efetuado de forma aproximada na página 91.

Para que a impedância do gerador Blumlein esteja adaptada com a carga tem-se que, $R_{Load}=2nZ_0$, de acordo com o Anexo I este valor anula todas as reflexões no circuito após o 1º impulso.

Para uma topologia com 3 estágios a eficiência é cerca de 85% [Verma et al., 2006]. Por exemplo, se $Z_0=50\Omega$, $n=3$, $R_{Load}=2nZ_0=2\times 3\times 50=300\Omega$, e $Z_2=1,5k\Omega$, tem-se que: $R_{Load}/Z_2=300/1500=0,20=20\%$, a corrente em vez de passar toda pela carga, uma pequena parte é desviada através de Z_2 para a massa.

O gerador Blumlein foi introduzido anteriormente na seção 2.3.2.2, nos pontos seguintes será feita a sua modelação para $n=\{1, 2, 3, n\}$ estágios.

3.2.4.1 Modelação do gerador Blumlein com n=1 estágios

Na Figura 3.15a) é apresentado o esquema simplificado de um gerador Blumlein com 1 estágio.

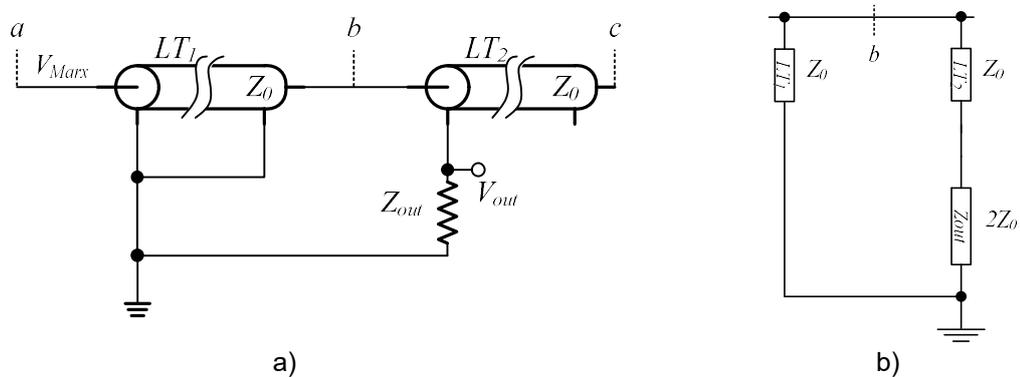


Figura 3.15 – a) Circuito de potência de um gerador Blumlein com 1 estágio. Ponto a, entrada da linha ativa; ponto b, ponto de união entre as linha ativa e a linha passiva; ponto c, saída da linha passiva. b) Circuito equivalente de impedâncias na zona b.

Na Figura 3.15b) apresenta-se o circuito equivalente do gerador no ponto b e do lado direito a série de impedâncias do gerador Blumlein por onde é transferida toda a energia armazenada para a carga.

3.2.4.1.1 Cálculo dos fatores de reflexão e de transmissão, em tensão

Quando uma LT é ligada a uma fonte de alimentação propaga-se nela uma onda de tensão com velocidade e amplitude constante. Sempre que nessa linha existe um ponto de descontinuidade origina-se nesse ponto uma onda de tensão refletida e outra transmitida. Dada a geometria de um gerador Blumlein este tema teve uma atenção especial, para que a sua análise fosse clara.

Como já foi referido anteriormente, o fator de reflexão ρ num determinado ponto de uma LT definido pela equação (2.23), representa o quociente entre a diferença da impedância vista pela onda incidente para a terra e a impedância vista pela onda refletida para a terra nesse ponto, e a soma delas. Enquanto que, o fator de transmissão Γ , referido anteriormente é definido pela equação (2.24).

Então no ponto a, da Figura 3.15, (sendo que todos os troços de linha de transmissão LT_1 e LT_2 têm a mesma impedância caraterística Z_0 e igual comprimento), para todos os estágios do gerador Blumlein considerando nula a impedância do gerador de Marx porque $R_{DS(ON)} < 1\Omega$ em cada MOSFET, ρ toma o valor dado pela equação (2.23), enquanto que, Γ toma o valor dado pela equação (2.24):

$$\rho_a = \frac{Z_r - Z_i}{Z_r + Z_i} = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1 \quad (3.13)$$

$$\Gamma_a = 1 + \rho_a = 0$$

No ponto b, para cada estágio do gerador Blumlein e atendendo às equações (2.23) e (2.24) tem-se respectivamente que ρ e Γ tomam o valor dado pelo conjunto de equações seguinte:

Para o caso da Figura 3.15 gerador Blumlein com 1 estágio:

$$\rho_b = \frac{(Z_{0LT2} + 2Z_0) - Z_{0LT1}}{(Z_{0LT2} + 2Z_0) + Z_{0LT1}} = \frac{2Z_0}{4Z_0} = \frac{1}{2} \quad (3.14)$$

$$\Gamma_b = 1 + \rho_b = 1 + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$$

No conjunto de equações (3.14), para melhor compreensão do contributo de cada impedância no cálculo do fator de reflexão em cada estágio no ponto b, foi identificada a LT a que está associada cada Z_0 .

No ponto c, da Figura 3.15, ρ e Γ tomam o valor:

$$\rho_c = \frac{Z_r - Z_i}{Z_r + Z_i} = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} = 1 \quad (3.15)$$

$$\Gamma_c = 1 + \rho_c = 2$$

Então, no ponto b, ponto onde se verifica a descontinuidade que dá origem à multiplicação da amplitude da tensão do gerador Blumlein, tem-se que o fator de reflexão é dado por, no caso de um gerador Blumlein com 1 estágio, com aplicação dos resultados obtidos no conjunto de equações (3.14):

$$\rho_1 = \rho_b = \frac{1}{2} \quad (3.16)$$

Do mesmo modo, a análise do fator de transmissão no estágio, é calculada de acordo com o divisor de tensão aplicado nesse ponto, no caso de um gerado Blumlein com 1 estágio:

$$\Gamma_1 = \frac{\Gamma_b}{3} = \frac{\frac{3}{2}}{3} = \frac{1}{2} \quad (3.17)$$

3.2.4.2 Modelação do gerador Blumlein com n=2 estágios

Na Figura 3.16a) apresenta-se o circuito simplificado de um gerador Blumlein com 2 estágios.

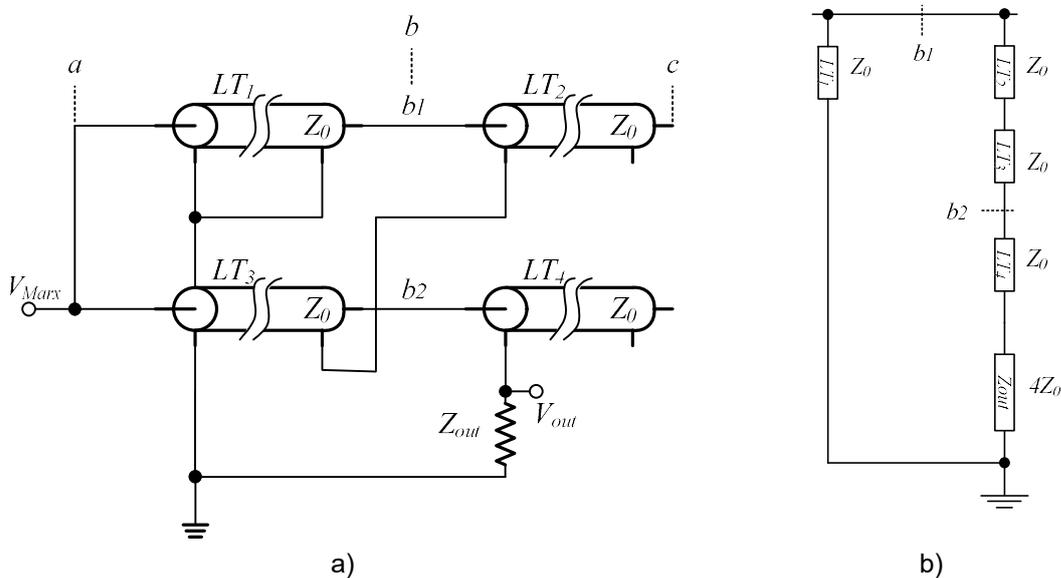


Figura 3.16 – a) Circuito de potência de um gerador Blumlein com 2 estágios. Ponto a, entrada das linhas ativas; ponto b, ponto de união entre as linhas ativas e as linhas passivas em cada estágio; ponto c, saída das linhas passivas. b) circuito equivalente de impedâncias na zona b, circuito que inclui os pontos b1 e b2.

Na Figura 3.16b) apresenta-se o circuito equivalente do gerador na zona b e do lado direito a série de impedâncias do gerador Blumlein por onde é transferida toda a energia armazenada para a carga e identificados os pontos b1 e b2 da Figura 3.16a).

3.2.4.2.1 Cálculo dos fatores de reflexão e de transmissão

Então no ponto a, da Figura 3.16, (sendo que todos os troços de linha de transmissão LT₁ a LT₄ têm a mesma impedância característica Z₀ e igual comprimento), para todos os estágios do gerador Blumlein considerando nula a impedância do gerador de Marx porque R_{DS(ON)}<1Ω em cada MOSFET, ρ toma o valor dado pela equação (2.23), enquanto que, Γ toma o valor dado pela equação (2.24):

$$\rho_a = \frac{Z_r - Z_i}{Z_r + Z_i} = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1 \quad (3.18)$$

$$\Gamma_a = 1 + \rho_a = 0$$

No ponto b, para cada estágio do gerador Blumlein e atendendo às equações (2.23) e (2.24) tem-se respetivamente que ρ e Γ tomam o valor dado pelo conjunto de equações seguinte.

Para o caso da Figura 3.16, gerador Blumlein com 2 estágios:

$$\begin{aligned}\rho_{b1} &= \frac{(Z_{0LT2} + Z_{0LT3} + Z_{0LT4} + 4Z_0) - Z_{0LT1}}{(Z_{0LT} + Z_{0LT3} + Z_{0LT} + 4Z_0) + Z_{0LT}} = \frac{6Z_0}{8Z_0} = \frac{3}{4} \\ \Gamma_{b1} &= 1 + \rho_{b1} = 1 + \frac{3}{4} = \frac{7}{4} \\ \rho_{b2} &= \frac{(Z_{0LT} + 4Z_0) - (Z_{0LT} + Z_{0LT2} + Z_{0LT})}{(Z_{0LT} + 4Z_0) + (Z_{0LT} + Z_{0LT} + Z_{0LT3})} = \frac{2Z_0}{8Z_0} = \frac{1}{4} \\ \Gamma_{b2} &= 1 + \rho_{b2} = 1 + \frac{1}{4} = \frac{5}{4}\end{aligned}\tag{3.19}$$

No ponto c, da Figura 3.16, para todos os estágios do gerador Blumlein ρ toma o valor:

$$\rho_c = \frac{Z_r - Z_i}{Z_r + Z_i} = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} = 1\tag{3.20}$$

$$\Gamma_c = 1 + \rho_c = 2$$

3.2.4.2.2 Influência dos estágios

A influência das ondas de tensão refletidas e transmitidas num gerador Blumlein, tendo em conta os fatores de reflexão e transmissão calculados no ponto 3.2.4.2.1 tem por base a lei da sobreposio da análise de circuitos de energia elétrica.

Como referido por Mendes et al. (2012b), no ponto a e no ponto c da Figura 3.16, devido à topologia do gerador Blumlein as ondas de tensão refletidas e/ou transmitidas nestes pontos não exercem qualquer influência nos estágios vizinhos.

No ponto a, tem-se uma situao de curto-circuito porque quer na carga (Figura 3.10b), ou na descarga (Figura 3.10a), do gerador Blumlein, a impedância do gerador de Marx Z_{Marx} ,  desprezvel porque $Z_{Marx} \ll Z_0$, logo o seu valor pode ser considerado nulo.

No ponto c tem-se uma situao de circuito aberto, razão pela qual neste ponto todos os estágios são independentes.

Então, nos pontos b_1 e b_2 , ponto onde se verifica a descontinuidade que d origem  multiplicao da amplitude da tensão do gerador Blumlein, tem-se que o fator de reflexão em cada estágio é dado por, no caso de um gerador Blumlein com 2 estágios, com aplicao dos resultados obtidos no conjunto de equaço (3.19):

$$\rho_1 = \rho_{b1} - \rho_{b2} = \frac{3}{4} - \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$$

$$\rho_2 = \rho_{b2} + \frac{\Gamma_{b1}}{7} = \frac{1}{4} + \frac{\frac{7}{4}}{7} = \frac{1}{2}$$
(3.21)

Devido à configuração do circuito as ondas de tensão refletidas e transmitidas resultam do contributo independente das ondas de tensão refletidas e/ou transmitidas em cada ponto que tiverem o mesmo sentido de propagação. No caso do conjunto de equações (3.21), ρ_1 a onda refletida resulta da onda refletida no ponto b_1 menos a soma da onda de tensão refletida em b_2 porque esta onda de tensão tem polaridade inversa em LT_2 em relação à onda refletida em b_1 . Em ρ_2 a onda refletida resulta da onda refletida no ponto b_2 mais a contribuição da onda transmitida em b_1 .

Do mesmo modo, a análise do fator de transmissão em cada estágio após o contributo dos outros estágios, é feita de forma análoga à interpretação feita para o fator de reflexão e dado por, no caso de um gerador Blumlein com 2 estágios:

$$\Gamma_1 = \frac{\Gamma_{b1}}{7} - (-\rho_{b2}) = \frac{\frac{7}{4}}{7} - \left(-\frac{1}{4}\right) = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

$$\Gamma_2 = \frac{\Gamma_{b2}}{5} + \frac{\Gamma_{b1}}{7} = \frac{\frac{5}{4}}{5} + \frac{\frac{7}{4}}{7} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$
(3.22)

Do cálculo dos fatores de transmissão conclui-se que para este caso a equação (2.24) não é válida devido à contribuição dos outros estágios tornando $\Gamma_{b1} \neq 1 + \rho_{b1} \Rightarrow 1/2 \neq 3/2$.

3.2.4.3 Modelação do gerador Blumlein com n=3 estágios

Na Figura 3.17 apresenta-se o circuito do gerador Blumlein utilizado.

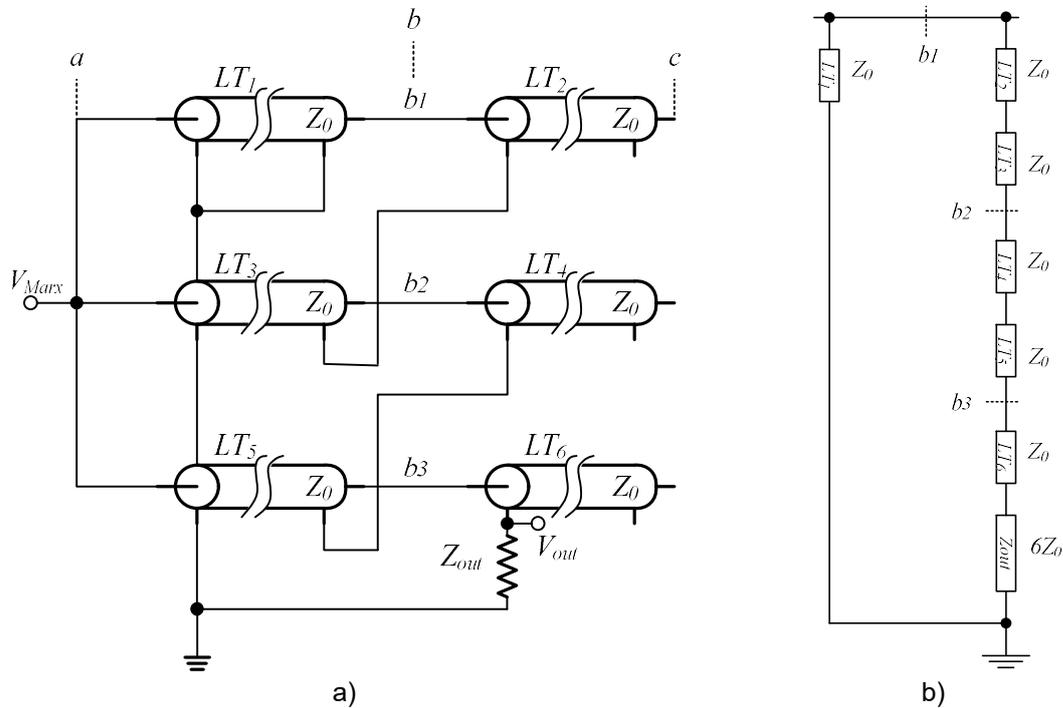


Figura 3.17 – a) Circuito de potência do gerador Blumlein do GHAT. Ponto a, entrada das linhas ativas; ponto b, ponto de união entre as linhas ativas e as linhas passivas em cada estágio; ponto c, saída das linhas passivas. b) circuito equivalente de impedâncias na zona b, circuito que inclui os pontos b_1 , b_2 e b_3 .

Na Figura 3.17b) apresenta-se o circuito equivalente do gerador na zona b e do lado direito a série de impedâncias do gerador Blumlein por onde é transferida toda a energia armazenada para a carga e identificados os pontos b_1 , b_2 e b_3 da Figura 3.17a).

3.2.4.3.1 Cálculo dos fatores de reflexão e de transmissão

No ponto a, da Figura 3.17, (sendo que todos os troços de linha de transmissão LT_1 a LT_6 têm a mesma impedância característica Z_0 e igual comprimento), para todos os estágios do gerador Blumlein considerando nula a impedância do gerador de Marx porque $R_{DS(ON)} < 1\Omega$ em cada MOSFET, ρ toma o valor dado pela equação (2.23), enquanto que, Γ toma o valor dado pela equação (2.24):

$$\rho_a = \frac{Z_r - Z_i}{Z_r + Z_i} = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1 \quad (3.23)$$

$$\Gamma_a = 1 + \rho_a = 0$$

No ponto b, para cada estágio do gerador Blumlein e atendendo às equações (2.23) e (2.24) tem-se respetivamente que ρ e Γ tomam o valor dado pelo conjunto de equações seguinte.

Para o caso da Figura 3.17 gerador Blumlein com 3 estágios:

$$\begin{aligned}
 \rho_{b1} &= \frac{(Z_{0LT2} + Z_{0LT3} + Z_{0LT4} + Z_{0LT5} + Z_{0LT6} + 6Z_0) - Z_{0LT1}}{(Z_{0LT} + Z_{0LT} + Z_{0LT} + Z_{0LT5} + Z_{0LT} + 6Z_0) + Z_{0LT}} = \frac{10Z_0}{12Z_0} = \frac{5}{6} \\
 \Gamma_{b1} &= 1 + \rho_{b1} = 1 + \frac{5}{6} = \frac{11}{6} \\
 \rho_{b2} &= \frac{(Z_{0LT} + Z_{0LT} + Z_{0LT} + 6Z_0) - (Z_{0LT} + Z_{0LT2} + Z_{0LT})}{(Z_{0LT} + Z_{0LT} + Z_{0LT} + 6Z_0) + (Z_{0LT} + Z_{0LT2} + Z_{0LT})} = \frac{6Z_0}{12Z_0} = \frac{3}{6} \\
 \Gamma_{b2} &= 1 + \rho_{b2} = 1 + \frac{3}{6} = \frac{9}{6} \\
 \rho_{b3} &= \frac{(Z_{0LT} + 6Z_0) - (Z_{0LT1} + Z_{0LT} + Z_{0LT} + Z_{0LT4} + Z_{0LT})}{(Z_{0LT6} + 6Z_0) + (Z_{0LT} + Z_{0LT} + Z_{0LT3} + Z_{0LT} + Z_{0LT})} = \frac{2Z_0}{12Z_0} = \frac{1}{6} \\
 \Gamma_{b3} &= 1 + \rho_{b3} = 1 + \frac{1}{6} = \frac{7}{6}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Em ρ_{b1} para o caso do gerador Blumlein com 3 estágios a impedância vista pela onda incidente para a terra é igual $11Z_0$, enquanto que a impedância vista pela onda refletida para a terra é igual a Z_0 . Em ρ_{b2} a impedância vista pela onda incidente para a terra é igual $9Z_0$, enquanto que a impedância vista pela onda refletida para a terra é igual a $3Z_0$. Em ρ_{b3} a impedância vista pela onda incidente para a terra é igual $7Z_0$, enquanto que a impedância vista pela onda refletida para a terra é igual a $5Z_0$. Em ambos os cálculos $6Z_0$ é o valor da carga do gerador Blumlein.

No ponto c, da Figura 3.17, para todos os estágios do gerador Blumlein ρ e Γ toma o valor:

$$\rho_c = \frac{Z_r - Z_i}{Z_r + Z_i} = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} = 1 \tag{3.25}$$

$$\Gamma_c = 1 + \rho_c = 2$$

3.2.4.3.2 Influência dos estágios

A influência das ondas de tensão refletidas e transmitidas num gerador Blumlein, tendo em conta os fatores de reflexão e transmissão calculados no ponto 3.2.4.3.1 tem por base a lei da sobreposição da análise de circuitos de energia elétrica.

Como referido por Mendes et al. (2012b), no ponto a e no ponto c da Figura 3.17, devido à topologia do gerador Blumlein as ondas de tensão refletidas e/ou transmitidas nestes pontos não exercem qualquer influência nos estágios vizinhos.

No ponto a, tem-se uma situação de curto-circuito porque quer na carga Figura 3.10b), ou na descarga Figura 3.10a), do gerador Blumlein, a impedância do gerador de Marx Z_{Marx} , é desprezável porque $Z_{\text{Marx}} \ll Z_0$, logo o seu valor pode ser considerado nulo.

No ponto c tem-se uma situação de circuito aberto, razão pela qual neste ponto todos os estágios são independentes.

Então, nos pontos b_1 , b_2 e b_3 , ponto onde se verifica a descontinuidade que dá origem à multiplicação da amplitude da tensão do gerador Blumlein, tem-se que o fator de reflexão em cada estágio é dado por, no caso de um gerador Blumlein com 3 estágios, com aplicação dos resultados obtidos no conjunto de equações (3.24):

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \rho_{b1} - \rho_{b2} + \rho_{b3} = \frac{5}{6} - \left(\frac{3}{6} - \frac{1}{6}\right) = \frac{3}{6} = \frac{1}{2} \\ \rho_2 &= \rho_{b2} + \frac{\Gamma_{b1}}{11} - \rho_{b3} = \frac{3}{6} + \frac{\frac{11}{6}}{11} - \frac{1}{6} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2} \\ \rho_3 &= \rho_{b3} + \frac{\Gamma_{b1}}{11} + \frac{\Gamma_{b2}}{9} = \frac{1}{6} + \frac{\frac{11}{6}}{11} + \frac{\frac{9}{6}}{9} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}\end{aligned}\tag{3.26}$$

Devido à configuração do circuito as ondas de tensão refletidas e transmitidas resultam do contributo independente das ondas de tensão refletidas e/ou transmitidas em cada ponto que tiverem o mesmo sentido de propagação. No caso do conjunto de equações (3.26), ρ_1 a onda refletida resulta da onda refletida no ponto b_1 menos a soma da onda de tensão refletida em b_2 menos a contribuição da onda refletida em b_3 . Em ρ_2 a onda refletida resulta da onda refletida no ponto b_2 menos a onda de tensão refletida em b_3 mais a contribuição da onda transmitida em b_1 . Em ρ_3 a onda refletida resulta da onda refletida no ponto b_3 mais a contribuição da onda transmitida em b_1 mais a contribuição da onda transmitida em b_2 .

Do mesmo modo, a análise do fator de transmissão em cada estágio após o contributo dos outros estágios, é feita de forma análoga à interpretação feita para o fator de reflexão e dado por, no caso de um gerador Blumlein com 3 estágios:

$$\begin{aligned}\Gamma_1 &= \frac{\Gamma_{b1}}{11} - (-\rho_{b2} + \rho_{b3}) = \frac{\frac{11}{6}}{11} - \left(-\frac{3}{6} + \frac{1}{6}\right) = \frac{3}{6} = \frac{1}{2} \\ \Gamma_2 &= \frac{\Gamma_{b2}}{9} + \frac{\Gamma_{b1}}{11} - (-\rho_{b3}) = \frac{\frac{9}{6}}{9} + \frac{\frac{11}{6}}{11} - \left(-\frac{1}{6}\right) = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}\end{aligned}\tag{3.27}$$

$$\Gamma_3 = \frac{\Gamma_{b3}}{7} + \frac{\Gamma_{b1}}{11} + \frac{\Gamma_{b2}}{9} = \frac{7}{7} + \frac{11}{11} + \frac{9}{9} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}$$

Do cálculo dos fatores de transmissão conclui-se que para este caso a equação (2.24) não é válida devido à contribuição dos outros estágios tornando $\Gamma_{b1} \neq 1 + \rho_{b1} \Rightarrow 1/2 \neq 3/2$.

No caso de um gerador Blumlein com carga adaptada todos os coeficientes de transmissão e reflexão nos pontos b_1 , b_2 e b_3 são iguais a $1/2$, devido à contribuição dos outros estágios e à simetria que caracteriza o sistema, independentemente do número de estágios que compõem o gerador.

3.2.4.4 Modelação do gerador Blumlein com n estágios

Na Figura 3.18 apresenta-se o circuito do gerador Blumlein utilizado.

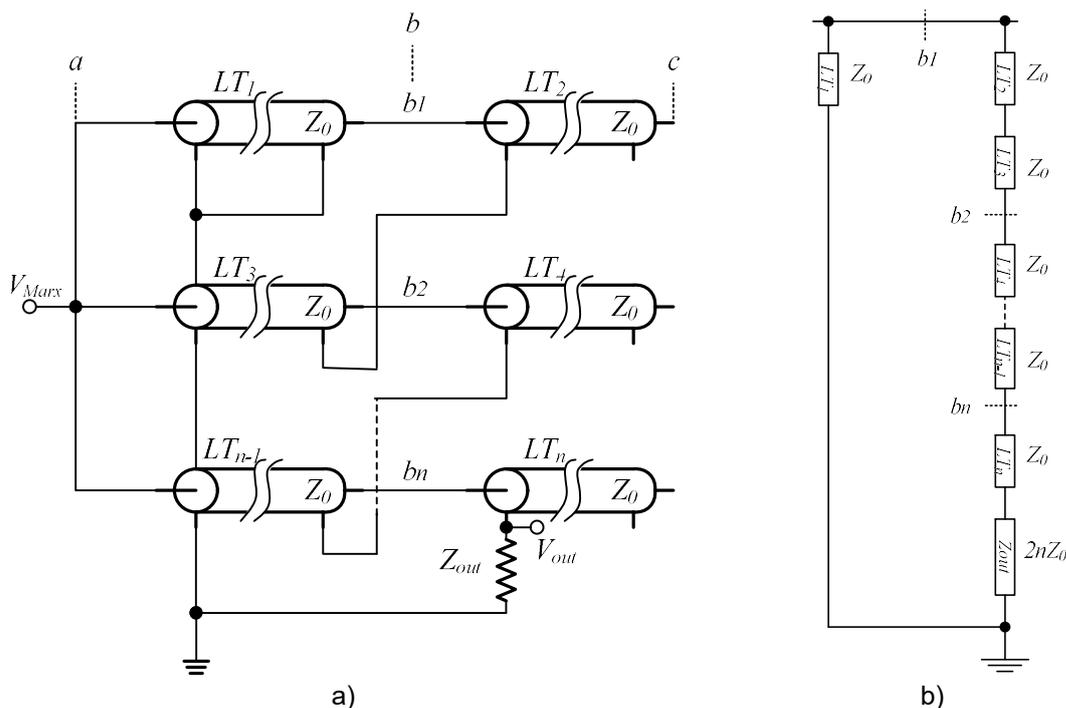


Figura 3.18 – a) Circuito de potência do gerador Blumlein do GHAT. Ponto a, entrada das linhas ativas; ponto b, ponto de união entre as linhas ativas e as linhas passivas em cada estágio; ponto c, saída das linhas passivas. b) circuito equivalente de impedâncias na zona b, circuito que inclui os pontos b_1 , b_2 até b_n .

Na Figura 3.18b) apresenta-se o circuito equivalente do gerador na zona b e do lado direito a série de impedâncias do gerador Blumlein por onde é transferida toda a energia armazenada para a carga e identificados os pontos b_1 , b_2 até b_n da Figura 3.18a).

3.2.4.4.1 Cálculo dos fatores de reflexão e de transmissão

O cálculo dos fatores reflexão e transmissão calculados anteriormente num gerador Blumlein, para o caso, 3 estágios e carga adaptada, é um processo trabalhoso. Para tornar este processo mais simples, desenvolveu-se uma fórmula de cálculo para os fatores de reflexão e transmissão para n estágios, no ponto b_1 , b_2 até b_n da Figura 3.18, [Mendes et al., 2012a], válida para todas as situações de carga, Z_{out} .

$$\rho_{n,x}^k = \frac{[k + 2 - (n - 1)k_{(n=1)}]n - 2(2x - 1)}{2n + k}$$

$$\Gamma_{n,x}^k = 1 + \rho_{n,x}^k = \frac{4n + k(n + 1) - (n - 1)nk_{(n=1)} - 2(2x - 1)}{2n + k} \quad (3.28)$$

Em que x , é o número do estágio e k , o fator de impedância de carga. Considerando Z_{out} :

$$Z_{out} = kZ_0 \quad (3.29)$$

Onde:

$$k = 2n\alpha \quad (3.30)$$

Na equação (3.28), $k_{(n=1)}$, representa o valor do fator de impedância de carga quando $n=1$, por aplicação da equação (3.30).

Na equação (3.30), α , representa a razão entre o valor Z_{out} , e o seu valor caso esta estivesse adaptada:

$$\alpha = \frac{Z_{out}}{Z_{out\text{ Adaptada}}} \quad (3.31)$$

O cálculo destes fatores individualmente é importante para se analisar a sua influência em cada estágio do gerador Blumlein, ponto 3.2.4.4, e desta forma caracterizar a forma de onda de tensão que surge na carga em cada impulso de tensão. A equação (3.28) permite depois de caracterizado o gerador Blumlein o cálculo de todos estes fatores de forma rápida e simples, quer o gerador esteja ligado a uma carga adaptada ou não, ver exemplo de aplicação na secção 3.2.4.8.

Para o desenvolvimento destas equações foi utilizado o método da indução, em que primeiro foram calculados estes fatores de reflexão e transmissão em cada estágio independentemente para $n=\{1, 2, 3, 4, 5\}$, depois foram consideradas as formas de evolução dos valores de cada estágio, foi feita uma tabela comparativa desses valores e depois em função das características do gerador, tais como, número de estágios n , factor de impedância de carga k e a razão entre o valor de Z_{out} e o

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{x,i}^n = \sum_{i=1}^x \frac{2\Gamma_{n,i}^k}{4n + k(n+1) - (n-1)nk_{(n=1)} - 2(2i-1)} - \sum_{i=x+1}^n (-1)^{i+1} \rho_{n,i}^k, \text{ se } x \text{ é ímpar} \\ \Gamma_{x,i}^n = \sum_{i=1}^x \frac{2\Gamma_{n,i}^k}{4n + k(n+1) - (n-1)nk_{(n=1)} - 2(2i-1)} + \sum_{i=x+1}^n (-1)^{i+1} \rho_{n,i}^k, \text{ se } x \text{ é par} \end{array} \right. \quad (3.33)$$

Para dedução dos conjuntos de equações (3.32) e (3.33) foram calculados os fatores de reflexão e transmissão em função do número de estágios n , do fator de impedância de carga k , e do fator de impedância de carga quando $k_{(n=1)}$. Depois de calculados os fatores de reflexão e transmissão individuais, por aplicação do conjunto de equações (3.28), substituem-se esses valores nos conjuntos de equações (3.32) e (3.33) obtendo-se os fatores de reflexão e transmissão em cada estágio considerando a influência de todos os estágios que constituem o gerador Blumlein, para qualquer fator de carga k e qualquer que seja o $n.$ º de estágios n .

O conjunto de equações (3.32) e (3.33) é semelhante do conjunto de equações (3.28) foi desenvolvido pelo mesmo método e publicado e validado pela mesma revista científica.

Desta forma pode-se concluir que com recurso à equação (3.28), e depois às equações (3.32) e (3.33), o comportamento das ondas de tensão num gerador Blumlein está totalmente caracterizado, ver exemplos de aplicação na secção 3.2.4.8.

3.2.4.5 Cálculo da impedância da carga e da impedância de modo secundário

Para que a transferência de energia do gerador Blumlein para a carga seja máxima, a impedância da carga deve estar adaptada com a impedância do gerador Blumlein. Para que no circuito da Figura 3.15, Figura 3.16, Figura 3.17 e na Figura 3.18, a carga esteja adaptada, a sua impedância terá de ser igual à soma das impedâncias do gerador que fazem parte da malha fechada que inclui os pontos assinalados na zona b , no caso da Figura 3.18 inclui os pontos b_1, b_2 até b_n . O valor da carga adaptada depende do número de estágios do gerador Blumlein e da impedância característica dos cabos coaxiais que o constituem, e de acordo com o Anexo I como já foi definido anteriormente este valor anula todas as reflexões de ondas de tensão após o 1º impulso de tensão e é definida pela equação (3.34):

$$Z_{out} = 2nZ_0 \quad (3.34)$$

Em que n representa o número de estágios do gerador Blumlein.

Outro fator que afeta o rendimento de um gerador Blumlein é a existência de correntes de fuga I_{Z2} na malha exterior dos troços dos cabos coaxiais. Estas correntes de fuga refletem-se na designada impedância de modo secundário Z_2 , que se define como impedância longitudinal do condutor exterior dos cabos coaxiais, tem a sua influência na forma e amplitude do impulso de tensão a entregar à carga [Rossi et al., 2006], quanto maior for o seu valor, menores são as correntes de fuga I_{Z2} , que chegam ao plano de massa através da malha exterior dos cabos coaxiais sem passar pela carga, o seu efeito sente-se particularmente nos troços assinalados na Figura 3.19, porque toda a energia que for consumida nesses troços não será consumida pela carga.

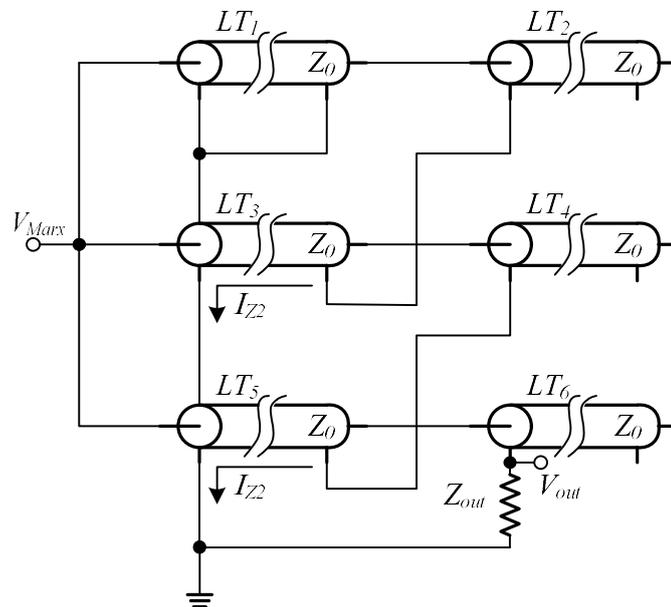


Figura 3.19 – Troços de linhas de transmissão onde se verifica o efeito das correntes de fuga I_{Z2} .

O valor da impedância de modo secundário com os cabos coaxiais enrolados em núcleos define-se pela equação (3.35) [Rivaletto et al., 1998; Rossi et al., 2003a]:

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.35)$$

Onde, L é a indutância do enrolamento em torno do núcleo e C a capacidade equivalente do enrolamento em relação ao plano de massa. Na Figura 3.20, apresenta-se a imagem do corte transversal de um toroide de secção retangular onde os troços de linhas coaxiais foram enrolados de forma a obter um gerador Blumlein com menores perdas, ou seja, para se obter $Z_2 \gg Z_{out}$.

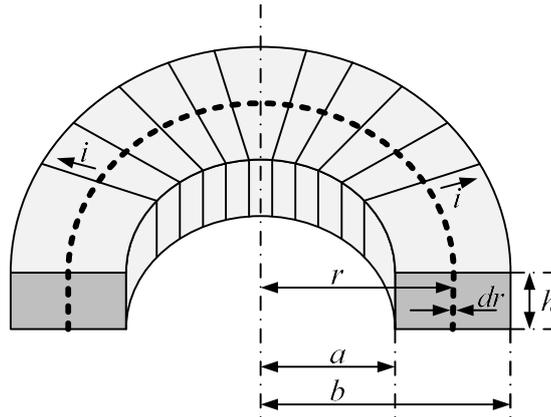


Figura 3.20 – Corte transversal de um toroide retangular.

A indutância apresentada pelo condutor exterior do cabo coaxial enrolado à volta do núcleo magnético, pela definição de indutância [Halliday et al., 1996], é dada pela seguinte equação:

$$L = \frac{N\phi}{i} \quad (3.36)$$

Onde N é o número de espiras do enrolamento, ϕ é o fluxo magnético e i é a corrente que percorre o enrolamento.

No caso de um troço coaxial enrolado num toroide com N espiras e raio médio r, o campo magnético gerado pela corrente i que percorre o enrolamento, por aplicação da Lei de Ampère, é dado pela equação (3.37) [Halliday et al., 1996]:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0\mu_r i \Leftrightarrow B2\pi r = \mu_0\mu_r iN \Leftrightarrow B = \frac{\mu_0\mu_r iN}{2\pi r} \quad (3.37)$$

Onde, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e μ_r a permeabilidade magnética da ferrite. O fluxo magnético ϕ , é calculado por integração do campo de indução magnética B, através da secção reta do toroide, equação (3.38):

$$\begin{aligned} \phi &= \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_a^b B(hdr) \\ &= \int_a^b \frac{\mu_0\mu_r iN}{2\pi r} hdr = \frac{\mu_0\mu_r iNh}{2\pi} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0\mu_r iNh}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Substituindo o resultado da equação (3.38) na equação (3.36), tem-se a indutância do toroide:

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{\mu_0\mu_r N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.39)$$

A capacidade equivalente de um condensador de placas paralelas é dada pela equação seguinte [Halliday et al., 1996]:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (3.40)$$

Em que, ε representa a permissividade do meio, A a área das superfícies de contacto que formam as placas do condensador e d a distância que as separa. Para este caso, em que se tem um condutor enrolado em torno de um toroide em cima de um plano de massa, a capacidade equivalente entre o condutor exterior e o plano de massa foi aproximada pela equação de um condensador cilíndrico, formado por um condutor sobre um plano de massa [Halliday et al., 1996], conforme a Figura 3.21:

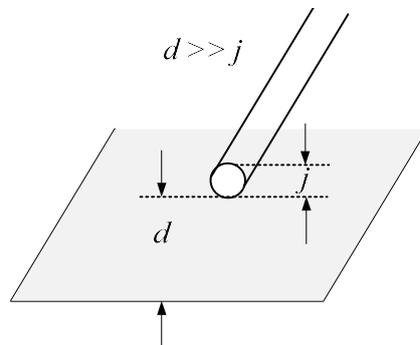


Figura 3.21 – Condensador equivalente para cálculo de Z_2 num gerador Blumlein.

A equação que traduz a capacidade equivalente de acordo com a Figura 3.21, é a seguinte:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\left(\frac{4d}{j}\right)} \quad (3.41)$$

Em que d é a distância que separa o condutor exterior do cabo coaxial do plano de massa, j o diâmetro do condutor e l o comprimento do condutor. Da equação (3.35), tem-se:

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\frac{\mu_0\mu_r i N h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)}{\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\left(\frac{4d}{j}\right)}}} = \frac{N}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r h}{\varepsilon_0\varepsilon_r l} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \ln\left(\frac{4d}{j}\right)} \quad (3.42)$$

No gráfico da Figura 3.22 mostra-se a evolução de Z_2 em função da distância d ao plano de massa. Considerando $N=20$, $\mu_r=2300$ sendo a permeabilidade magnética do núcleo, $\varepsilon_r=10$, $h=48\text{mm}$, $l=5\text{m}$, $a=33\text{mm}$, $b=50\text{mm}$ e $j=7\text{mm}$ (μ_r e ε_r dados do fabricante, Ferroxcube).

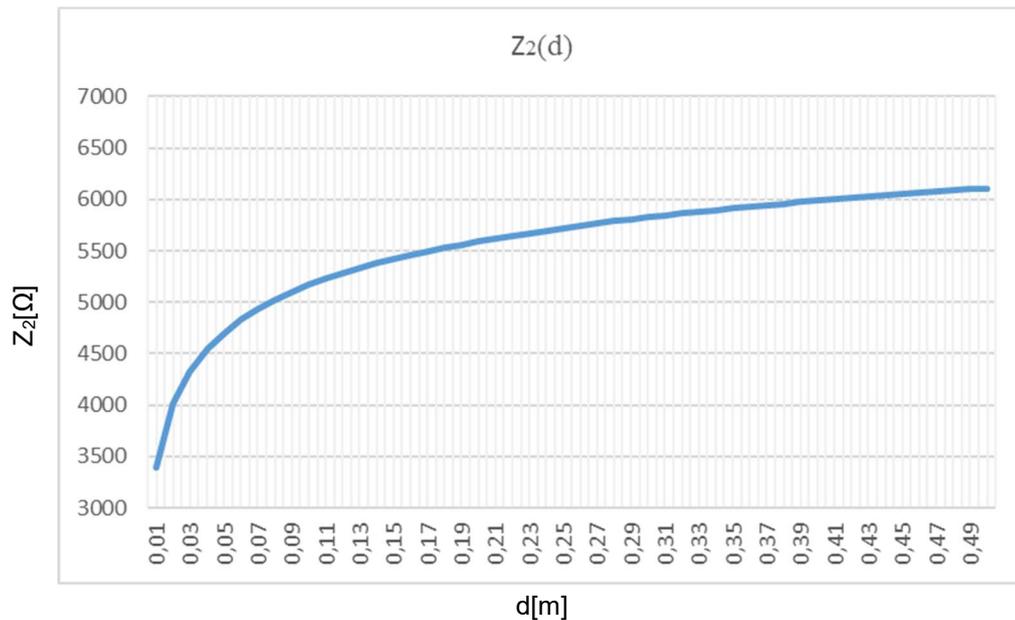


Figura 3.22 – Influência da distância d em [m], no cálculo de Z_2 em [Ω], num gerador Blumlein.

Da análise do gráfico da Figura 3.22, pode-se concluir que a impedância de modo secundário Z_2 aumenta com a distância d ao plano de massa, como esta variação é logarítmica significa que para $d > 10\text{cm}$, Z_2 já não aumenta significativamente com o crescimento de d .

3.2.4.6 Diagrama de Bewley e propagação das ondas de tensão

3.2.4.6.1 Diagrama de Bewley

Na Figura 3.23 são caracterizadas todas as ondas de tensão que se propagam no gerador Blumlein desde o início da sua carga/descarga até o impulso de tensão se extinguir, nela encontra-se também discriminado o valor da amplitude de tensão na carga Z_{out} . O diagrama de Bewley é uma ferramenta que de um modo simplificado, no caso de carga adaptada, caracteriza muito facilmente a propagação das ondas de tensão no gerador, para o caso de carga desadaptada a construção deste diagrama torna-se muito complexa e confusa [Mendes et al., 2012a; Smith, 2002].

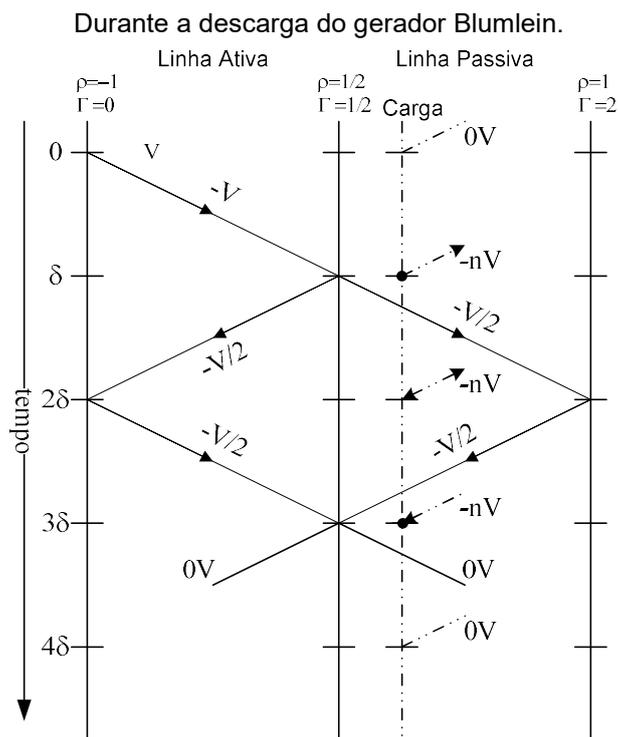
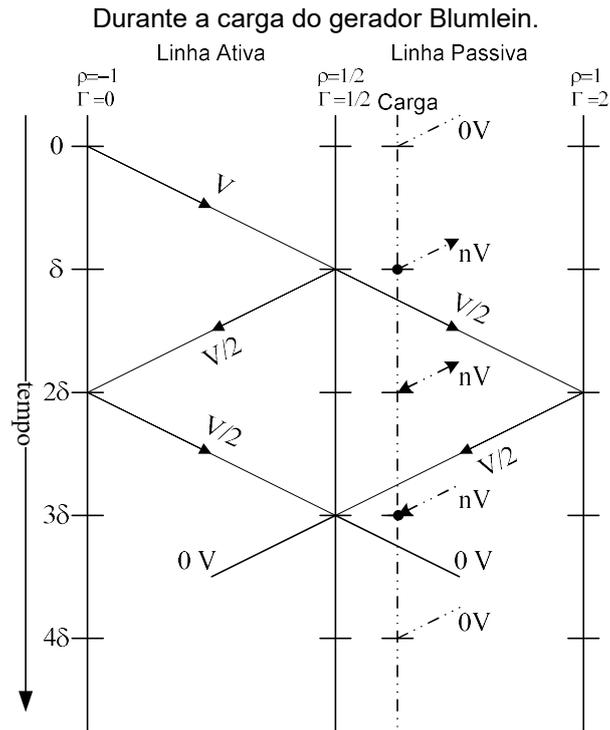


Figura 3.23 – Diagrama de Bewley para o gerador Blumlein com carga adaptada.

Os diagramas de Bewley da Figura 3.23, são um modelo que apresenta e associa a amplitude das formas de onda de tensão em propagação no gerador Blumlein ao segmento de reta correspondente, a onda refletida ou transmitida de coeficiente igual a $\pm 1/2$, que devido à influência dos outros estágios as equações (2.23) e (2.24) perdem a sua validade comparando com a aplicação

a circuitos mais simples, por exemplo circuitos com um estágio ou com apenas uma LT. Como se pode observar o impulso de tensão na carga dura enquanto houver diferença de potencial entre as linhas ativas e as linhas passivas do gerador. Caso a carga do gerador Blumlein não estiver adaptada o diagrama de Bewley torna-se mais complexo porque para além do número infinito de reflexões, o coeficiente de amplitude das ondas refletidas e transmitidas também assume valores diferentes.

3.2.4.6.2 Detalhe da propagação das ondas de tensão no gerador Blumlein

A propagação das ondas de tensão durante a carga do gerador Blumlein é apresentada na Figura 3.24 até à Figura 3.26, considerando que o gerador está ligado a uma carga adaptada. Na Figura 3.24 para $0 \leq t \leq \delta$ tem-se:

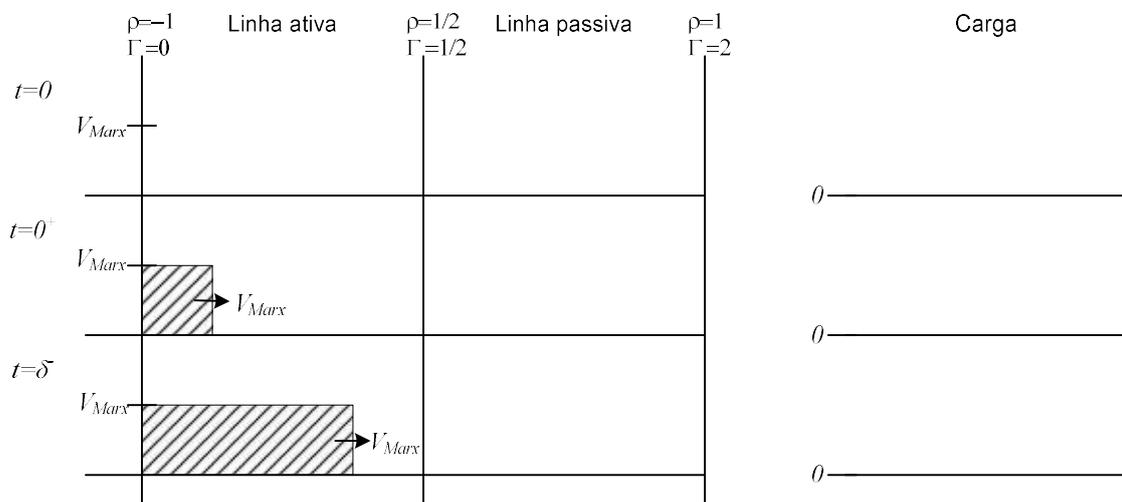


Figura 3.24 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $0 \leq t \leq \delta$.

Na Figura 3.25 e para $\delta \leq t \leq 2\delta$ tem-se:

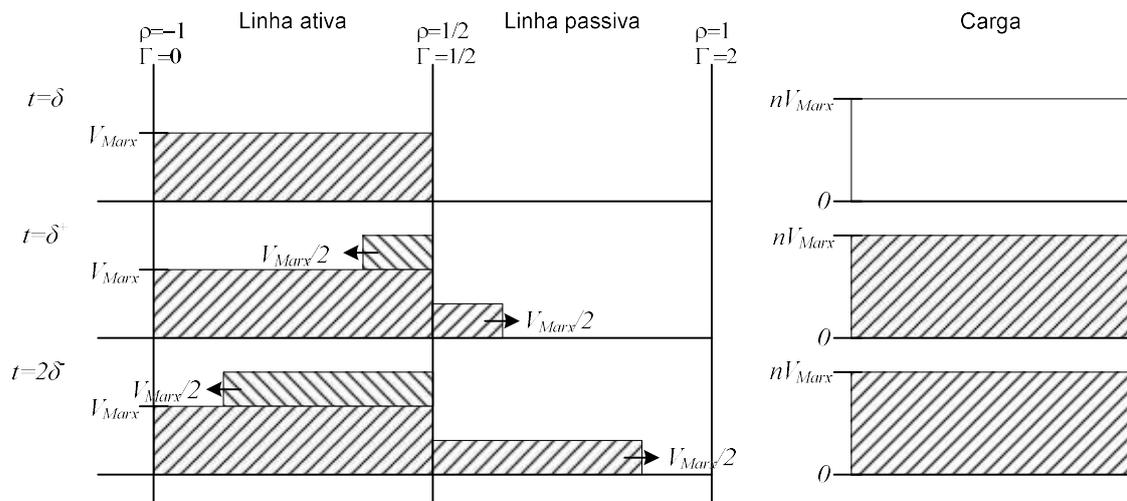


Figura 3.25 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $\delta \leq t \leq 2\delta$.

Na Figura 3.26 e para $2\delta \leq t \leq 3\delta$ tem-se:

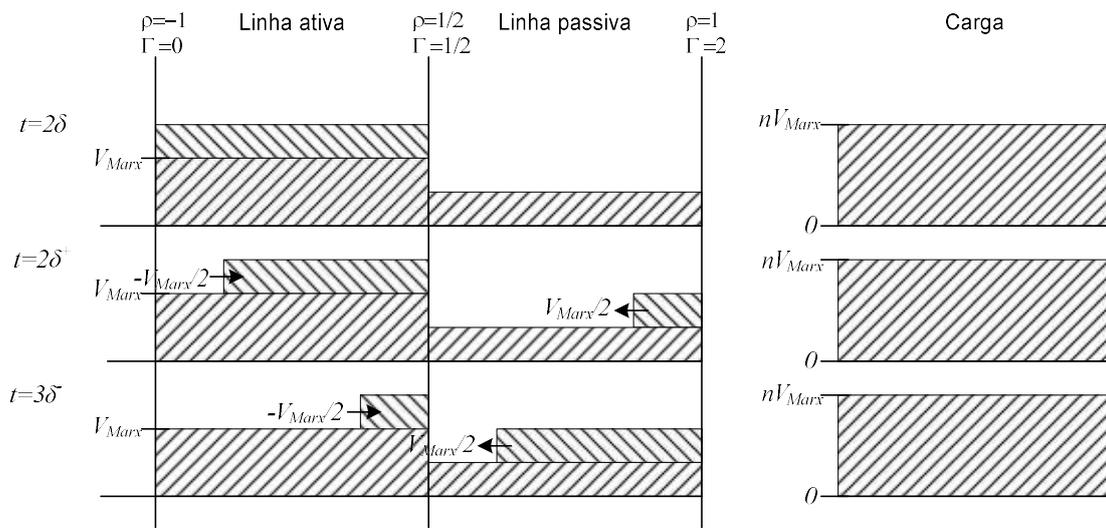


Figura 3.26 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $2\delta \leq t \leq 3\delta$.

Na Figura 3.27 e para $t \geq 3\delta$ tem-se:

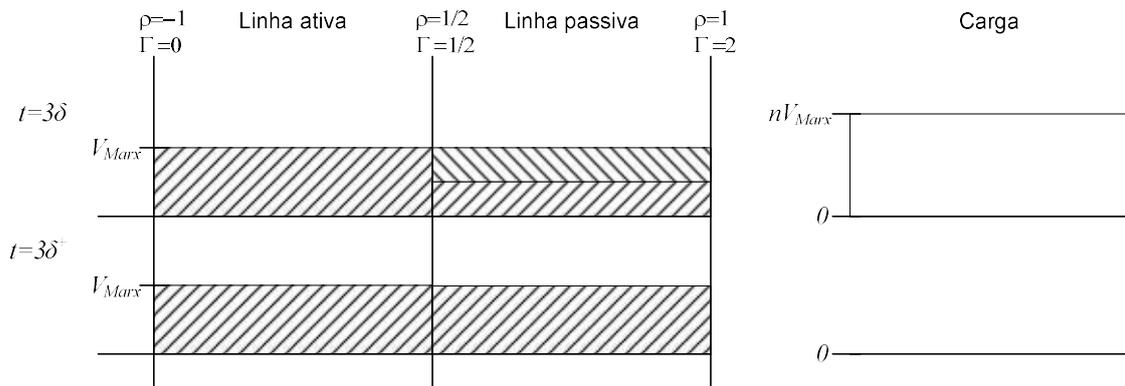


Figura 3.27 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $t \geq 3\delta$.

Do mesmo modo, a propagação das ondas de tensão durante a descarga do gerador Blumlein é apresentada na Figura 3.28 até à Figura 3.30, considerando que o gerador está ligado a uma carga adaptada. Na Figura 3.28 para $0 \leq t \leq \delta$ tem-se:

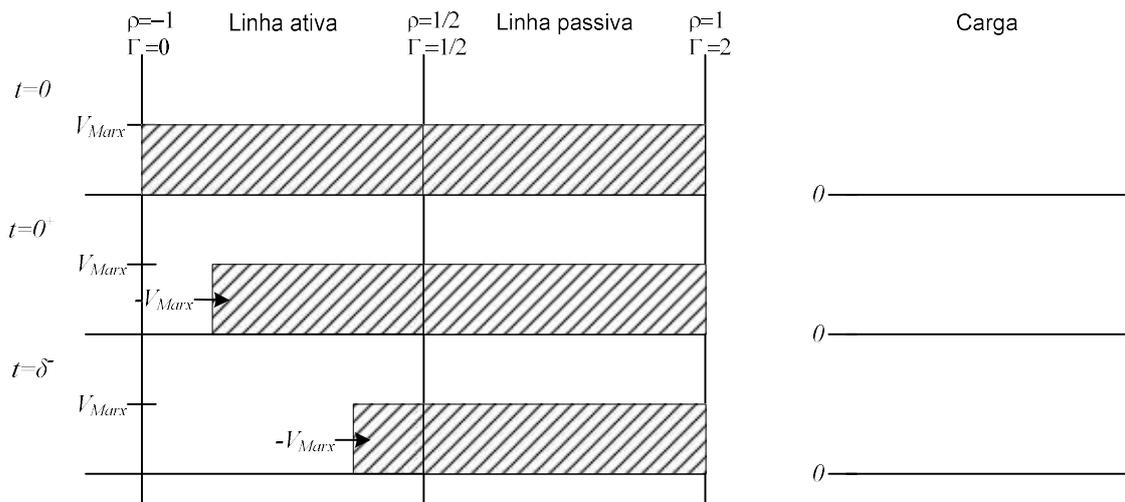


Figura 3.28 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $0 \leq t \leq \delta$.

Na Figura 3.29 e para $\delta \leq t \leq 2\delta$ tem-se:

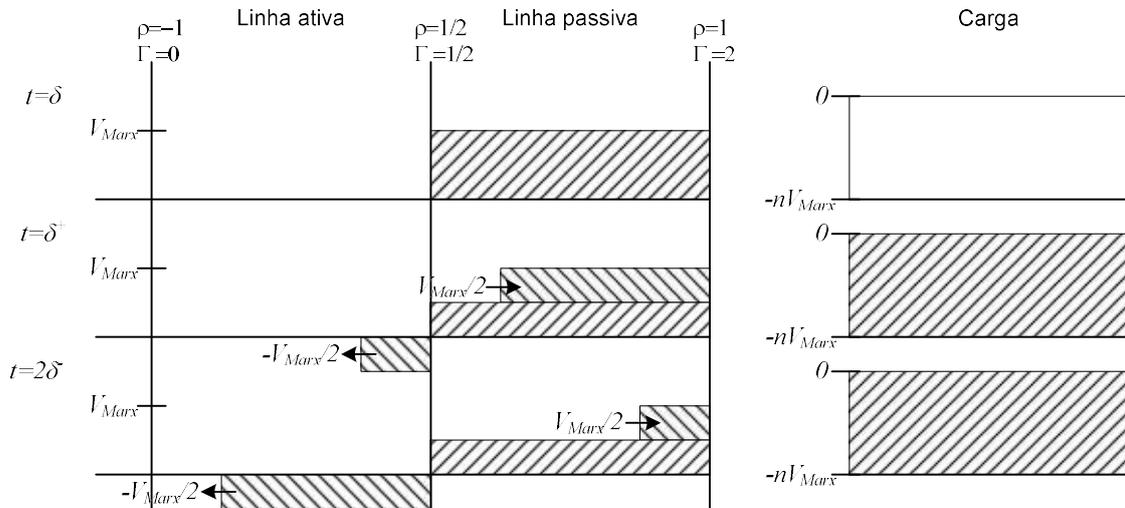


Figura 3.29 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $\delta \leq t \leq 2\delta$.

Na Figura 3.30 e para $2\delta \leq t \leq 3\delta$ tem-se:

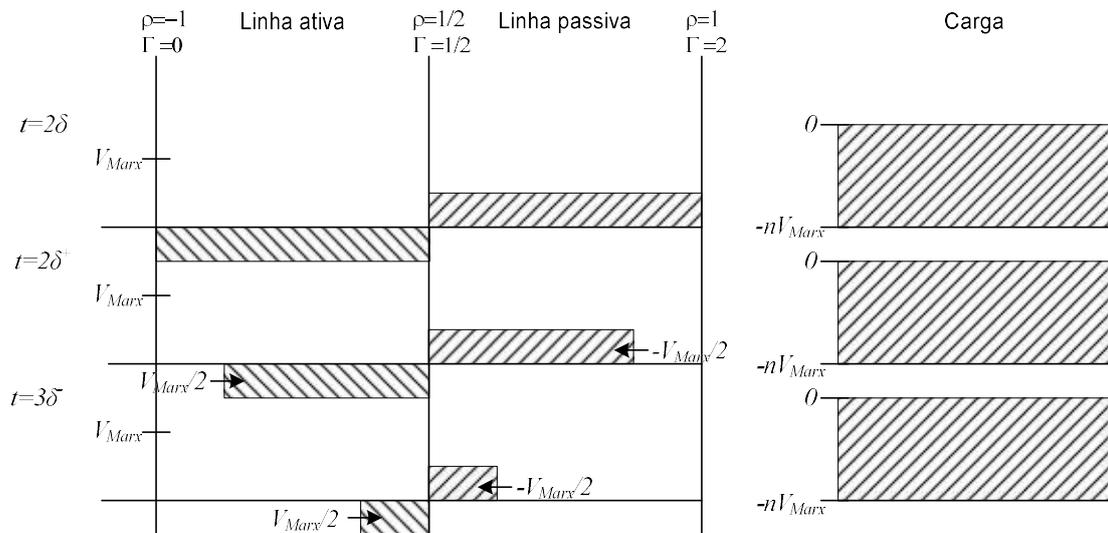


Figura 3.30 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $2\delta \leq t \leq 3\delta$.

Na Figura 3.31 e para $t \geq 3\delta$ tem-se:

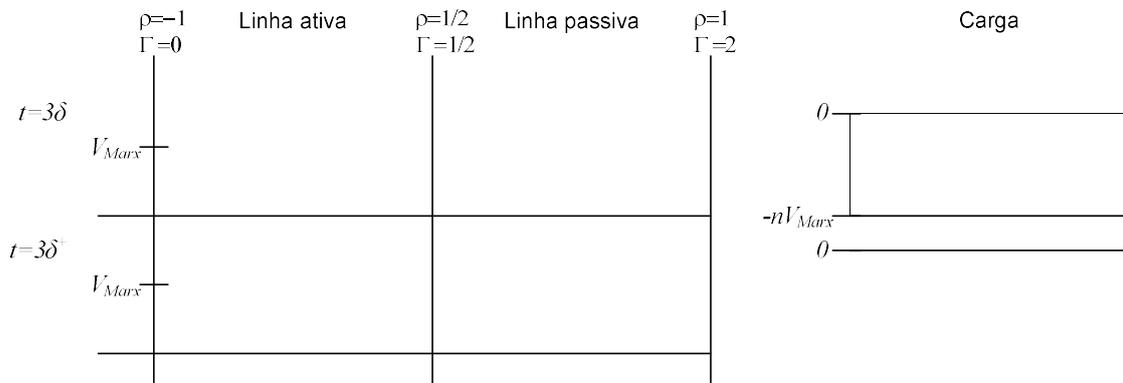


Figura 3.31 – Propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein com carga adaptada, para $t \geq 3\delta$.

A análise das Figura 3.24 até à Figura 3.31, mostra num estágio genérico como a onda de tensão carrega ou descarrega um gerador Blumlein de acordo com os fatores de reflexão e transmissão calculados no ponto 3.2.4.4, assim como a amplitude e duração do impulso de tensão na carga. De salientar também o facto de apenas existir impulso de tensão na carga enquanto se verificar uma diferença de potencial no ponto b entre a linha ativa e a linha passiva.

3.2.4.7 Tensão na carga

Analisada a propagação das ondas de tensão no ponto b do circuito da Figura 3.17 circuito simplificado do gerador Blumlein com 3 estágios, pode-se calcular a tensão na carga V_{out} , de acordo com o circuito equivalente da Figura 3.32.

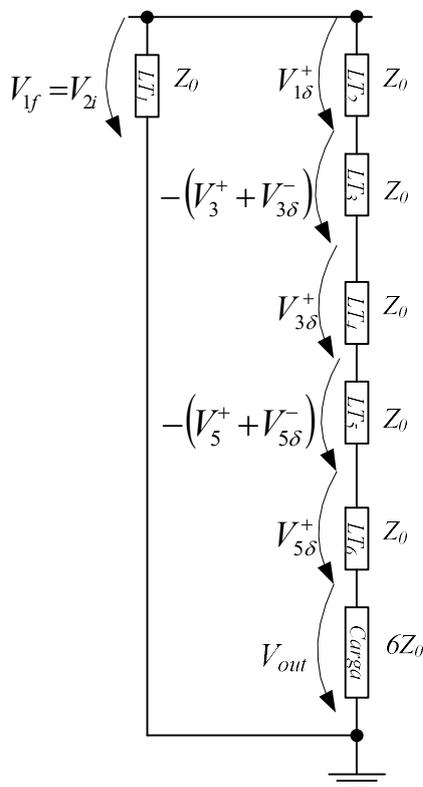


Figura 3.32 – Circuito equivalente do ponto b do gerador Blumlein para cálculo da tensão na carga.

No circuito da Figura 3.32, V_{1f} representa a onda de tensão incidente mais a onda de tensão refletida no final da linha LT_1 , V_{2i} a onda de tensão à entrada da linha LT_2 , $V_{1\delta}^+$ a onda de tensão transmitida para a linha LT_2 , V_3^+ a onda de tensão incidente no final da linha LT_3 , $V_{3\delta}^+$ a onda de tensão transmitida para a linha LT_4 , $V_{3\delta}^-$ a onda de tensão refletida no final da linha LT_3 . V_5^+ a onda de tensão incidente no final da linha LT_5 , $V_{5\delta}^+$ a onda de tensão transmitida para a linha LT_6 , $V_{5\delta}^-$ a onda de tensão refletida no final da linha LT_5 .

Conhecendo-se os valores dos coeficientes de reflexão e transmissão no ponto b, pode-se caracterizar a amplitude da tensão em todos os pontos do gerador Blumlein. Deste modo pela lei das malhas conclui-se que da Figura 3.32, pode-se tirar a equação (3.43) que dá o equilíbrio de tensões no ponto b:

$$-V_{1f} + V_{1\delta}^+ - (V_3^+ + V_{3\delta}^-) + V_{3\delta}^+ - (V_5^+ + V_{5\delta}^-) + V_{5\delta}^+ + V_{out} = 0 \quad (3.43)$$

A amplitude da tensão V_{out} a partir da equação (3.43) é:

$$V_{out} = V_{1f} - V_{1\delta}^+ + (V_3^+ + V_{3\delta}^-) - V_{3\delta}^+ + (V_5^+ + V_{5\delta}^-) - V_{5\delta}^+ \quad (3.44)$$

Durante a carga do gerador Blumlein e passado um intervalo tempo δ , surge na carga um impulso de tensão dado pela equação (3.44) durante um intervalo de tempo 2δ , conforme a Figura 3.24 até à Figura 3.27, situação do gerador Blumlein co 3 estágios.

$$V_{out} = V_{1f} - V_{1\delta}^+ + (V_3^+ + V_{3\delta}^-) - V_{3\delta}^+ + (V_5^+ + V_{5\delta}^-) - V_{5\delta}^+$$

$$\Leftrightarrow V_{out} = \frac{3}{2}V_{Marx} - \frac{1}{2}V_{Marx} + \left(V_{Marx} + \frac{1}{2}V_{Marx}\right) - \frac{1}{2}V_{Marx} + \left(V_{Marx} + \frac{1}{2}V_{Marx}\right) - \frac{1}{2}V_{Marx}$$

$$\Leftrightarrow V_{out} = \frac{6}{2}V_{Marx} = 3V_{Marx}$$

Durante a descarga do gerador Blumlein e passado um intervalo tempo δ , surge na carga um impulso de tensão dado pela equação (3.44) durante um intervalo de tempo 2δ , conforme a Figura 3.28 até à Figura 3.31.

$$V_{out} = V_{1f} - V_{1\delta}^+ + (V_3^+ + V_{3\delta}^-) - V_{3\delta}^+ + (V_5^+ + V_{5\delta}^-) - V_{5\delta}^+$$

$$\Leftrightarrow V_{out} = -\frac{3}{2}V_{Marx} + \frac{1}{2}V_{Marx} - \left(V_{Marx} + \frac{1}{2}V_{Marx}\right) + \frac{1}{2}V_{Marx} - \left(V_{Marx} + \frac{1}{2}V_{Marx}\right) + \frac{1}{2}V_{Marx}$$

$$\Leftrightarrow V_{out} = -\frac{6}{2}V_{Marx} = -3V_{Marx}$$

Em regime permanente, passado um intervalo de tempo 3δ , a amplitude da tensão é nula na carga porque a mesma em módulo toma o mesmo valor em todos os pontos anulando-se mutuamente.

3.2.4.8 Exemplos de aplicação

Os resultados dos exemplos de aplicação obtidos nesta seção, para o caso de carga adaptada foram previamente publicados em [Mendes et al., 2012a, 2012b], para os casos de carga desadaptada os resultados são originais.

3.2.4.8.1 Gerador Blumlein com 2 estgios

Para um gerador Blumlein com 2 estgios, conforme a Figura 3.33, ou seja, $n=2$, $x=\{1, 2\}$.

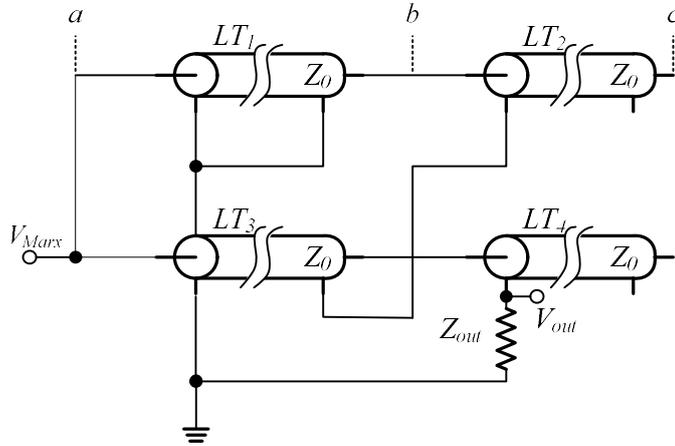


Figura 3.33 – Gerador Blumlein com 2 estgios.

a) Carga adaptada [Mendes et al., 2012a], $Z_{out}=Z_{outAdaptada} \Rightarrow \alpha=1$, $k=2n\alpha=4 \Rightarrow k_{(n=1)}=2$, na região b da Figura 3.33, por aplicação do conjunto de equações (3.28) tem-se que:

$$\rho_{2,1}^4 = \frac{[4 + 2 - 1 \times 2] \times 2 - 2(2 - 1)}{2 \times 2 + 4} = \frac{8 - 2}{8} = \frac{3}{4}$$

$$\rho_{2,2}^4 = \frac{1}{4}$$

$$\Gamma_{2,1}^4 = 1 + \rho_{2,1}^4 = \frac{8 + 12 - 1 \times 4 - 2(2 - 1)}{2 \times 2 + 4} = \frac{14}{8} = \frac{7}{4}$$

$$\Gamma_{2,2}^4 = 1 + \rho_{2,2}^4 = \frac{5}{4}$$

Tendo em conta os fatores de reflexão e transmissão calculados, calcula-se de seguida a sua influência sobre os outros estgios, pela aplicação das equações (3.32) e (3.33).

$$\begin{cases} \rho_{1,i}^2 = \sum_{i=1}^2 (-1)^{i-1} \rho_{2,i}^4 = \rho_{2,1}^4 - \rho_{2,2}^4 = \frac{3}{4} - \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \\ \rho_{2,i}^2 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{2,i}^4}{8 + 12 - 4 - 2} + \sum_{i=2}^2 (-1)^i \rho_{2,i}^4 = \frac{\Gamma_{2,1}^4}{7} + \rho_{2,2}^4 = \frac{7}{7} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Gamma_{1,i}^2 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{2,i}^4}{8+12-4-2} - \sum_{i=2}^2 (-1)^{i+1} \rho_{2,i}^4 = \frac{\Gamma_{2,1}^4}{7} + \rho_{2,2}^4 = \frac{7}{7} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \\ \Gamma_{2,i}^2 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{2,i}^4}{8+12-4-2(2i-1)} = \frac{2\Gamma_{2,1}^4}{8+12-4-2} + \frac{2\Gamma_{2,2}^4}{8+12-4-6} = \frac{7}{7} + \frac{5}{4} = \frac{1}{2} \end{cases}$$

b) Carga não adaptada, $Z_{out}=Z_{outAdaptada}/2 \Rightarrow \alpha=1/2$, $k=2n\alpha=2$ e $k_{(n=1)}=1$, na região b da Figura 3.33, por aplicação do conjunto de equações (3.28) tem-se que:

$$\rho_{2,1}^2 = \frac{[2+2-1 \times 1] \times 2 - 2(2-1)}{2 \times 2 + 2} = \frac{6-2}{6} = \frac{2}{3}$$

$$\rho_{2,2}^2 = 0$$

$$\Gamma_{2,1}^2 = 1 + \rho_{2,1}^2 = \frac{8+6-1 \times 2 - 2(2-1)}{2 \times 2 + 2} = \frac{10}{6} = \frac{5}{3}$$

$$\Gamma_{2,2}^2 = 1 + \rho_{2,2}^2 = 1$$

Tendo em conta os fatores de reflexão e transmissão calculados, calcula-se de seguida a sua influência nos outros estágios, pela aplicação das equações (3.32) e (3.33).

$$\begin{cases} \rho_{1,i}^2 = \sum_{i=1}^2 (-1)^{i-1} \rho_{2,i}^2 = \rho_{2,1}^2 - \rho_{2,2}^2 = \frac{2}{3} - 0 = \frac{2}{3} \\ \rho_{2,i}^2 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{2,i}^2}{8+6-2-2} + \sum_{i=2}^2 (-1)^i \rho_{2,i}^2 = \frac{\Gamma_{2,1}^2}{5} + \rho_{2,2}^2 = \frac{5}{5} + 0 = \frac{1}{3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Gamma_{1,i}^2 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{2,i}^2}{8+6-2-2} - \sum_{i=2}^2 (-1)^{i+1} \rho_{2,i}^2 = \frac{\Gamma_{2,1}^2}{5} + \rho_{2,2}^2 = \frac{5}{5} + 0 = \frac{1}{3} \\ \Gamma_{2,i}^2 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{2,i}^2}{8+6-2-2(2i-1)} = \frac{2\Gamma_{2,1}^2}{8+6-2-2} + \frac{2\Gamma_{2,2}^2}{8+6-2-6} = \frac{5}{5} + \frac{1}{3} = \frac{2}{3} \end{cases}$$

c) Carga não adaptada, $Z_{out}=2Z_{outAdaptada} \Rightarrow \alpha=2$, $k=8$ e $k_{(n=1)}=4$, na região b da Figura 3.33, por aplicação do conjunto de equações (3.28) tem-se que:

$$\rho_{2,1}^8 = \frac{[8+2-1 \times 4] \times 2 - 2(2-1)}{2 \times 2 + 4} = \frac{12-2}{12} = \frac{5}{6}$$

$$\rho_{2,2}^8 = \frac{3}{6}$$

$$\Gamma_{2,1}^8 = 1 + \rho_{2,1}^8 = \frac{8 + 24 - 1 \times 8 - 2(2 - 1)}{2 \times 2 + 8} = \frac{22}{12} = \frac{11}{6}$$

$$\Gamma_{2,2}^8 = 1 + \rho_{2,2}^8 = \frac{9}{6}$$

Tendo em conta os fatores de reflexão e transmissão calculados, calcula-se de seguida a sua influência nos outros estágios, pela aplicação das equações (3.36) e (3.37).

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{1,i}^2 = \sum_{i=1}^2 (-1)^{i-1} \rho_{2,i}^8 = \rho_{2,1}^8 - \rho_{2,2}^8 = \frac{5}{6} - \frac{3}{6} = \frac{1}{3} \\ \rho_{2,i}^2 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{2,i}^8}{8 + 24 - 8 - 2} + \sum_{i=2}^2 (-1)^i \rho_{2,i}^8 = \frac{\Gamma_{2,1}^8}{11} + \rho_{2,2}^8 = \frac{11}{11} + \frac{3}{6} = \frac{2}{3} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{1,i}^2 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{2,i}^8}{8 + 24 - 8 - 2} - \sum_{i=2}^2 (-1)^{i+1} \rho_{2,i}^8 = \frac{\Gamma_{2,1}^8}{11} + \rho_{2,2}^8 = \frac{11}{11} + \frac{3}{6} = \frac{2}{3} \\ \Gamma_{2,i}^2 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{2,i}^8}{8 + 24 - 8 - 2(2i - 1)} = \frac{2\Gamma_{2,1}^8}{8 + 24 - 8 - 2} + \frac{2\Gamma_{2,2}^8}{8 + 24 - 8 - 6} = \frac{11}{11} + \frac{9}{9} = \frac{1}{3} \end{array} \right.$$

3.2.4.8.2 Gerador Blumlein com 3 estgios

Para um gerador Blumlein com 3 estgios, conforme a Figura 3.34, ou seja, $n=3$, $x=\{1, 2, 3\}$.

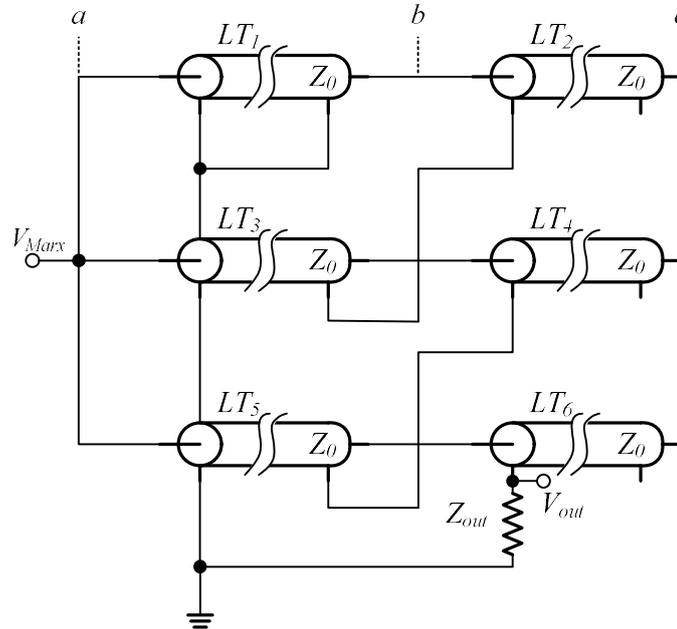


Figura 3.34 – Gerador Blumlein com 3 estgios.

a) Carga adaptada [Mendes et al., 2012a], $Z_{out}=Z_{outAdaptada} \Rightarrow \alpha=1$, $k=6$ e $k_{(n=1)}=2$, na região b da Figura 3.34, por aplicação do conjunto de equações (3.28) tem-se que:

$$\rho_{3,1}^6 = \frac{[6 + 2 - 2 \times 2] \times 3 - 2(2 - 1)}{2 \times 3 + 6} = \frac{12 - 2}{12} = \frac{5}{6}$$

$$\rho_{3,2}^6 = \frac{3}{6}$$

$$\rho_{3,3}^6 = \frac{1}{6}$$

$$\Gamma_{3,1}^6 = 1 + \rho_{3,1}^6 = \frac{12 + 24 - 2 \times 6 - 2(2 - 1)}{2 \times 3 + 6} = \frac{22}{12} = \frac{11}{6}$$

$$\Gamma_{3,2}^6 = 1 + \rho_{3,2}^6 = \frac{9}{6}$$

$$\Gamma_{3,3}^6 = 1 + \rho_{3,3}^6 = \frac{7}{6}$$

Tendo em conta os fatores de reflexão e transmissão calculados, calcula-se de seguida a sua influência nos outros estágios, pela aplicação das equações (3.32) e (3.33).

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{1,i}^3 = \sum_{i=1}^3 (-1)^{i-1} \rho_{3,i}^6 = \rho_{3,1}^6 - \rho_{3,2}^6 + \rho_{3,3}^6 = \frac{5}{6} - \frac{3}{6} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2} \\ \rho_{2,i}^3 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{3,i}^6}{12 + 24 - 12 - 2} + \sum_{i=2}^3 (-1)^i \rho_{3,i}^6 = \frac{\Gamma_{3,1}^6}{11} + \rho_{3,2}^6 - \rho_{3,3}^6 = \frac{11}{11} + \frac{3}{6} - \frac{1}{6} = \frac{1}{2} \\ \rho_{3,i}^3 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{3,i}^6}{12 + 24 - 12 - 2(2i-1)} + \sum_{i=3}^3 (-1)^{i-1} \rho_{3,i}^6 = \frac{\Gamma_{3,1}^6}{11} + \frac{\Gamma_{3,2}^6}{9} + \rho_{3,3}^6 = \frac{11}{11} + \frac{9}{9} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{1,i}^3 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{3,i}^6}{12 + 24 - 12 - 2} - \sum_{i=2}^3 (-1)^{i+1} \rho_{3,i}^6 = \frac{\Gamma_{3,1}^6}{11} + \rho_{3,2}^6 - \rho_{3,3}^6 = \frac{11}{11} + \frac{3}{6} - \frac{1}{6} = \frac{1}{2} \\ \Gamma_{2,i}^3 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{3,i}^6}{12 + 24 - 12 - 2(2i-1)} + \sum_{i=3}^3 (-1)^{i+1} \rho_{3,i}^6 = \frac{\Gamma_{3,1}^6}{11} + \frac{\Gamma_{3,2}^6}{9} + \rho_{3,3}^6 = \frac{11}{11} + \frac{9}{9} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2} \\ \Gamma_{3,i}^3 = \sum_{i=1}^3 \frac{2\Gamma_{3,i}^6}{12 + 24 - 12 - 2(2i-1)} = \frac{\Gamma_{3,1}^6}{11} + \frac{\Gamma_{3,2}^6}{9} + \frac{\Gamma_{3,3}^6}{7} = \frac{11}{11} + \frac{9}{9} + \frac{7}{7} = \frac{1}{2} \end{array} \right.$$

b) Carga não adaptada, $Z_{out}=Z_{outAdaptada}/2 \Rightarrow \alpha=1/2$, $k=3$ e $k_{(n=1)}=1$, na região b da Figura 3.34, por aplicação do conjunto de equações (3.28) tem-se que:

$$\rho_{3,1}^3 = \frac{[3 + 2 - 2 \times 1] \times 3 - 2(2 - 1)}{2 \times 3 + 3} = \frac{9 - 2}{9} = \frac{7}{9}$$

$$\rho_{3,2}^3 = \frac{3}{9}$$

$$\rho_{3,3}^3 = -\frac{1}{9}$$

$$\Gamma_{3,1}^3 = 1 + \rho_{3,1}^3 = \frac{12 + 12 - 2 \times 3 - 2(2 - 1)}{2 \times 3 + 3} = \frac{16}{9}$$

$$\Gamma_{3,2}^3 = 1 + \rho_{3,2}^3 = \frac{12}{9}$$

$$\Gamma_{3,3}^3 = 1 + \rho_{3,3}^3 = \frac{8}{9}$$

Tendo em conta os fatores de reflexão e transmissão calculados, calcula-se de seguida a sua influência nos outros estágios, pela aplicação das equações (3.32) e (3.33).

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{1,i}^3 = \sum_{i=1}^3 (-1)^{i-1} \rho_{3,i}^3 = \rho_{3,1}^3 - \rho_{3,2}^3 + \rho_{3,3}^3 = \frac{7}{9} - \frac{3}{9} - \frac{1}{9} = \frac{1}{3} \\ \rho_{2,i}^3 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{3,i}^3}{12 + 12 - 6 - 2} + \sum_{i=2}^3 (-1)^i \rho_{3,i}^3 = \frac{\Gamma_{3,1}^3}{8} + \rho_{3,2}^3 - \rho_{3,3}^3 = \frac{16}{9} + \frac{3}{9} + \frac{1}{9} = \frac{2}{3} \\ \rho_{3,i}^3 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{3,i}^3}{12 + 12 - 6 - 2(2i-1)} + \sum_{i=3}^3 (-1)^{i-1} \rho_{3,i}^3 = \frac{\Gamma_{3,1}^3}{8} + \frac{\Gamma_{3,2}^3}{6} + \rho_{3,3}^3 = \frac{16}{9} + \frac{12}{9} - \frac{1}{9} = \frac{1}{3} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{1,i}^3 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{3,i}^3}{12 + 12 - 6 - 2} - \sum_{i=2}^3 (-1)^{i+1} \rho_{3,i}^3 = \frac{\Gamma_{3,1}^3}{8} + \rho_{3,2}^3 - \rho_{3,3}^3 = \frac{16}{9} + \frac{3}{9} + \frac{1}{9} = \frac{2}{3} \\ \Gamma_{2,i}^3 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{3,i}^3}{12 + 12 - 6 - 2(2i-1)} + \sum_{i=3}^3 (-1)^{i+1} \rho_{3,i}^3 = \frac{\Gamma_{3,1}^3}{8} + \frac{\Gamma_{3,2}^3}{6} + \rho_{3,3}^3 = \frac{16}{9} + \frac{12}{9} - \frac{1}{9} = \frac{1}{3} \\ \Gamma_{3,i}^3 = \sum_{i=1}^3 \frac{2\Gamma_{3,i}^3}{12 + 12 - 6 - 2(2i-1)} = \frac{\Gamma_{3,1}^3}{8} + \frac{\Gamma_{3,2}^3}{6} + \frac{\Gamma_{3,3}^3}{4} = \frac{16}{9} + \frac{12}{9} + \frac{8}{9} = \frac{2}{3} \end{array} \right.$$

c) Carga não adaptada, $Z_{out}=2Z_{outAdaptada} \Rightarrow \alpha=2, k=12$ e $k_{(n=1)}=4$, na região b da Figura 3.34, por aplicação do conjunto de equações (3.28) tem-se que:

$$\rho_{3,1}^{12} = \frac{[12 + 2 - 2 \times 4] \times 3 - 2(2-1)}{2 \times 3 + 3} = \frac{18 - 2}{18} = \frac{8}{9}$$

$$\rho_{3,2}^{12} = \frac{6}{9}$$

$$\rho_{3,3}^{12} = \frac{4}{9}$$

$$\Gamma_{3,1}^{12} = 1 + \rho_{3,1}^{12} = \frac{12 + 48 - 2 \times 12 - 2(2-1)}{2 \times 3 + 12} = \frac{17}{9}$$

$$\Gamma_{3,2}^{12} = 1 + \rho_{3,2}^{12} = \frac{15}{9}$$

$$\Gamma_{3,3}^{12} = 1 + \rho_{3,3}^{12} = \frac{13}{9}$$

Tendo em conta os fatores de reflexão e transmissão calculados, calcula-se de seguida a sua influência nos outros estágios, pela aplicação das equações (3.32) e (3.33).

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{1,i}^3 = \sum_{i=1}^3 (-1)^{i-1} \rho_{3,i}^{12} = \rho_{3,1}^{12} - \rho_{3,2}^{12} + \rho_{3,3}^{12} = \frac{8}{9} - \frac{6}{9} + \frac{4}{9} = \frac{2}{3} \\ \rho_{2,i}^3 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{3,i}^{12}}{12 + 48 - 24 - 2} + \sum_{i=2}^3 (-1)^i \rho_{3,i}^{12} = \frac{\Gamma_{3,1}^{12}}{17} + \rho_{3,2}^{12} - \rho_{3,3}^{12} = \frac{17}{17} + \frac{6}{9} - \frac{4}{9} = \frac{1}{3} \\ \rho_{3,i}^3 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{3,i}^{12}}{12 + 48 - 24 - 2(2i-1)} + \sum_{i=3}^3 (-1)^{i-1} \rho_{3,i}^{12} = \frac{\Gamma_{3,1}^{12}}{17} + \frac{\Gamma_{3,2}^{12}}{15} + \rho_{3,3}^{12} = \frac{17}{17} + \frac{15}{15} + \frac{4}{9} = \frac{2}{3} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{1,i}^3 = \sum_{i=1}^1 \frac{2\Gamma_{3,i}^{12}}{12 + 48 - 24 - 2} - \sum_{i=2}^3 (-1)^{i+1} \rho_{3,i}^{12} = \frac{\Gamma_{3,1}^{12}}{17} + \rho_{3,2}^{12} - \rho_{3,3}^{12} = \frac{17}{17} + \frac{6}{9} - \frac{4}{9} = \frac{1}{3} \\ \Gamma_{2,i}^3 = \sum_{i=1}^2 \frac{2\Gamma_{3,i}^{12}}{12 + 48 - 24 - 2(2i-1)} + \sum_{i=3}^3 (-1)^{i+1} \rho_{3,i}^{12} = \frac{\Gamma_{3,1}^{12}}{17} + \frac{\Gamma_{3,2}^{12}}{15} + \rho_{3,3}^{12} = \frac{17}{17} + \frac{15}{15} + \frac{4}{9} = \frac{2}{3} \\ \Gamma_{3,i}^3 = \sum_{i=1}^3 \frac{2\Gamma_{3,i}^{12}}{12 + 48 - 24 - 2(2i-1)} = \frac{\Gamma_{3,1}^{12}}{17} + \frac{\Gamma_{3,2}^{12}}{15} + \frac{\Gamma_{3,3}^{12}}{13} = \frac{17}{17} + \frac{15}{15} + \frac{13}{13} = \frac{1}{3} \end{array} \right.$$

Na Figura 3.35, apresentam-se as formas de onda da tensão na carga V_{out} teóricas, para o circuito da Figura 3.34 (gerador Blumlein com 3 estágios) e para os exemplos apresentados no ponto 3.2.4.8.2, para os valores de carga das alíneas a), b) e c) e tensão $V_{Max}=1000V$.

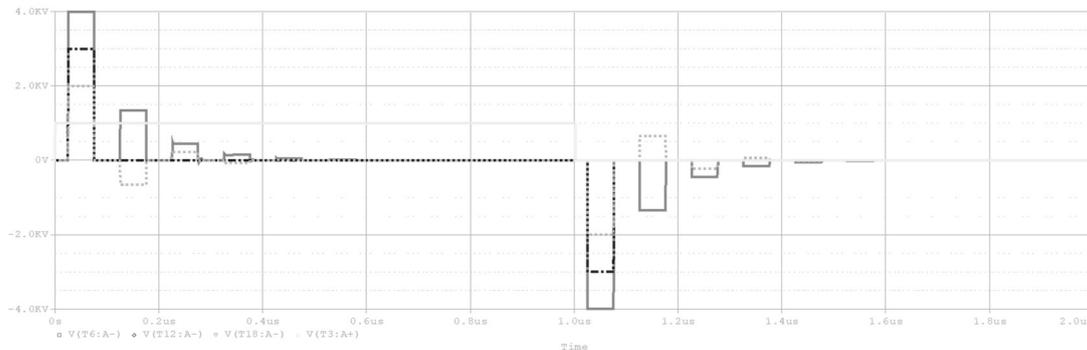


Figura 3.35 – Formas de onda teóricas de tensão na carga, V_{out} , para os exemplos especificados no ponto 3.2.4.8.2.

Em que:

- Forma de onda de tensão V_{Max} .
- - - Forma de onda de tensão V_{out} com $Z_{out}=Z_{outAdaptada}$, a).
- Forma de onda de tensão V_{out} com $Z_{out}=Z_{outAdaptada}/2$, b).
- Forma de onda de tensão V_{out} com $Z_{out}=2Z_{outAdaptada}$, c).

Da análise da Figura 3.35, pode-se concluir que na situação em que $Z_{out}=Z_{outAdaptada}$ por cada impulso de tensão monopolar V_{Marx} surge na carga um impulso de tensão bipolar de amplitude nV_{Marx} de largura 2δ separados por um tempo igual à largura do impulso V_{Marx} . Para a situação em que $Z_{out}=2Z_{outAdaptada}$ por cada impulso de tensão monopolar V_{Marx} surge na carga uma série decrescente de impulsos de tensão bipolar, com o impulso principal de amplitude $1,33nV_{Marx}$ de largura 2δ , esta série de impulsos dura até as reflexões na carga se anularem. Para a situação em que $Z_{out}=Z_{outAdaptada}/2$ por cada impulso de tensão monopolar V_{Marx} surge na carga uma série decrescente alternada de impulsos de tensão bipolar, com o impulso principal de amplitude $0,67nV_{Marx}$ de largura 2δ , esta série de impulsos dura até as reflexões na carga se anularem.

3.2.5 Balanço Energético

Tendo em conta que o gerador de Marx é constituído por m estágios, cada um com capacidade C_m , e que a fonte de alimentação carrega os condensadores com uma dada tensão V_{dc} , tem-se pela equação (3.45) que a energia armazenada no gerador de Marx E_{Marx} , é dada por:

$$E_{Marx} = m \frac{1}{2} C_{(1...m)} V_{dc}^2 \quad (3.45)$$

A máxima corrente de pico à saída do gerador de Marx com que os n estágios do gerador Blumlein é carregado, sabendo-se que a impedância de entrada que o gerador de Marx observa, é $Z_{Blumlein}=Z_0/n$, a corrente máxima de pico é dada pela equação (3.46):

$$I_{pico} = \frac{V_{Marx}}{Z_{Blumlein}} \quad (3.46)$$

Sabendo-se que a Blumlein é constituída por n estágios, $2n$ pedaços de linha coaxial de comprimento l , tensão de alimentação V_{Marx} , a energia em cada estágio da Blumlein E_B , é dada pela equação:

$$E_B = \frac{1}{2} (C_{Linha1} + C_{Linha2}) V_{Marx}^2 \quad (3.47)$$

A energia armazenada nos n estágios do gerador Blumlein $E_{Blumlein}$, é então:

$$E_{Blumlein} = nE_B \quad (3.48)$$

A energia consumida pela carga $E_{impulso}$, considerando nulas as perdas no sistema, amplitude da tensão na carga nV_{Marx} , e carga adaptada, durante cada impulso é dada pela equação:

$$E_{impulso} = \frac{(nV_{Marx})^2}{Z_{out}} t_{impulso} \quad (3.49)$$

Em que $t_{impulso}$ depende das características do cabo coaxial, L e C, definido por [Koroth; Rossi; 1998]:

$$t_{impulso} = 2\delta \quad (3.50)$$

$$\delta = \frac{l}{v} = l\sqrt{LC} = l\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu_0\mu_r} \quad (3.51)$$

Neste caso, considera-se que o isolamento é ideal, logo tem-se que: $\mu_r=1$.

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (3.52)$$

Com D diâmetro exterior do cabo coaxial, e d diâmetro do condutor interior, e com δ comprimento elétrico de uma secção do cabo coaxial, l comprimento de uma secção do cabo coaxial, v a velocidade de propagação que é uma característica do cabo $v=0,66c$, c velocidade da luz no vácuo, μ_0 permeabilidade magnética do vácuo, ϵ_0 permitividade elétrica do vácuo e ϵ permitividade elétrica do cabo coaxial.

A corrente na carga I_{out} , é dada pela equação:

$$I_{out} = \frac{nV_{Marx}}{Z_{out}} \quad (3.53)$$

A energia consumida nos 2 impulsos pela carga E_{out} , é dada pela equação:

$$E_{out} = 2E_{impulso} = \frac{2(nV_{Marx})^2}{Z_{out}} t_{impulso} \quad (3.54)$$

3.2.5.1 Trânsito de energia no gerador Blumlein

a) Com o gerador Blumlein descarregado

Para se analisar o trânsito de energia no gerador Blumlein analisa-se a propagação das ondas de tensão no gerador caracterizadas no ponto 3.2.4.6, neste caso optou-se por considerar apenas em $t=\{\delta, 2\delta, 3\delta\}$ porque em $t=\delta$ é o instante em que surge o impulso na carga e $t=3\delta$ o instante em que o impulso na carga termina:

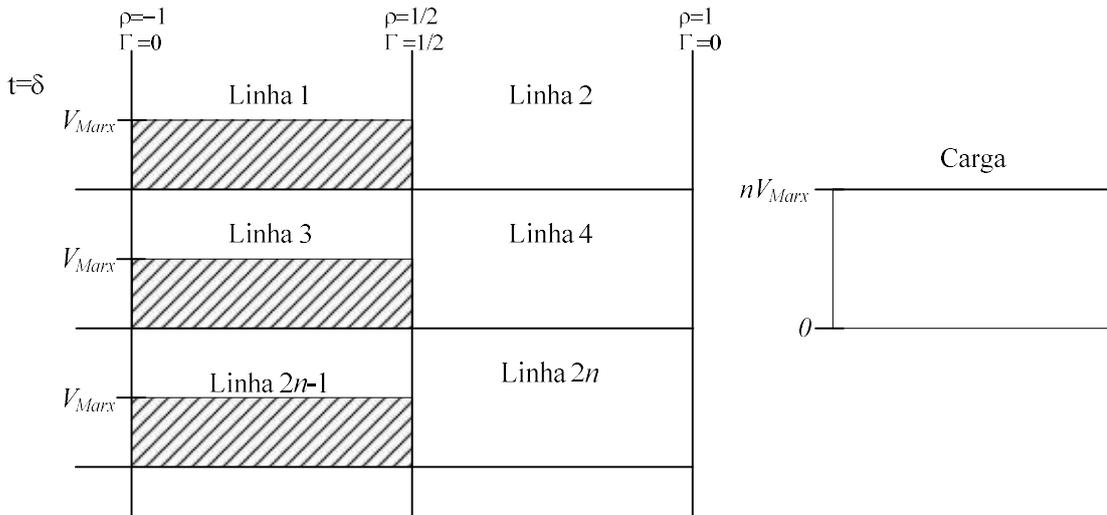


Figura 3.36 - Energia no gerador Blumlein em $t=\delta$.

A energia armazenada no gerador em $t=\delta$, e de acordo com a Figura 3.36, é dada pelo conjunto de equações (3.55), com $l=5m$ e $C_{Linha}=101pF/m$, e considerando $Z_{out}=300\Omega$, carga adaptada do gerador Blumlein com $n=3$ estágios:

$$\begin{aligned}
 E_{Linha1} &= E_{Linha3} = E_{Linha5} = \frac{1}{2} C_{Linha1} V_{Marx}^2 = \frac{1}{2} \times 5 \times 101 \times 10^{-12} \times 3333,3^2 \\
 &= 2,81mJ \\
 E_{Linha2} &= E_{Linha4} = E_{Linha6} = 0J \\
 E_{impulso} &= \frac{V_{Blumlein}^2}{Z_{out}} t_{impulso} = 0J \\
 E_{Blumlein} &= nE_{Linha1} = 3 \times E_{Linha1} = 3 \times 2,81 \times 10^{-3} = 8,43mJ
 \end{aligned}
 \tag{3.55}$$

Em $t=2\delta$, na situação da imagem da Figura 3.37, tem-se:

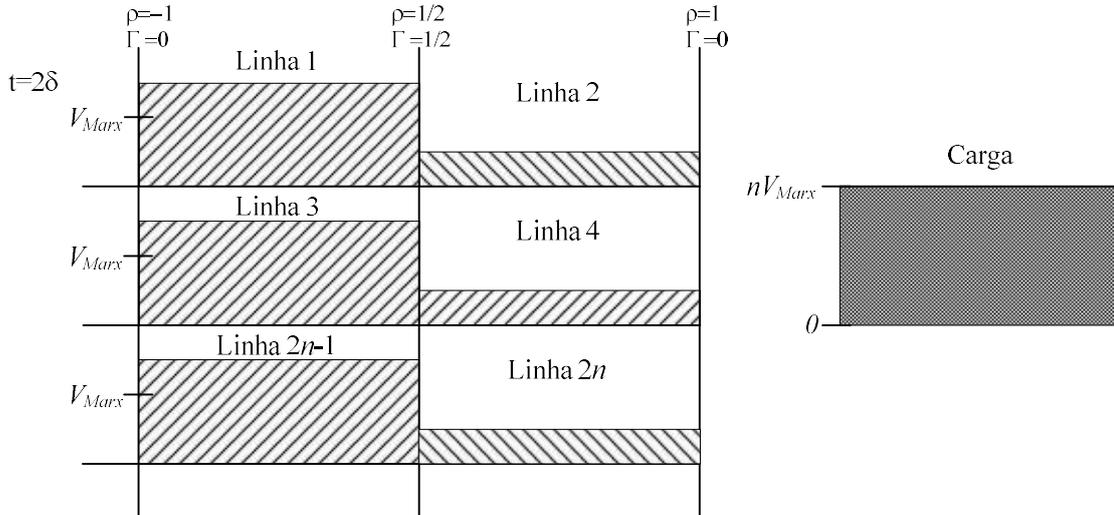


Figura 3.37 - Energia no gerador Blumlein em $t=2\delta$.

A energia armazenada no gerador em $t=2\delta$, e de acordo com a Figura 3.37, é dada pelo conjunto de equações (3.56):

$$\begin{aligned}
 E_{Linha1} &= E_{Linha3} = E_{Linha5} = \frac{1}{2} C_{Linha1} \left(\frac{3}{2} V_{Marx} \right)^2 \\
 &= \frac{9}{8} \times 5 \times 101 \times 10^{-12} \times 3333,3^2 = 6,31mJ \\
 E_{Linha2} &= E_{Linha4} = E_{Linha6} = \frac{1}{2} C_{Linha2} \left(\frac{1}{2} V_{Marx} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{8} \times 5 \times 101 \times 10^{-12} \times 3333,3^2 = 0,70mJ
 \end{aligned} \tag{3.56}$$

$$t_{impulso} = 2\delta = 2 \times 5 \sqrt{2,3 \times 8,85 \times 10^{-7}} = 50,575ns$$

$$E_{impulso} = \frac{V_{Blumlein}^2}{Z_{out}} \frac{t_{impulso}}{2} = \frac{10000^2}{300} \times \frac{50,575 \times 10^{-9}}{2} = 8,42mJ$$

$$E_{Blumlein} = nE_{Linha1} + nE_{Linha2} + E_{impulso} = 18,94 + 2,10 + 8,42 = 29,46mJ$$

O resultado do cálculo do $t_{impulso}$ através da equação (3.50) confirma a característica de propagação do cabo coaxial 5ns/m considerado em todos os cálculos efetuados.

A energia consumida pela carga é consumida durante o intervalo de tempo $t=] \delta; 3\delta[$.

E finalmente em $t=3\delta$, na situação da imagem da Figura 3.38, tem-se:

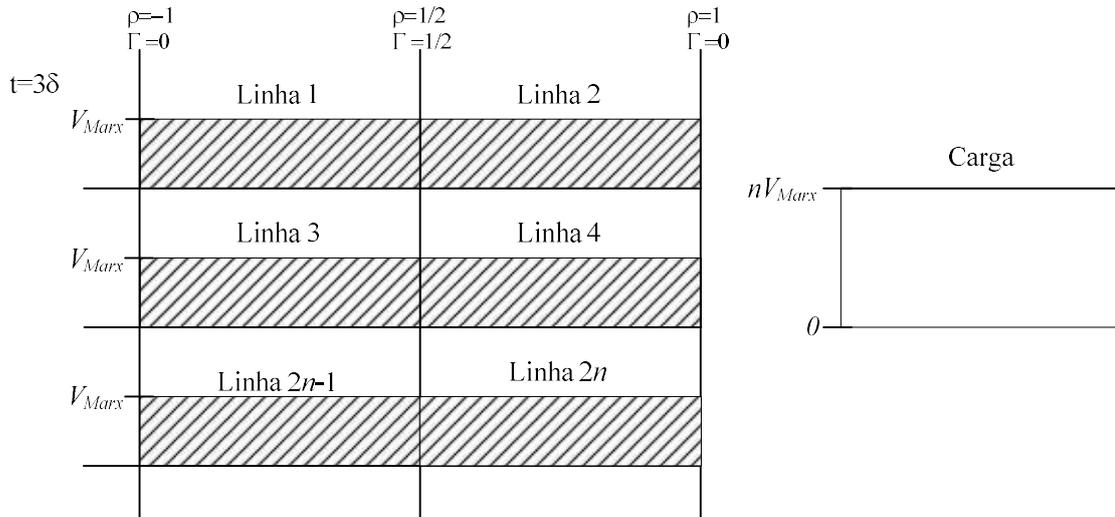


Figura 3.38 - Energia no gerador Blumlein em $t=3\delta$.

A energia armazenada no gerador em $t=3\delta$, e de acordo com a Figura 3.38, é dada pelo conjunto de equações (3.57):

$$\begin{aligned}
 E_{Linha1} &= E_{Linha3} = E_{Linha5} = \frac{1}{2} C_{Linha1} V_{Marx}^2 = \frac{1}{2} \times 5 \times 101 \times 10^{-12} \times 3333,3^2 \\
 &= 2,81mJ \\
 E_{Linha} &= E_{Linha} = E_{Linha6} = \frac{1}{2} C_{Linha} V_{Marx}^2 = \frac{1}{2} \times 5 \times 101 \times 10^{-1} \times 3333,3^2 \\
 &= 2,81mJ \\
 E_{impulso} &= \frac{V_{Blumlein}^2}{Z_{out}} t_{impulso} = 0J \\
 E_{Blumlein} &= nE_{Linha1} + nE_{Linha2} = 2 \times 3 \times 2,81 = 16,86mJ
 \end{aligned} \tag{3.57}$$

No final do impulso na carga, entre o intervalo de tempo $t=\delta$ e $t=3\delta$, ou seja durante 2δ , a energia consumida pela carga do gerador Blumlein, equação 3.49, tem-se:

$$E_{impulso} = \frac{V_{Blumlein}^2}{Z_{out}} t_{impulso} = \frac{10000^2}{300} \times 50,575 \times 10^{-9} = 16,86mJ \tag{3.58}$$

Ou seja, durante a carga do gerador Blumlein, este armazena a energia de 16,83mJ e a carga consome a energia de 16,86mJ, sendo que o somatório de 33,69mJ corresponde à energia entregue pelo gerador de Marx, sem considerar as perdas no processo. Os diferentes valores de energia calculados devem-se às aproximações feitas durante os cálculos, na realidade estes dois valores são iguais.

b) Com o gerador Blumlein carregado

Com o gerador Blumlein carregado e por análise da propagação das ondas de tensão no gerador caracterizadas no ponto 3.2.4.6, neste caso de forma análoga à a) optou-se por considerar apenas em $t=\{\delta, 2\delta, 3\delta\}$ porque em $t=\delta$ é o instante em que surge o impulso na carga e $t=3\delta$ o instante em que o impulso na carga termina:

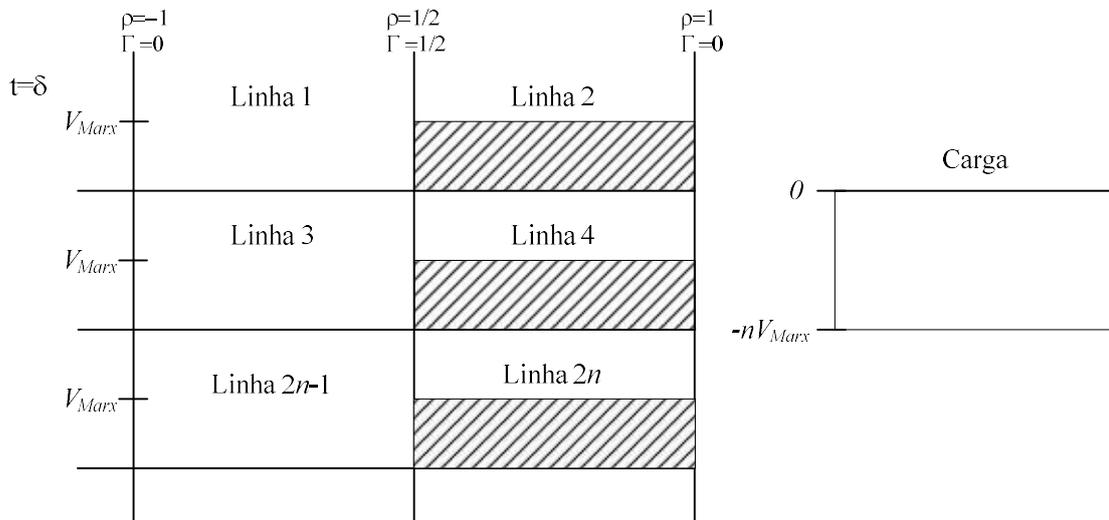


Figura 3.39 - Energia no gerador Blumlein em $t=\delta$.

A energia armazenada no gerador em $t=\delta$, e de acordo com a Figura 3.39, é dada pelo conjunto de equações (3.59):

$$\begin{aligned}
 E_{Linha1} &= E_{Linha3} = E_{Linha5} = 0J \\
 E_{Linha2} &= E_{Linha4} = E_{Linha6} = \frac{1}{2} C_{Linha2} V_{Marx}^2 = \frac{1}{2} \times 5 \times 101 \times 10^{-1} \times 3333,3^2 \\
 &= 2,81mJ \\
 E_{impulso} &= \frac{V_{Blumlein}^2}{Z_{out}} t_{impulso} = 0J \\
 E_{Blumlein} &= nE_{Linha2} = 3 \times 2,81 = 8,42mJ
 \end{aligned}
 \tag{3.59}$$

Em $t=2\delta$, na situação da imagem da Figura 3.40, tem-se:

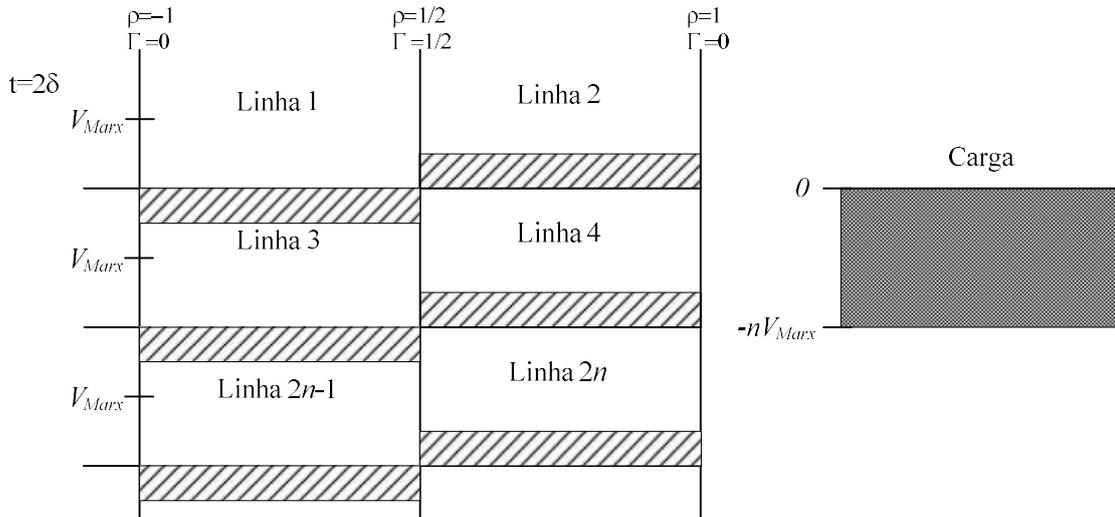


Figura 3.40 - Energia no gerador Blumlein em $t=2\delta$.

A energia armazenada no gerador em $t=3\delta$, e de acordo com a Figura 3.40, é dada pelo conjunto de equações (3.60):

$$\begin{aligned}
 E_{Linha1} &= E_{Linha3} = E_{Linha5} = \frac{1}{2} C_{Linha1} \left(\frac{1}{2} V_{Marx} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{8} \times 5 \times 101 \times 10^{-12} \times 3333,3^2 = 0,70mJ \\
 E_{Linha} &= E_{Linha4} = E_{Linha} = \frac{1}{2} C_{Linha} \left(\frac{1}{2} V_{Marx} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{8} \times 5 \times 101 \times 10^{-12} \times 3333,3^2 = 0,70mJ \\
 E_{impulso} &= \frac{V_{Blumlein}^2}{Z_{out}} \frac{t_{impulso}}{2} = \frac{10000^2}{300} \times \frac{50,575 \times 10^{-9}}{2} = 8,42mJ \\
 E_{Blumlein} &= nE_{Linha1} + nE_{Linha2} + E_{impulso} = 2,10 + 2,10 + 8,42 = 12,62mJ
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

A energia consumida pela carga é consumida durante o intervalo de tempo $t=] \delta; 3\delta[$.

E finalmente em $t=3\delta$, na situação da imagem da Figura 3.41, tem-se:

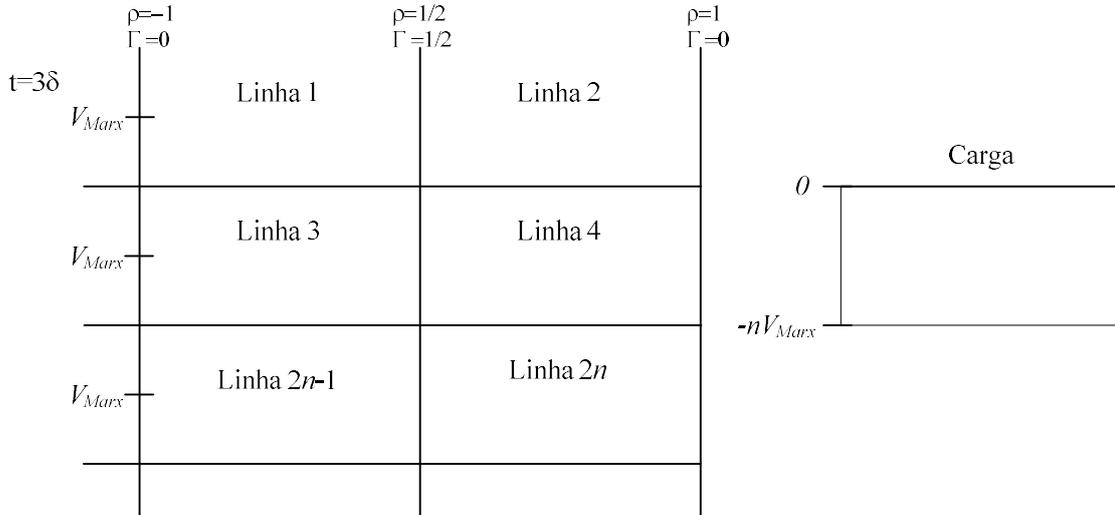


Figura 3.41 - Energia no gerador Blumlein em $t=3\delta$.

A energia armazenada no gerador em $t=3\delta$, e de acordo com a Figura 3.41, é dada pelo conjunto de equações (3.61):

$$\begin{aligned}
 E_{Linha1} &= E_{Linha3} = E_{Linha5} = 0J \\
 E_{Linha2} &= E_{Linha4} = E_{Linha} = 0J \\
 E_{impulso} &= \frac{V_{Blumlein}^2}{Z_{out}} \frac{t_{impulso}}{2} = 0J \\
 E_{Blumlein} &= 0J
 \end{aligned} \tag{3.61}$$

No final do impulso na carga, entre o intervalo de tempo $t=\delta$ e $t=3\delta$, ou seja durante 2δ , a energia consumida pela carga do gerador Blumlein, equação 3.49, tem-se:

$$E_{impulso} = \frac{V_{Blumlein}^2}{Z_{out}} t_{impulso} = \frac{10000^2}{300} \times 50,575 \times 10^{-9} = 16,86mJ \tag{3.62}$$

Ou seja, durante a descarga do gerador Blumlein, a carga consome a energia de 16,86mJ, que corresponde à energia armazenada no gerador Blumlein, equação (3.62).

Do trânsito de energia no gerador Blumlein conclui-se que durante o impulso do gerador de Marx, a linha é carregada e aplica-se um impulso na carga, ficando a linha carregada. No final a linha é descarregada e aplica-se outro impulso na carga, ficando a linha descarregada. A energia que o gerador de Marx põe na linha é igual à energia do impulso positivo mais a do impulso negativo, isto é, duas vezes a energia da linha carregada, ou seja 33,72mJ.

E também, a energia de cada impulso é igual à energia armazenada no gerador Blumlein, constituído por três estágios $n=3$ iguais, cada um constituído por 2 troços de cabo coaxial com 5m de comprimento, da equação (3.48), considerando C_{Linha1} igual a C_{Linha2} .

$$E_{Blumlein} = E_{impulso} = 2n \frac{1}{2} C_{Linha1} V_{Marx}^2 = 3 \times 5 \times 101 \times 10^{-12} \times 3333,3^2 \quad (3.63)$$

$$= 16,86mJ$$

3.2.5.2 Eficiência energética do gerador de Marx para o gerador Blumlein

No cálculo da eficiência energética entre geradores tem de se calcular a queda de tensão no impulso de tensão à saída do gerador de Marx, pela conservação de carga e considerando a tensão no final do impulso do gerador de Marx igual à tensão no gerador Blumlein, $V_{Marxf} = V_{Blumlein}$, e a tensão no início do impulso V_{Marxi} , tem-se que:

$$V_{Blumlein} = \frac{C_{Marx}}{C_{Marx} + C_{Blumlein}} V_{Marxi} \quad (3.64)$$

Onde C_{Marx} é a capacidade do gerador de Marx e $C_{Blumlein}$ é a capacidade do gerador Blumlein. Como a carga Z_{out} , durante a carga do gerador Blumlein, consome a mesma energia que este armazena, no caso de carga adaptada, considerou-se que:

$$C_{Blumlein} = 2 \times 2 \times 3 \times C_{Linha1} = 12 \times 5 \times 101 \times 10^{-12} = 6nF \quad (3.65)$$

Fazendo $V_{Marxi} = mV_{dc}$ e pela aplicação da equação (3.45) para V_{Marxf} , tem-se que a energia inicial e final no gerador de Marx pelas equações (3.66) é:

$$E_{Marxi} = \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marxi}^2 \quad (3.66)$$

$$E_{Marxf} = \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marxf}^2$$

Sendo que a energia enviada do gerador de Marx para o gerador Blumlein E_{MB} , obtida pela equação (3.67) é de:

$$E_{MB} = E_{Marxi} - E_{Marxf} \quad (3.67)$$

De onde a eficiência energética de transferência de energia entre os dois geradores é:

$$\eta = \frac{2E_{impulso}}{E_{MB}} \quad (3.68)$$

Como nem toda a energia E_{MB} , que é enviada para o gerador Blumlein é dissipada na carga sendo a restante perdas no sistema representado no circuito simplificado da Figura 3.42.

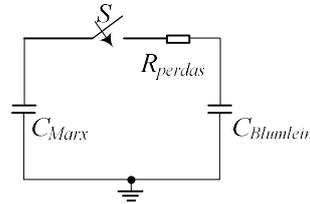


Figura 3.42 - Esquema simplificado do GHAT.

As perdas no sistema por aplicação do princípio da conservação da energia, pela aplicação da equação (3.69) tem-se:

$$\frac{1}{2}C_{Marx}V_{Marx_i}^2 = \frac{1}{2}C_{Marx}V_{Marx_f}^2 + \frac{1}{2}C_{Blumlein}V_{Marx_f}^2 + perdas \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow perdas = \frac{1}{2}C_{Marx}V_{Marx_i}^2 - \frac{1}{2}C_{Marx}V_{Marx_f}^2 - \frac{1}{2}C_{Blumlein}V_{Marx_f}^2 \quad (3.69)$$

3.2.6 Simulação com Componentes Ideais

Com o intuito de comprovar a caracterização teórica do gerador proposto, realizada ao longo deste capítulo, é efetuada a simulação do GHAT, utilizando o software PSPICE, considerando a utilização de componentes ideais e sem perdas.

Na Figura 3.43 apresenta-se o circuito implementado na simulação em condições aproximadamente ideais com impulso de tensão V_{Marx} , de largura igual a $2\mu s$ e período $10\mu s$, onde $V_0=V_{dc}$ é a fonte de alimentação do circuito de potência de amplitude $666,67V$, D_1 a D_5 díodos de potência do respectivo estágio com tensão inversa igual a $1kV$, IC tensão inicial dos condensadores de potência com amplitude $666,67V$, V_1 a V_{10} gerador de sinais de comando com forma de onda retangular de amplitude $1V$ (interruptores ligados) ou $0V$ (interruptores desligados), dos respectivos interruptores de potência ideais S_1 a S_{10} , C_1 a C_5 condensadores de potência de cada estágio de capacidade $660nF$, R_1 a R_5 resistências de limitação de corrente em cada estágio de valor igual a $0,1\Omega$, R_6 a R_{11} resistências para simular circuito aberto no respectivo ponto do circuito de valor igual a $1G\Omega$, R_{12} resistência de carga do gerador Blumlein de valor igual a 300Ω e T_1 a T_6 troços de cabo coaxial que compõem o gerador Blumlein com tempo de atraso $25ns$ e impedância característica 50Ω .

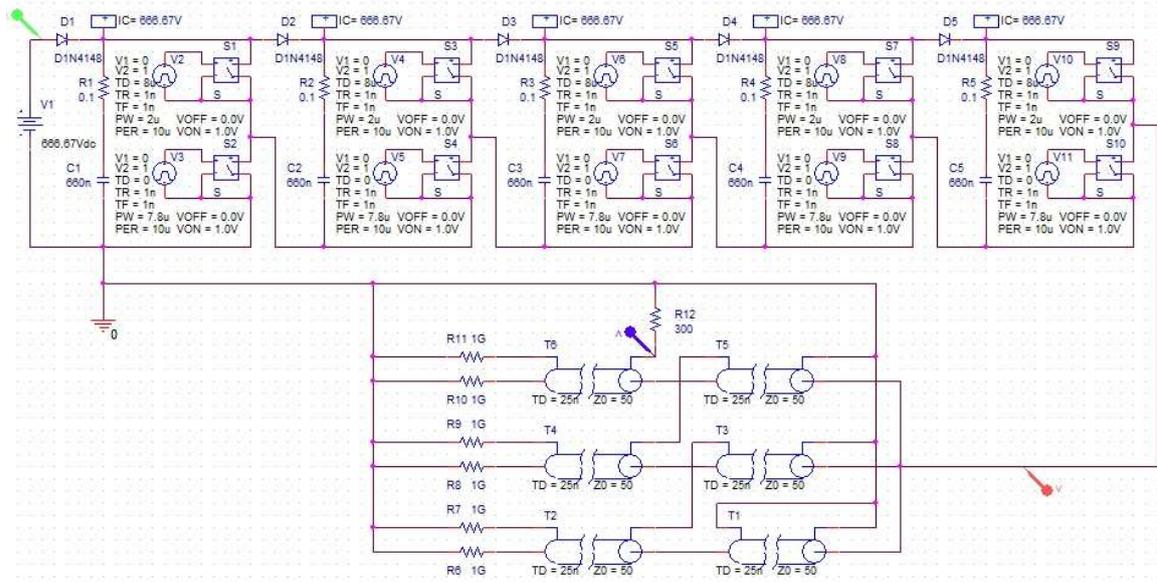
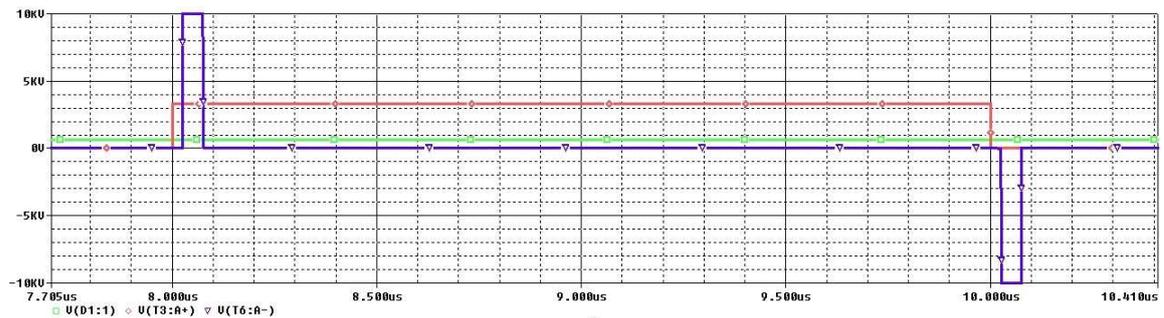
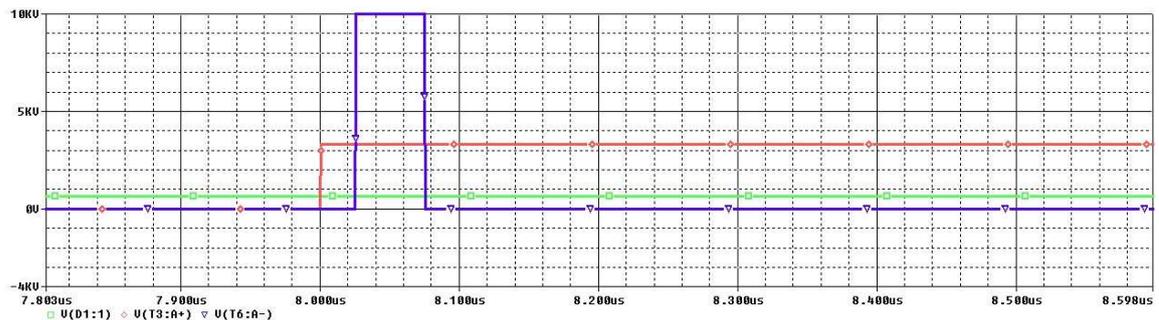


Figura 3.43 – Circuito do GHAT, simulado no PSPICE com componentes com características ideais.

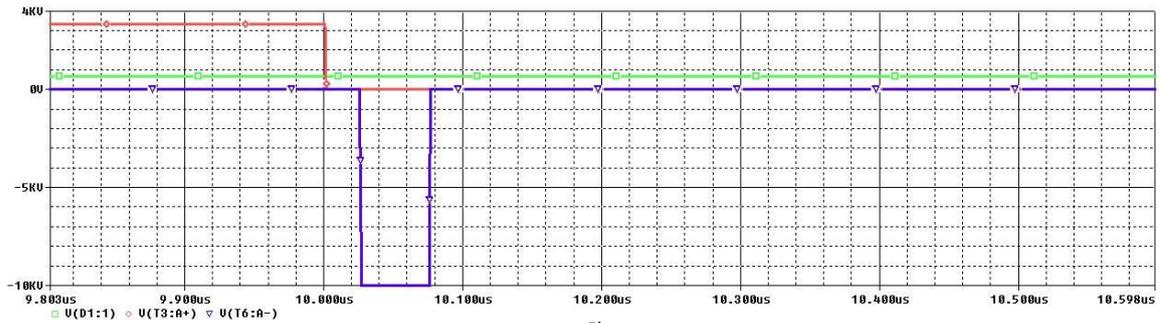
Na Figura 3.44 apresentam-se os resultados mais significativos da operação do circuito da Figura 3.43.



a) Impulso bipolar do GHAT, com V_{dc} (linha verde), V_{Max} (linha vermelha) e V_{out} (linha azul).



b) Pormenor impulso positivo, com V_{dc} (linha verde), V_{Max} (linha vermelha) e V_{out} (linha azul).



c) Pormenor impulso negativo, com V_{dc} (linha verde), V_{Marx} (linha vermelha) e V_{out} (linha azul).

Figura 3.44 – Resultados de simulação do circuito do GHAT, constituído por componentes ideais.

Os resultados de simulação presentes na Figura 3.44 mostram que a amplitude de tensão à saída do gerador de Marx, equação (3.1), e na carga do gerador Blumlein, equação (3.2), depende do número de estágios m , n que constituem o gerador de Marx e o gerador Blumlein respetivamente, considerando todos os componentes do circuito ideais, sem perdas de comutação ou por efeito de joule. Para os valores considerados no circuito de simulação $V_{dc}=666,67V$, tem-se $V_{Marx}=3,33kV$ a que corresponde $V_{out}=10kV$.

Os resultados de simulação obtidos com componentes do circuito considerados ideais confirmam os resultados teóricos descritos, impulsos de alta tensão quase retangulares de amplitude proporcional ao número de estágios do GHAT, $V_{out}=10kV$ e largura do impulso igual a 50ns.

3.3 Conclusões

Ao longo do Capítulo 3, foi proposto e analisado o funcionamento de um gerador Híbrido de alta tensão construído pela união de um gerador de Marx genérico com m estágios a um gerador Blumlein com n estágios, para aplicações biológicas. Foram definidos os requisitos do gerador assim como os seus limites de operação e a melhor estratégia para a sua construção.

Definida a topologia foi caracterizado em detalhe o seu funcionamento, foram definidas as características dos semicondutores que compõem o gerador de Marx, estudadas as consequências do seu disparo quando há uma falha de sincronismo e caracterizadas as perdas de condução e comutação dos MOSFETs. Foram definidas as características dos condensadores e calculada a capacidade ideal para que o decaimento da tensão seja inferior a determinado valor (1% a 10%).

Foi realizado ainda a modelação do gerador Blumlein, realizado o cálculo das impedâncias, o cálculo dos fatores de reflexão e transmissão, a influência de cada estágio sobre os outros estágios. Foram apresentadas as fórmulas genéricas de cálculo dos fatores anteriores e a influência de cada estágio sobre os outros estágios para um gerador Blumlein constituído por n estágios e dados alguns exemplos de aplicação da formula genérica para o caso particular de $n=2$ e $n=3$ estágios. Foi

apresentada a evolução gráfica das ondas de tensão para um gerador Blumlein com carga adaptada e apresentado o valor da tensão em cada ponto do gerador.

Finalmente foi realizado o balanço energético do GHAT, relação entre a energia armazenada nos sistemas Marx e Blumlein e energia dos impulsos na carga, e a simulação com componentes ideais para validar o estudo teórico efetuado.

4. Resultados Experimentais e de Simulação

4.1 Introdução

Neste capítulo é feita a validação experimental do GHAT descrito no Capítulo 3, com base na operação de um protótipo, construído com 5 estágios no gerador de Marx e 3 estágios na associação Blumlein. Apresentam-se as formas de onda dos testes experimentais com uma carga resistiva, equivalente aos sistemas biológicos, objetivo principal do trabalho desenvolvido.

São ainda apresentados resultados de simulação do circuito equivalente do GHAT, com recurso ao *software* PSPICE da Orcad, utilizando os componentes e características próximas do real para validação e estudo de algumas situações de funcionamento.

Apresenta-se a solução para cada das questões de investigação enunciadas no Capítulo 1.

Finalmente é feita o cálculo do trânsito de energia no gerador de Marx, e sua eficiência e eficácia.

4.2 Dimensionamento do Protótipo Laboratorial do GHAT

4.2.1 Gerador de Marx monopolar de impulsos positivos

O gerador de Marx do GHAT desenvolvido é constituído por 5 estágios, conforme se observa na Figura 4.1, sendo descrito o seu dimensionamento nesta secção.

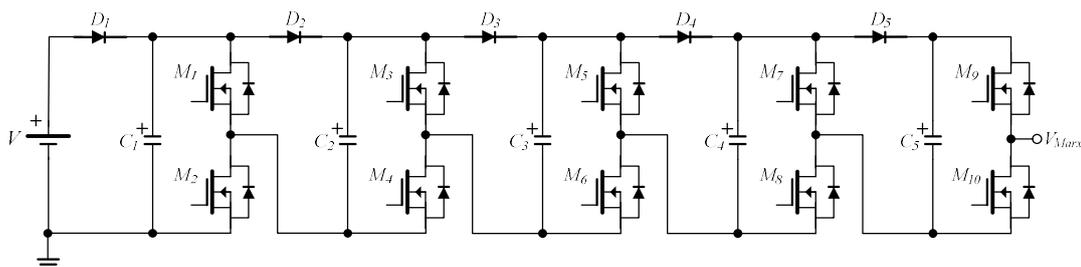


Figura 4.1 – Esquema simplificado do circuito de potência do gerador de Marx do GHAT (Figura 3.10).

O gerador de Marx é alimentado por uma fonte de alta tensão, pulsada, da marca *TDK-Lambda*, modelo: 102A–10kV–POS, que carrega os condensadores $C_{(1, \dots, 5)}$, de cada estágio do gerador de Marx com uma corrente máxima de 0,1A, para uma tensão à saída de 1kV.

Para dimensionamento dos MOSFETs representados na Figura 4.1, tiveram-se em conta as seguintes características principais: tensão nominal, corrente de pico, resistência à condução e tempo de comutação.

Para selecionar a tensão nominal dos interruptores teve-se em conta a tensão máxima que estes suportam de modo a minimizar o número de estágios do gerador de Marx, considerando um fator de segurança de 0,8.

Relativamente à máxima corrente de pico, para 3 estágios no gerador Blumlein, a impedância à saída do gerador de Marx, sabendo que $Z_0=50\Omega$ de cada cabo coaxial, é $16,67\Omega$. Então para uma tensão máxima dimensionada na carga igual a 10kV, a corrente máxima de pico é pela equação (3.46):

$$I_{pico} = \frac{V_{Marx}}{Z_{Blumlein}} = \frac{10000 / 3}{50 / 3} = 200 A \quad (4.1)$$

Optou-se pela tecnologia Si mas com reduzida resistência de condução para as tensões apresentadas, de forma a minimizar as perdas.

O tempo de comutação deve ser minimizado, como se viu no Capítulo 3, para que os impulsos de tensão sejam quase retangulares, o interruptor deve comutar o mais rápido possível (cerca de 10ns ou inferior).

Consideradas as características principais do interruptor a selecionar, foi selecionado o MOSFET com a referência *IXYS RF Power MOSFET* modelo: DE475-102N21A com os parâmetros apresentadas na Tabela 4.1. A tensão máxima de cada estágio é de 666,67V, para uma tensão de saída máxima do impulso a ser aplicado na Blumlein de $666,67 \times 5 = 3333,3V$.

Tabela 4.1 - Resumo das características consideradas mais importantes do MOSFET.

V_{DSS}	1000V
T_{on}	5ns
$R_{DS(ON)}$	0,45 Ω
I_{DM}	144A

As características apresentadas na Tabela 4.1, de acordo com Silva (1998) podem ser definidas como:

V_{DSS} – tensão de disrupção dreno-fonte a partir da qual o dispositivo entra na zona de avalanche, este valor atinge-se quando o campo elétrico longitudinal na zona de dreno é suficientemente intenso para produzir a multiplicação dos portadores por avalanche;

T_{on} – tempo de subida do MOSFET, tempo de passagem à condução;

$R_{DS(ON)}$ – resistência equivalente no funcionamento na zona de resistência constante, varia com a temperatura;

I_{DM} – valor limite para a máxima corrente de dreno admissível devido às limitações de potência dissipada.

Tendo em conta o valor da máxima corrente de pico calculada e o valor de I_{DM} apresentado na Tabela 4.1, em cada dispositivo de comutação foram colocados 2 MOSFETs em paralelo, em cada estágio, nas posições de impulso e carga. Não foi considerada nenhuma técnica auxiliar para distribuição das correntes nos dispositivos em paralelo, uma vez que os MOSFETs têm coeficiente de temperatura positivo, tendo havido atenção na disposição física dos dispositivos para não provocar diferenças de correntes entre os dois.

Os condensadores de armazenamento de energia do gerador de Marx $C_{(1, \dots, 5)}$, devem suportar a tensão nominal de cada estágio do gerador e ter a capacidade de armazenar a energia suficiente para satisfazer as necessidades energéticas do gerador Blumlein e dos impulsos que este produz na carga. Considerando que para um gerador Blumlein com 3 estágios iguais, cada um constituído por 2 troços iguais de cabo coaxial com capacidade 101pF/m e com 5m de comprimento, a energia armazenada no gerador Blumlein de acordo com a equação (3.48), é:

$$E_{Blumlein} = \frac{1}{2} C_{Blumlein} V_{Marx}^2 = 6 \times \frac{1}{2} \times 5 \times 101 \times 10^{-12} \times \left(\frac{10000}{3} \right)^2 = 16,83mJ \quad (4.2)$$

Que corresponde à energia entregue à carga em cada impulso, o dobro em cada impulso bipolar.

Tendo em conta estas restrições, os condensadores selecionados foram os do tipo 940C12P22K-F, da *CDE Cornell Dubilier*, de película não polarizados com uma tensão máxima DC de 1200V, sendo que cada um consiste na realidade de três condensadores associados em paralelo com valor 220nF, de forma a minimizar a indutância série interna e maximizar a corrente de pico disponível, ou seja, cada grupo de condensadores apresenta uma capacidade igual a 660nF. As principais características que estes condensadores apresentam são: taxa de variação da tensão elevada, pico de corrente elevada e indutância reduzida. Para os valores de tensão dimensionados a energia do gerador de Marx de acordo com a equação (3.45), é:

$$E_{Marx} = 5 \frac{1}{2} C_{(1, \dots, 5)} V_{dc}^2 = 5 \times \frac{1}{2} \times 660 \times 10^{-9} \times \left(\frac{10000}{5 \times 3} \right)^2 = 0,733J \quad (4.3)$$

Uma vez que se está a trabalhar com a transferência de energia de uma capacidade para outra, gerador de Marx para associação Blumlein, pela conservação de carga sabe-se que pela equação (3.64):

$$V_{Blumlein} = \left(\frac{\frac{660}{5} \times 10^{-9}}{\frac{660}{5} \times 10^{-9} + (12 \times 5 \times 101 \times 10^{-12})} \times \frac{10000}{3} \right) = 3187V \quad (4.4)$$

Como a tensão final no gerador de Marx é igual à tensão no gerador Blumlein, tem-se que a energia final no gerador de Marx, dada pela equação (3.66) é:

$$E_{Marx_f} = \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Blumlein}^2 = \frac{1}{2} \times \frac{660}{5} \times 10^{-9} \times (3187)^2 = 0,670J \quad (4.5)$$

sendo que a energia enviada para a linha Blumlein pela equação (3.67) é de:

$$E_{MB} = E_{Marx_i} - E_{Marx_f} = 0,733 - 0,670 = 63mJ \quad (4.6)$$

Logo, confirmando-se a condição $E_{Marx} \gg E_{Blumlein}$, pode-se concluir que o gerador de Marx tem capacidade para satisfazer as necessidades energéticas do gerador Blumlein e da respectiva carga.

Os díodos de potência utilizados na carga do gerador de Marx são do tipo D09E120 da *Infineon Technologies*, que apresentam como principais características: tensão inversa máxima de pico repetitivo igual a 1200V e restabelecimento rápido, tempo de recuperação inversa de cerca de 200ns e corrente em funcionamento contínuo direta de 9A.

4.2.1.1 Circuito de comando e disparo dos MOSFETs

Na Figura 4.2 apresenta-se o circuito de comando simplificado do GHAT, que pode dividir-se em quatro blocos principais, sendo que cada área assinalada na figura corresponde a uma área de referência isolada: a) Geração e envio dos sinais de disparo dos MOSFETs; b) Comando da fonte de alta tensão de alimentação do gerador de Marx; c) Alimentação dos estágios de disparo dos MOSFETs; d) Disparo dos MOSFETs.

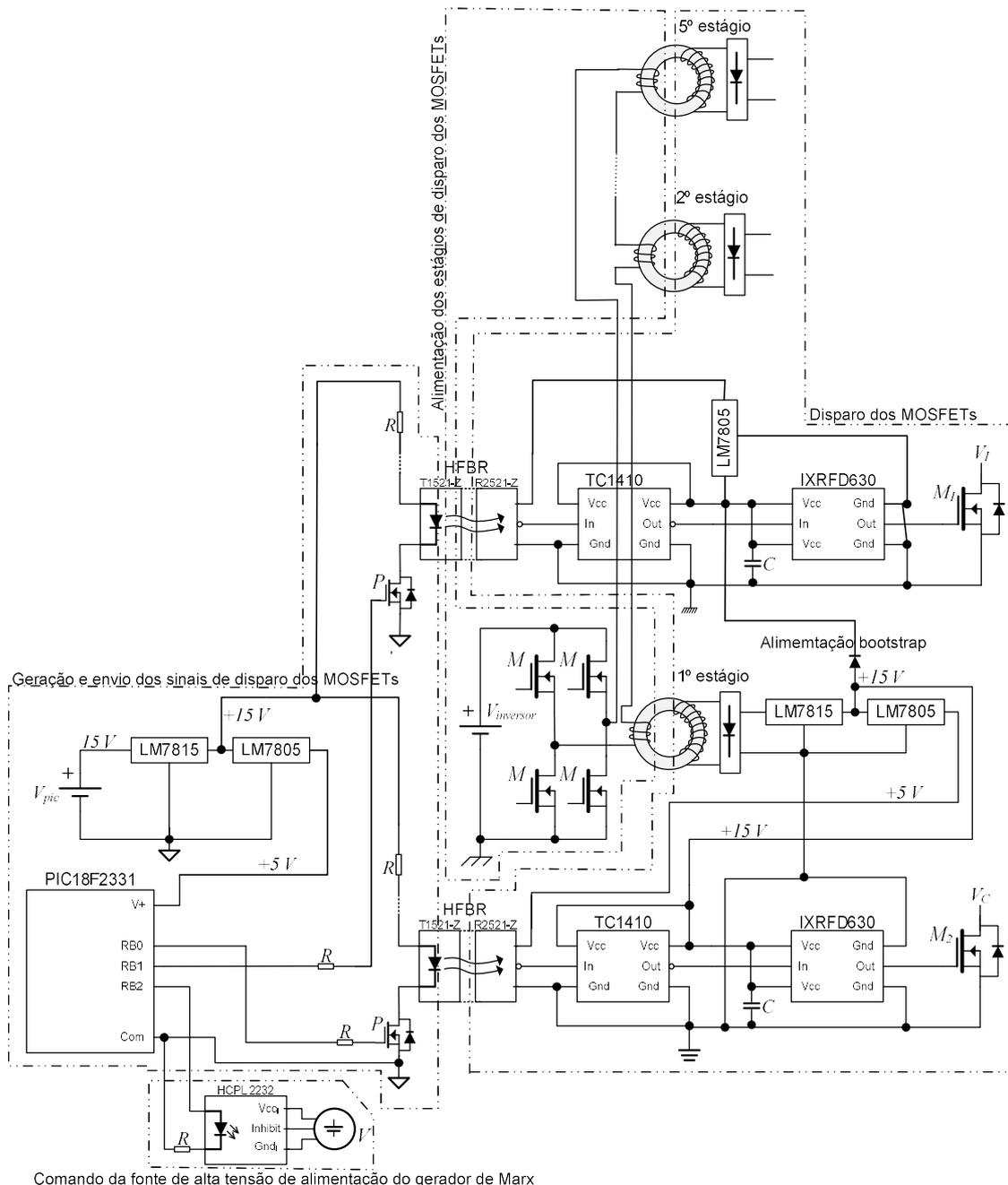


Figura 4.2 – Circuito simplificado de comando e de disparo dos MOSFETs.

Na Figura 4.2 a referência da fonte de alta tensão que alimenta o gerador de Marx é a mesma da referência do seu controlo Gnd_i, dos MOSFETs $M_{(2, \dots, 10)}$, de carga de todos os estágios apenas durante a carga dos condensadores $C_{(1, \dots, 5)}$, conforme se pode ver na Figura 3.10a). Durante o impulso de tensão do gerador de Marx há a registar que a referência é a mesma dos MOSFETs de acordo com os seguintes pares (M_1, M_4); (M_3, M_6); (M_5, M_8); (M_7, M_{10}); a referência dos MOSFETs $M_{(1, 3, \dots, 9)}$, está isolada da referência dos MOSFETs $M_{(2, 4, \dots, 10)}$ do mesmo estágio, através de um circuito *bootstrap*.

a) Geração e envio dos sinais de disparo dos MOSFETs

Os sinais de comando para disparo dos MOSFETs, do circuito de potência do gerador de Marx, são gerados por um microcontrolador PIC18F2331 da *Microchip*. Na Figura 4.3 mostra-se um exemplo dos dois sinais gerados, com uma amplitude de 5V, respectivamente, o sinal de carga, para os M_{2m} , e o sinal de impulso, para os M_{2m-1} , onde se pode ver o tempo morto introduzido de cerca $10\mu\text{s}$ para evitar a condução simultânea entre os dois dispositivos, foi selecionado um intervalo de tempo tão longo para inserir o sinal de *inhibit* (i. e. de inibição) da fonte de alta tensão. O sinal de inibição durante o sinal de impulso de tensão V_{Marx} é enviado à fonte de alimentação do circuito de potência de amplitude aproximadamente igual a 5V, para garantir que a energia do impulso de tensão à saída do gerador de Marx é proveniente unicamente dos condensadores de potência do circuito, e para limitar interferências da fonte durante o impulso.

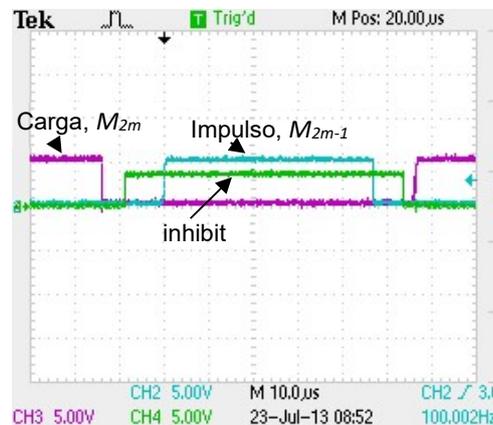


Figura 4.3 - Sinais de comando de carga e impulso do gerador de Marx da Figura 4.1, com um período de 10ms e uma largura de impulsos de $50\mu\text{s}$ com um tempo morto de $10\mu\text{s}$.

A referência onde está colocado o microcontrolador foi isolada do resto do circuito para aumentar a imunidade às comutações dos MOSFETs do Marx. Deste modo, os sinais são enviados para os circuitos de disparo dos MOSFETs por fibra-ótica que garante o isolamento galvânico e a imunidade ao ruído eletromagnético conduzido. Os emissores de fibra ótica, que comandam cada grupo de MOSFETs $M_{(1, 3, \dots, 9)}$ e MOSFETs $M_{(2, 4, \dots, 10)}$ de cada estágio, HFBR T1521-Z da *Avago Technologies*, do tipo LED, estão associados em série, comandados por um único transistor bipolar, de forma a garantir a simultaneidade de comutação do respetivo grupo de MOSFETs.

A largura do impulso do gerador de Marx considerada foi de $50\mu\text{s}$, que determina o tempo entre o impulso positivo e negativo aplicados na carga, para uma frequência de 100Hz.

b) Comando da fonte de alta tensão de alimentação do gerador de Marx

O sinal de *inhibit* da fonte de alimentação está isolado através de um *optocoupler* HCPL 2232 da *Avago Technologies*. Este *optocoupler* recebe o sinal do gerador de sinais com amplitude de tensão

5V, como se observa na Figura 4.2, e transfere-o para o comando da fonte com uma amplitude de tensão de 15V.

c) Alimentação dos estágios de disparo dos MOSFETs

A alimentação dos estágios é realizada através de transformadores de isolamento, com relação de transformação 6:18, do tipo toroidal, que são alimentados por um inversor de alta frequência 50kHz, ligado a uma fonte de alimentação isolada com amplitude de tensão de 15V. Os secundários destes transformadores estão ligados a uma regulação de tensão que disponibiliza os 15V e os 5V para os circuitos de disparo dos MOSFETs.

Considerando que cada estágio do gerador de Marx é constituído por uma meia ponte de MOSFETs, o transformador toroidal alimenta o MOSFET debaixo da meia ponte, o de carga dos condensadores, sendo que o MOSFET de cima da meia ponte, o de impulso, é alimentado por um díodo de alta tensão, pela técnica de *Bootstrap* [Canacsinh et al., 2007; Redondo et al., 2005b].

d) Disparo dos MOSFETs

O circuito de disparo de cada um dos MOSFETs, modelo DE475-102N21A, tem como objetivo pegar no sinal de comando recebido pelos recetores de fibra-ótica, e dar-lhe características em tensão e corrente de forma a se conseguir carregar a capacidade de entrada do MOSFET no tempo desejado, cerca de 5ns, segundo o fabricante.

Por fim, os sinais de comando das portas dos MOSFETs isolados por fibra ótica chegam à *driver* TC1410N, esta *driver* de alta velocidade permite transformar os sinais lentos (com tempo de subida de cerca de 700ns) provenientes da fibra ótica num sinal mais rápido (com tempo de subida inferior a 100ns), Figura 4.4, permite também elevar a amplitude de tensão dos sinais de 5V para uma amplitude de tensão de 15V, de modo a entregar à *driver* IXRFD630 um sinal adequado para o normal funcionamento dos MOSFETs.

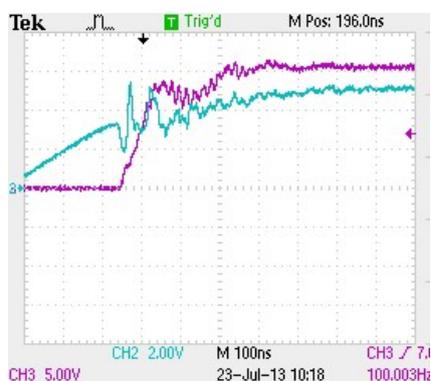


Figura 4.4 - Sinais de comando da gate dos MOSFETs à entrada (linha azul, ganho vertical 2V/div) e à saída (linha roxa, ganho vertical 5V/div) da driver TC1410N, ganho horizontal 100ns/div, $f=100\text{Hz}$.

Para o circuito de disparo foi usada uma *driver* específica, IXRFD630. As principais características da *driver* IXRFD630, apresentam-se na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Resumo das características principais da IXRFD630.

Compatível com o MOSFET	DE475-102N21A
Pico da corrente de saída	30A pico
Tensão de alimentação	8 até 30V
Tempo de subida e de descida	< 4ns
Impedância de saída	Baixa

Em torno dos terminais V_{cc} da *driver* IXRFD630 foi colocado um conjunto de condensadores de capacidade $10\mu\text{F}$ (condensadores de $4,7\mu\text{F}$, 470nF , 100nF , 10nF , 1nF), conforme indicação do fabricante. A função destes condensadores é fornecer à *driver* no momento da comutação dos MOSFETs uma corrente de pico de 30A, para poder entregar na gate de cada um, um sinal de comando com tempo de subida e tempo de descida inferior a 4ns, e o MOSFET comutar em cerca de 5ns.

Os condensadores utilizados no circuito de comando dos MOSFETs de potência são condensadores *tantalum*, porque estes são condensadores de baixa indutância, baixa resistência e têm características para fornecer elevados impulsos de corrente.

4.2.2 Gerador Blumlein

O gerador Blumlein utilizado neste trabalho é constituído por três estágios, cada estágio tem dois troços de cabo coaxial URM43 de tensão máxima 4kV_{dc} , impedância característica 50Ω , capacidade 101pF/m , velocidade nominal de propagação 66%. Cada troço de cabo coaxial foi cortado com 5m de comprimento (i. e. 25ns de tempo de transmissão), enrolados em núcleos de ferrite TX100/66/24-3C90 do tipo toroidal. Esta forma de núcleo foi selecionada porque é caracterizada por grande homogeneidade transversal, circuito magnético fechado (i. e. menor fluxo de fugas) e maior indutância por espira, e dadas as suas características físicas permitem que facilmente se consiga enrolar o cabo coaxial selecionado. Inicialmente começou-se por usar o cabo coaxial RG213 caracterizado por ser um cabo de tensão nominal 10kV mas que apresenta o inconveniente de ser um cabo rígido que não conseguimos enrolar em torno dos núcleos de ferrite adquiridos.

Na Figura 4.5 apresenta-se o circuito elétrico do gerador Blumlein utilizado.

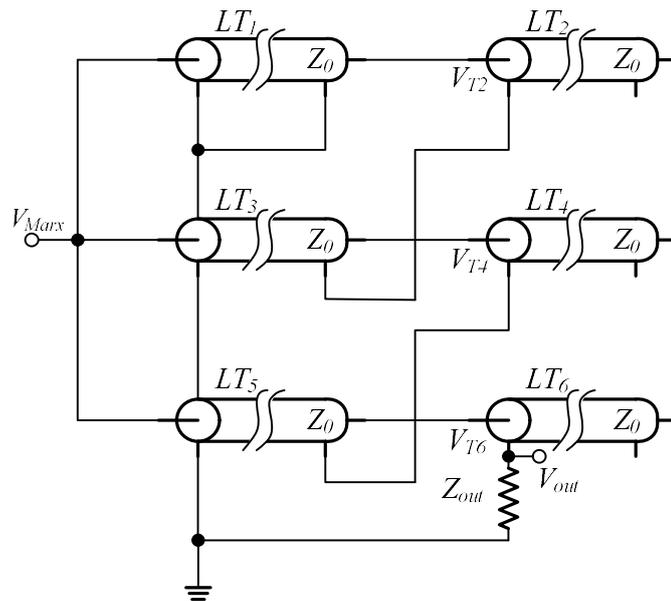


Figura 4.5 – Circuito de potência do gerador Blumlein do GHAT.

Como impedância da carga, Z_{out} , foram utilizadas três resistências não indutivas, BPC10 da *BI Technologies* de 100Ω , em série, o que perfaz $Z_{out}=300\Omega$, para simular a carga biológica.

Como foi descrito no ponto 3.2.3, para que a transferência de energia do gerador Blumlein para a carga seja máxima, a impedância da carga deve estar adaptada com a impedância do gerador Blumlein e a impedância de modo secundário Z_2 , respeitar a seguinte relação $Z_2 \gg Z_{out}$. Para o circuito da Figura 4.5, a carga está adaptada se a sua impedância for igual à impedância do gerador. Pela equação (3.34):

$$Z_{out} = 2nZ_0 = 2 \times 3 \times 50 = 300\Omega \quad (4.7)$$

Como descrito anteriormente, a impedância de modo secundário Z_2 , tem influência na forma e amplitude do impulso de tensão a entregar à carga [Rossi et al., 2006]. De modo a calcular o seu valor aproximado a partir da equação (3.13), foram medidos, com um equipamento LCR, marca *Agilent Technology*, modelo U1733C: a indutância do enrolamento exterior ao ligar os pontos de medida do aparelho aos terminais do cabo desligado de qualquer fonte de energia depois de enrolado em torno dos núcleos de ferrite; e a capacidade parasita entre a entrada da linha passiva, condutor exterior, e o plano de massa. Os valores registados foram:

$$L = 8,4mH$$

$$C = 475pF$$

O valor da impedância Z_2 , por aplicação da equação (3.35) é:

$$Z_2 = \sqrt{\frac{8,4 \times 10^{-3}}{475 \times 10^{-12}}} = 4,2 \text{ k}\Omega$$

Segundo Rossi et al. (2006), o valor da impedância Z_2 , deve ser o mais alto possível, sendo que o valor apresentado é cerca de 14 vezes aproximadamente, o valor da impedância de carga do gerador Blumlein, ou seja, por cada 14A que deveria chegar à carga, 1A é consumido pela impedância de modo secundário do gerador.

Comparando o resultado da equação anterior com os resultados apresentados no gráfico da Figura 3.22, conclui-se que o valor calculado corresponde a uma distância ao plano de massa aproximadamente igual a 3 cm, na montagem do protótipo laboratorial a distância considerada foi de 20 cm aproximadamente a que corresponde $Z_2=5,5\text{k}\Omega$.

4.3 Simulação do GHAT tendo em conta as Características Reais do Circuito

A Figura 4.6, apresenta o circuito equivalente do circuito real do GHAT, implementado no software PSIPICE, com M1 a M10 MOSFETs DE475-102N21A com o modelo fornecido pelo fabricante para simulação neste programa, D1 a D15, díodos de estágio e díodos roda livre de cada MOSFET, com modelo equivalente modificado baseado no D1N4148, com tensão inversa de pico definida igual a 1000V.

Foi usada uma fonte de tensão V0 para simular a fonte de tensão de alimentação do circuito de potência, V1 a V10 geradores de tensão de onda quadrada que representam de forma simples o circuito de comando das gates dos MOSFETs com os seguintes parâmetros: MOSFETs de impulso M_{2m-1} , V1=0V, V2=15V, TD=48 μ s, TR=5ns, TF=5ns, PW=2 μ s e PER=50 μ s; MOSFETs de carga dos condensadores M_{2m} , V1=0V, V2=15V, TD=0 μ s, TR=5ns, TF=5ns, PW=47 μ s e PER=50 μ s; C1 a C5 conjunto de condensadores de estágio do gerador de Marx, L1 a L5 indutâncias que representam a indutância de cada condensador de cada estágio do gerador de Marx e a indutância dos respectivos condutores, R18 resistência de proteção da fonte de alimentação do circuito de potência, L6 indutância dos condutores e da fonte de alimentação, T1 a T6 troços de cabo coaxial equivalente ao cabo coaxial utilizado $Z_0=50\Omega$, $L=250\text{nH/m}$, $C=101\text{pF/m}$, R2 a R7 resistências de elevada impedância que representam um circuito aberto de valor $1\text{G}\Omega$, L16 e L17 indutâncias que representam as indutâncias de modo secundário Z_2 do gerador Blumlein, R1 resistência da carga do GHAT.

A simulação foi feita com um valor de tensão superior ao real $V=900V$, em vez de $666,67V$, de forma a compensar a queda de tensão na resistência $R18$ e bobine $L6$ de saída da fonte que carrega os condensadores de potência, usadas na simulação para modelar o cabo de ligação.

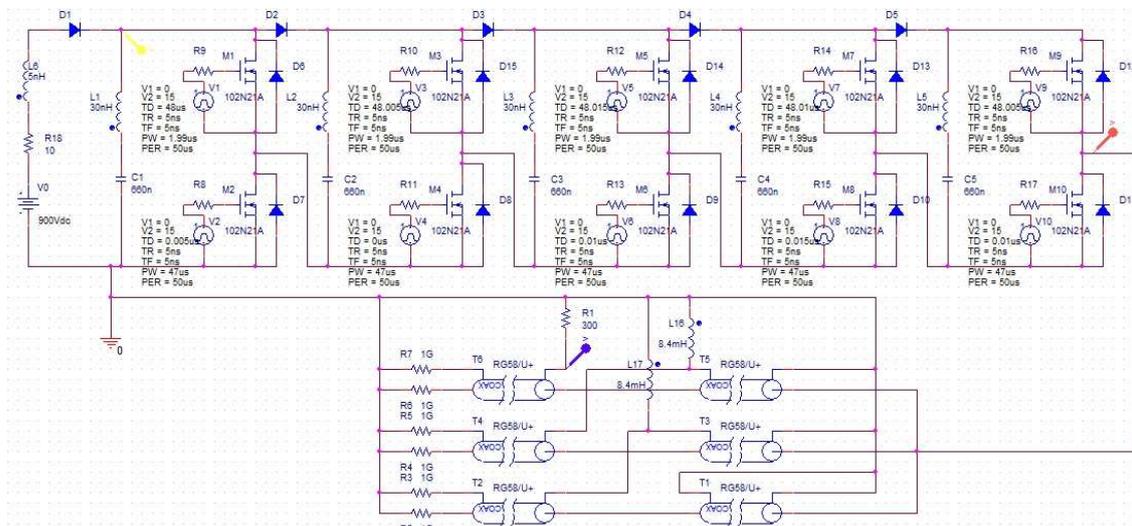


Figura 4.6 – Circuito de simulação no PSPICE do GHAT com características equivalentes às reais.

Na Figura 4.7, observa-se a tensão no primeiro condensador, V_{C1} , a tensão à saída do Marx, V_{Marx} , aplicada à linha, e a tensão na carga V_{out} .

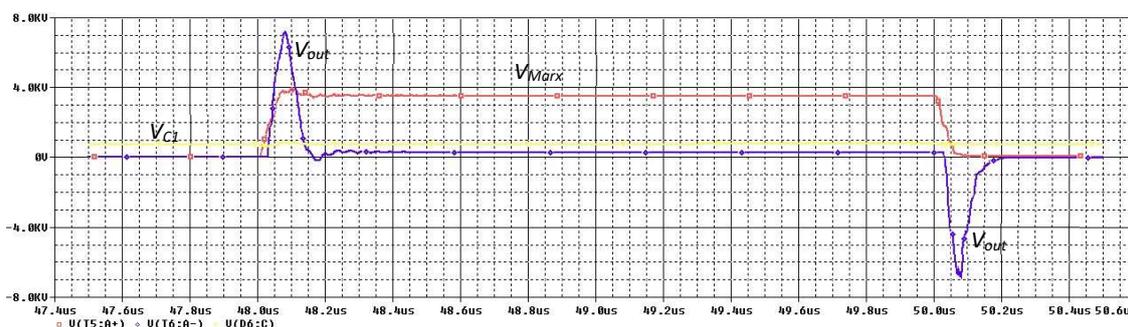


Figura 4.7 – Forma de onda de tensão no primeiro estágio do gerador de Marx, linha amarela; à saída do gerador de Marx, linha vermelha; e forma de onda de tensão na carga do gerador GHAT, linha azul, ganho vertical $1kV/div$, ganho horizontal $200ns/div$.

Da análise da Figura 4.7, verifica-se que a forma de onda de tensão à saída do Gerador de Marx, V_{Marx} , tem um tempo de subida e descida, superior ao apresentado no ponto 3.2.6, aproximadamente de $50ns$, Figura 3.42. Esta característica tem grande influência na forma de onda de tensão, V_{out} , que é quase triangular em vez de ser retangular como na Figura 3.42. Relativamente à amplitude da forma de onda verifica-se uma queda de tensão aproximada de $1/3$. A simulação efetuada neste ponto representa o caso mais próximo do que acontece na realidade. Estas diferenças serão mais detalhadas e analisadas aquando da apresentação dos resultados experimentais na próxima secção.

4.4 GHAT

4.4.1 Sinais de comando nas portas dos MOSFETs

Na Figura 4.8 apresentam-se as formas de onda de comando das *gates* dos MOSFETs de um estágio genérico do gerador de Marx, onde se dá ênfase ao tempo morto t_m , que se verifica entre a passagem ao corte ou à condução entre cada grupo de MOSFETs, o tempo morto considerado foi um valor aproximado de cerca de $10\mu s$, para acomodar o sinal de inibição da fonte de alimentação, conforme se mostra na Figura 4.3, e frequência dos sinais de comando aproximada de $f=100Hz$.

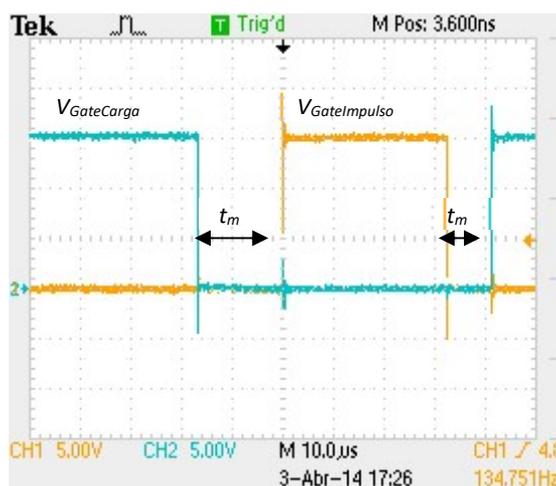


Figura 4.8 – Forma de onda na gate dos MOSFETs que compõem o gerador de Marx, CH1 na gate dos MOSFETs de impulso e CH2 na gate dos MOSFETs de carga dos condensadores, ganho vertical 5V/div, ganho horizontal $10\mu s$ /div.

Para se responder à questão de investigação 3) tendo em conta o bloco de Geração e envio dos sinais de disparo dos MOSFETs da Figura 4.2, na qual se mostra que para disparo dos MOSFETs de potência são gerados dois sinais de comando independentes, um para os MOSFETs de geração de impulso e outro para os de carga dos condensadores de potência, isolados do circuito de potência através de dois circuitos com cinco emissores de fibra ótica, um para cada estágio do gerador de Marx, ligados em série e comandados por um transistor bipolar em montagem base comum.

Na Figura 4.9 apresentam-se as formas de onda dos sinais de comando onde se amplifica os tempos de subida da tensão nas *gates* dos MOSFETs, para os MOSFETs de impulso e de carga. Estas formas de onda foram registadas por um osciloscópio da *Tektronix* TDS 2024 de massas isoladas.

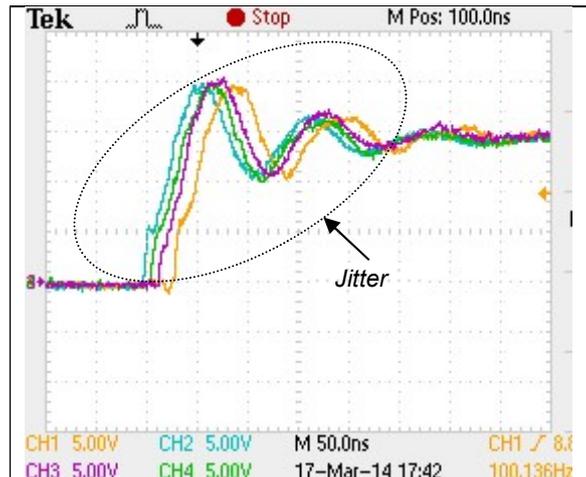


Figura 4.9a) – Na gate dos MOSFETs que fazem o impulso M_{1, 3, 5, 7, 9}.

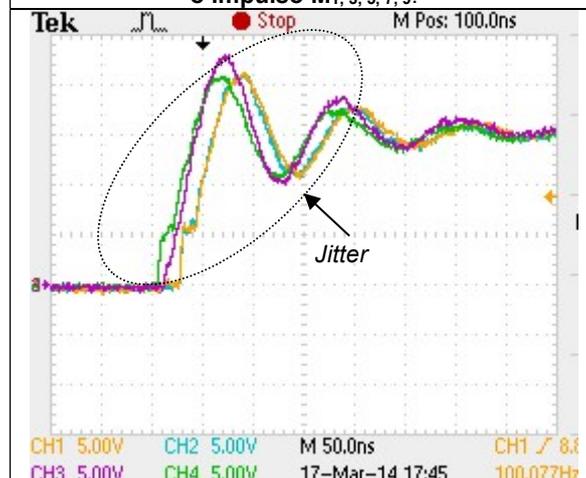


Figura 4.9b) – Na gate dos MOSFETs que fazem a carga dos condensadores M_{2, 4, 6, 8, 10}.

Figura 4.9 – Formas de onda dos impulsos na gate dos MOSFETs do gerador de Marx, ganho vertical 5V/div, ganho horizontal 50ns/div.

Em ambos os circuitos de impulso e carga, as formas de onda dos impulsos de tensão nas *gates* dos MOSFETs observa-se uma dispersão temporal, ou *jitter*, entre os sinais. Este fenómeno tem origem principalmente nos recetores de fibra de ótica, sendo crucial no tempo de subida e descida da tensão à saída do gerador de Marx, que por sua vez vai afetar a forma de onda da tensão na carga.

4.4.2 Formas de onda de tensão V_{Marx} e V_{out}

De forma a responder à questão de investigação 1) registaram-se na Figura 4.10 os sinais das formas de onda de tensão à saída do gerador de Marx e na carga do GHAT, V_{Marx} e V_{out} respetivamente, com 5 estágios no gerador de Marx e 3 estágios no gerador Blumlein, considerando na carga uma resistência não indutiva de valor, $Z_{out}=300\Omega$. Estas formas de onda de tensão foram registadas para um valor de amplitude por estágio de cerca de 500V para evitar que possíveis avarias no circuito de potência devido ao *overshoot* que se verifica, desta forma o valor de amplitude de tensão à saída do gerador de Marx é cerca de 2500V e largura de impulso 60 μ s. A queda de tensão que se verifica no impulso de tensão V_{Marx} é devida à falta de calibração das pontas de prova.

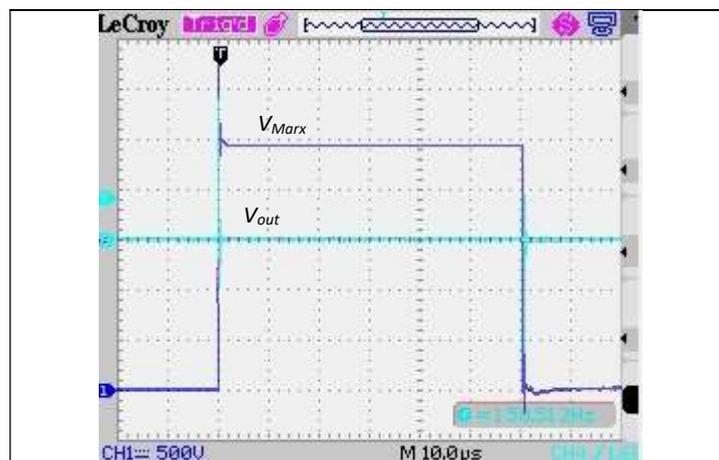


Figura 4.10a): Ganho horizontal: 10 μ s/div
Ganho vertical: V_{Marx} 500V/div, V_{out} 2kV/div.



Figura 4.10b): Ganho horizontal: 100ns/div
Ganho vertical: V_{Marx} 500V/div, I_{Marx} 50A/div, V_{out} 2kV/div.

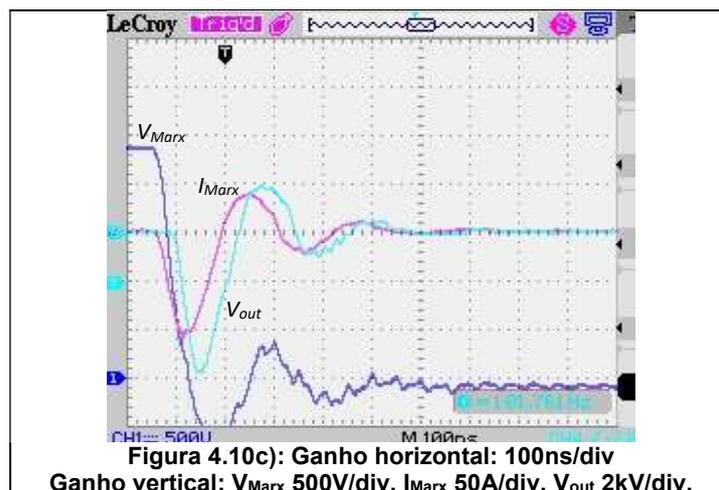


Figura 4.10 – Formas de onda de tensão V_{Marx} (azul escuro), I_{Marx} (roxo) e V_{out} (azul claro).

Na Figura 4.10a), observam-se os impulsos de tensão V_{Marx} e V_{out} , onde se destaca o impulso positivo na carga ($\approx 1500V$), originado pela carga da linha Blumlein pelo gerador de Marx, e o impulso negativo na carga ($\approx -1500V$), originado pela descarga da linha Blumlein através do gerador de Marx. A Figura 4.10b) e Figura 4.10c) mostra o zoom da região do tempo de subida e descida da tensão do Marx, onde se observa ainda a corrente com que o gerador de Marx carrega e descarrega a linha Blumlein I_{Marx} , e a forma de onda da tensão na carga, impulso positivo e negativo, respetivamente.

A análise das imagens da Figura 4.10 mostra como um gerador de Marx de impulsos monopolares gera em cada período T um impulso de alta tensão positivo e outro negativo, pela variação instantânea da amplitude dos impulsos de tensão produzidos pelo gerador de Marx.

Na Tabela 4.3 apresenta-se um resumo das características das formas de onda da Figura 4.10.

Tabela 4.3 – Resumo das características principais dos impulsos de tensão V_{Marx} , I_{Marx} e V_{out} .

Impulso	V_{Marx}	I_{Marx} (positivo)	I_{Marx} (negativo)	V_{out} (positivo)	V_{out} (negativo)
Amplitude	$\approx 2400V$	$\approx 120A$	$\approx 100A$	$\approx 6400V$	$\approx 5600V$
Largura de impulso	$\approx 60\mu s$	$\approx 100ns$	$\approx 100ns$	$\approx 100ns$	$\approx 100ns$

Os valores registados na Tabela 4.3 correspondem à tensão de patamar do impulso do Marx, V_{Marx} , valores de pico da corrente de Marx I_{Marx} e o valor de pico da tensão de saída V_{out} . Neste caso, os impulsos positivo e negativo de tensão encontram-se separados por cerca de $60\mu s$, valor do tempo do impulso do gerador de Marx, que pode ser programado. Para o valor de amplitude de tensão à saída do gerador de Marx registado na forma de onda da figura anterior, $V_{Marx}=2400V$, deveria corresponder um impulso de tensão na carga retangular de amplitude, $V_{out}=7200V$, e largura de $50ns$. A diferença na forma e amplitude do impulso verificado é devida às perdas de modo secundário do gerador Blumlein e às características do impulso de tensão à saída do gerador de Marx.

4.5 Modelação do GHAT

Os resultados de simulação e experimentais foram recolhidos de acordo com:

Os testes de simulação do GHAT, foram realizados para valores de amplitude de tensão por estágio para, entre os 500V e os 700V, e largura de impulso de tensão no gerador de Marx de $2\mu\text{s}$, para que se possam analisar os resultados em cada figura para um impulso bipolar completo na carga.

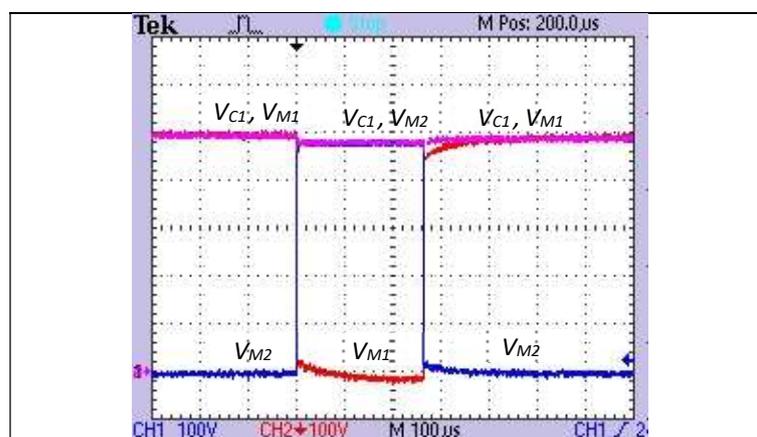
Os testes experimentais do GHAT foram realizados para valores de amplitude de tensão por estágio para entre os 500V e os 700V, e largura de impulso de tensão no gerador de Marx de $60\mu\text{s}$, para um gerador Blumlein constituído por 6 troços de cabo coaxial de 5m cada. Como carga do GHAT foi utilizada uma impedância não indutiva de valor adequado ao ensaio pretendido.

4.5.1 Circuito de simulação

Tendo em consideração o circuito da Figura 4.6, circuito equivalente do GHAT para simulação no programa PSPICE da OrCAD, com as condições e parâmetros de funcionamento descritos no ponto 4.3, de modo a obterem-se os resultados de simulação reais de acordo com os alcançados na Figura 4.7. Nos pontos seguintes deste capítulo mostram-se as formas de onda de tensão recolhidas durante os ensaios efetuados em laboratório e comparam-se com os resultados obtidos na simulação.

4.5.2 Formas de onda de tensão em cada estágio do Gerador de Marx

Na Figura 4.11, observam-se as formas experimentais de onda de tensão no 1º estágio do gerador de Marx com $V_{C1}=500\text{V}$.



a) Formas de onda de tensão aos terminais do condensador C_1 e dos MOSFETs M_2 e M_1 .

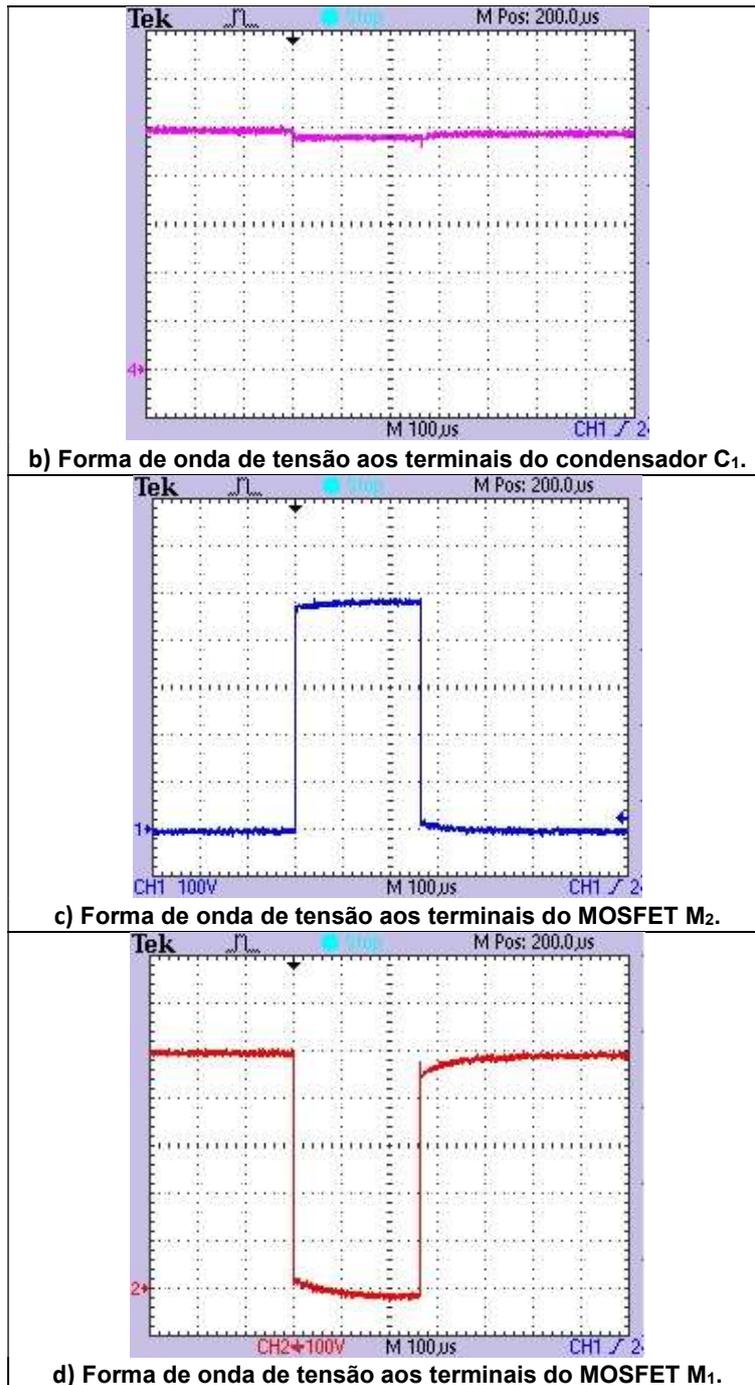


Figura 4.11 - Formas de onda de tensão no 1º estágio do Gerador de Marx com ganho vertical 100V/div e ganho horizontal 100µs/div.

Na Figura 4.12 mostram-se os resultados de simulação correspondentes aos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais efetuados com o GHAT.

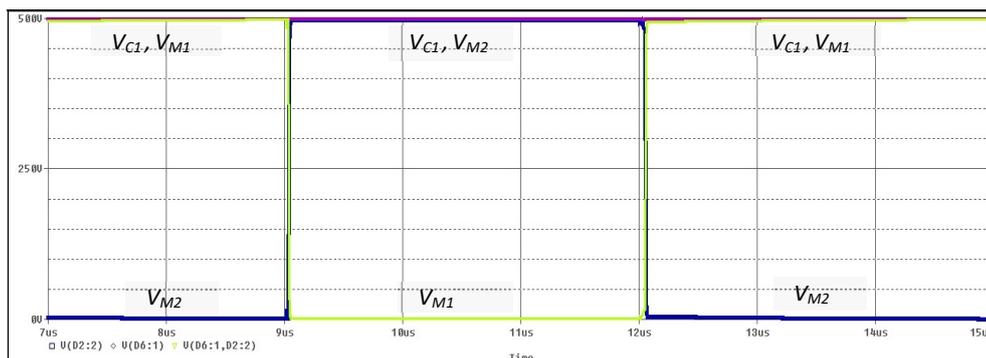


Figura 4.12 - Simulação das formas de onda de tensão no 1º estágio do gerador de Marx, correspondentes às formas de onda da Figura 4.11 ganho vertical 50V/div e ganho horizontal 1µs/div.

Da análise das formas de onda da Figura 4.11, pode-se verificar que os resultados obtidos experimentalmente são similares aos resultados obtidos na simulação do circuito, Figura 4.12, sendo as formas de onda de tensão no condensador e nos terminais dos MOSFETs quase retangulares. De modo a observar um período completo das formas de onda selecionadas, foi selecionada uma base de tempo que não permitiu a verificação dos tempos mortos na comutação entre o MOSFET M_1 e M_2 . O facto mais importante que se pode verificar nestes resultados é que a queda de tensão nos condensadores do circuito de potência é reduzida dados os parâmetros do gerador de Marx e da linha, conforme descrito anteriormente.

Na Figura 4.13 mostra-se o andamento experimental e simulado da tensão aos terminais do condensador do 1º estágio em sincronismo com a forma de onda de tensão à saída do gerador de Marx, onde se observa que a forma de onda de tensão no condensador C_1 no momento da comutação dos MOSFETs tem uma queda de tensão reduzida. O circuito experimental foi testado com a amplitude da tensão nos condensadores $V_C=500V$, para proteção dos semicondutores devido ao *overshoot* que se verifica na forma de onda de tensão à saída do gerador de Marx. Pode observar-se uma queda de tensão de cerca de 40V na tensão do condensador, Figura 4.13a), durante o envio de energia do gerador de Marx para a linha Blumlein.

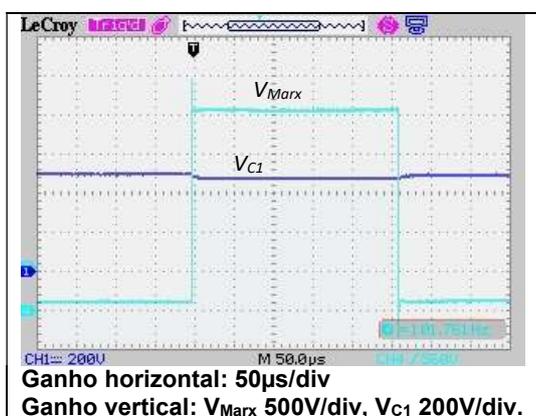


Figura 4.13a) Formas de onda de tensão aos terminais do condensador C_1 (azul escuro), e à saída do gerador de Marx (azul claro).

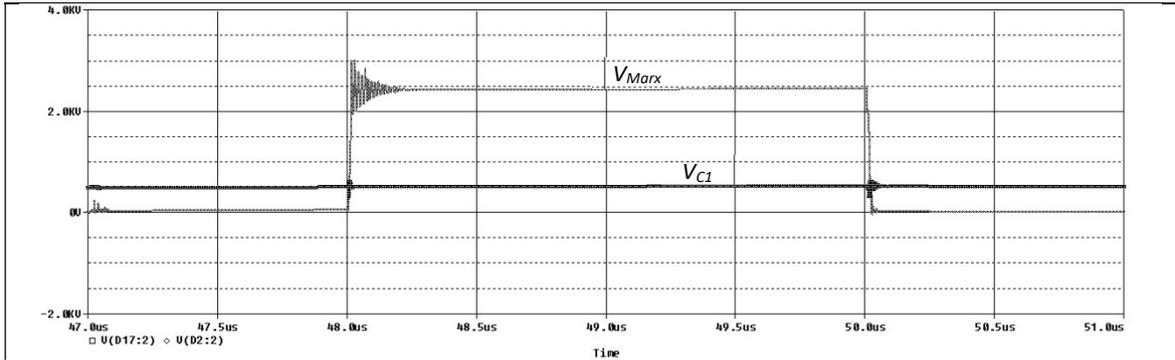
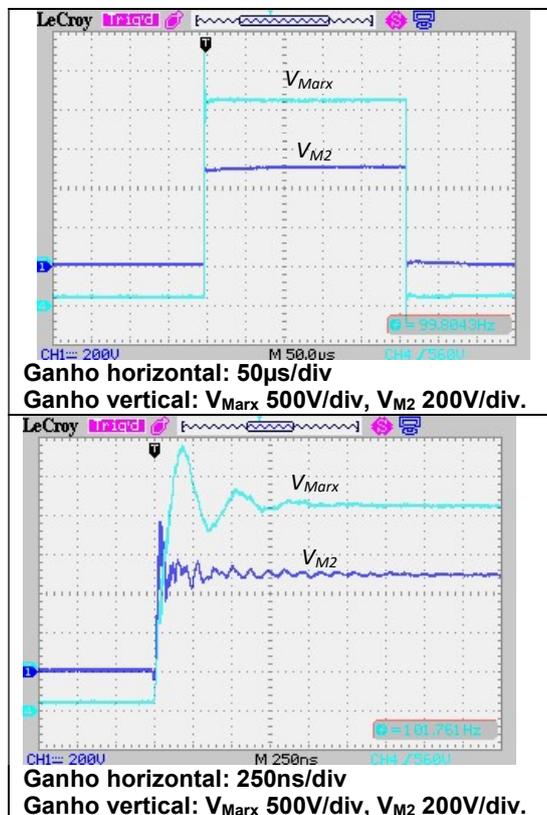


Figura 4.13b) Simulação das formas de onda de tensão aos terminais do condensador C_1 , e à saída do gerador de Marx, da Figura 4.13a).

Figura 4.13 – Resultados experimentais e de simulação das formas de onda de tensão aos terminais do condensador C_1 e à saída do gerador de Marx.

Nas formas de onda da Figura 4.13, onde $V_{Marx}=2500V$ e $V_{C1}=500V$, observa-se o *overshoot* da onda de tensão à saída do gerador de Marx quando carrega o gerador Blumlein devido à rápida variação da forma de onda de tensão atendendo às necessidades do gerador Blumlein. Também se pode observar que a variação de tensão nos condensadores é reduzida porque a energia armazenada no gerador de Marx é muito maior que a energia que o gerador Blumlein consome, $C_{Marx} \gg C_{Blumlein}$.

Na Figura 4.14 apresentam-se os resultados experimentais e de simulação para o andamento da tensão aos terminais do MOSFET de carga dos condensadores do 1º estágio em sincronismo com a forma de onda de tensão à saída do gerador de Marx.



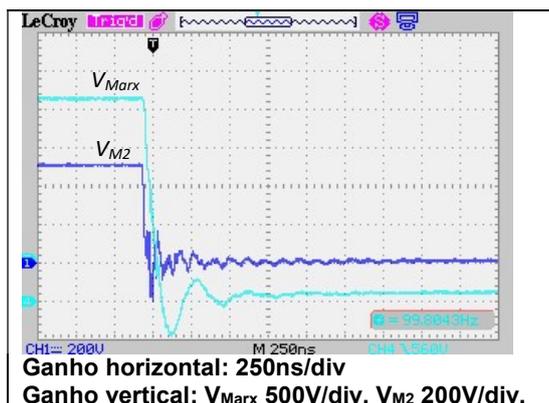


Figura 4.14a) Formas de onda de tensão aos terminais do MOSFET de carga dos condensadores M_2 (azul escuro), e à saída do gerador de Marx (azul claro).

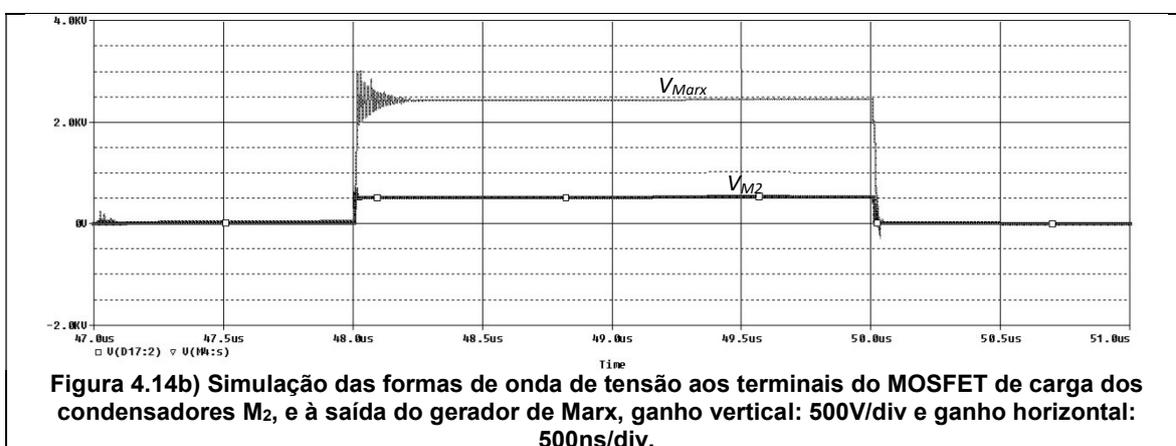


Figura 4.14 – Resultados experimentais e de simulação das formas de onda de tensão aos terminais do MOSFET de carga dos condensadores do 1º estágio e à saída do gerador de Marx.

Da análise da Figura 4.14, onde $V_{Marx}=2500V$, e $V_{M2}=500V$, observa-se que quando os MOSFETs que geram o impulso à saída do gerador de Marx comutam, causam em cada estágio alguma oscilação na forma de onda de tensão medida nos terminais do condensador, razão pela qual surge também alguma oscilação na forma de onda de tensão à saída do gerador de Marx. A diferença entre os resultados de simulação e experimentais, na amplitude desta oscilação, verifica-se porque os modelos dos componentes de simulação não são exatamente iguais aos componentes reais e também pela diferença entre o ganho vertical das formas de onda em análise.

4.5.3 Formas de onda de tensão no Gerador Blumlein

Para responder à questão de investigação 2) foram registadas as formas de onda de tensão da Figura 4.15 até à Figura 4.19 para se poder caracterizar o comportamento dos impulsos de tensão no gerador Blumlein, de modo a justificar o estudo teórico desenvolvido no ponto 3.2.4.5, propagação das ondas de tensão.

Na Figura 4.15, observam-se as formas de onda experimentais e de simulação da tensão no condutor interior à entrada das linhas passivas que compõem o gerador Blumlein. V_{T2} à entrada da linha passiva do primeiro estágio; V_{T4} à entrada da linha passiva do segundo estágio; e V_{T6} à entrada da linha passiva do terceiro estágio do gerador Blumlein em sincronismo com V_{Marx} forma de onda de tensão à saída do gerador de Marx. Estes resultados foram retirados com todas as pontas de prova referenciadas à massa do circuito.

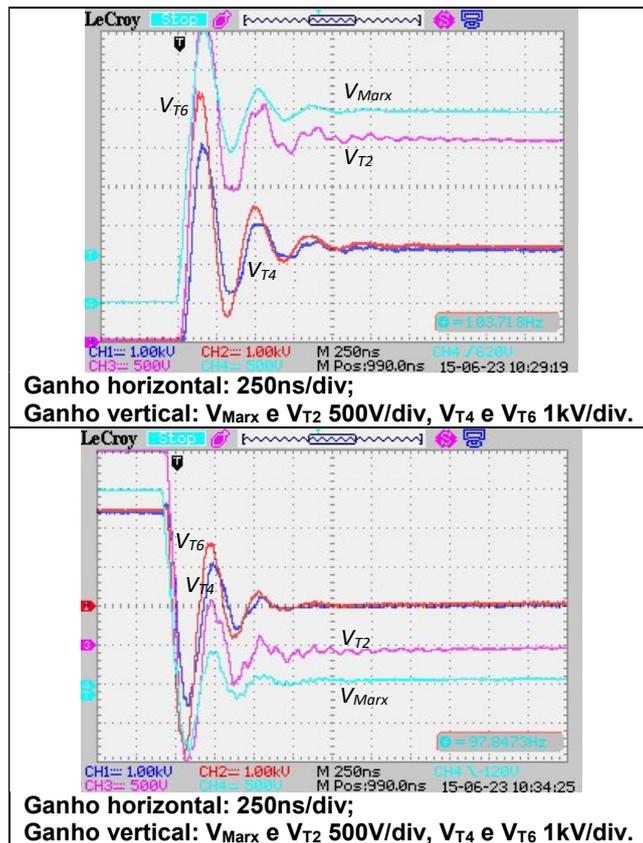


Figura 4.15a) Impulsos de tensão à entrada do condutor principal das linhas passivas T_2 (rosa), T_4 (azul escuro) e T_6 (vermelho).

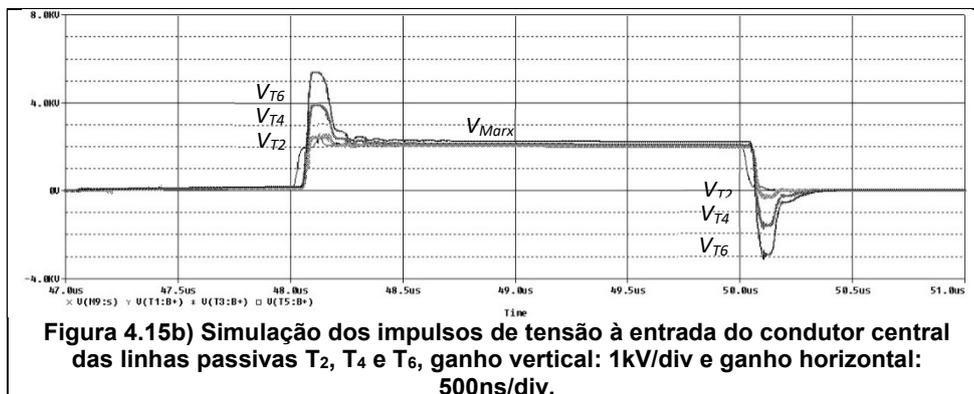


Figura 4.15 – Resultados experimentais e de simulação das formas de onda de tensão à entrada das linhas passivas T_2 , T_4 e T_6 , no condutor interior do gerador Blumlein.

Da análise das formas de onda de tensão da Figura 4.15, e para $V_{Marx}=2500V$, verifica-se que durante o impulso na carga do gerador Blumlein, instante em que o impulso de tensão V_{Marx} varia

de 0V para 2500V e de 2500V para 0V, surge nestas formas de onda durante a carga do gerador Blumlein, um pico de tensão de amplitude, considerando desprezáveis as perdas relativas à impedância de modo secundário do gerador, no 1º estágio tem-se $V_{Marx}+V_{Marx}/2$, no 2º estágio tem-se $V_{Marx}+3V_{Marx}/2$ e no 3º estágio tem-se $V_{Marx}+5V_{Marx}/2$, estes valores devem-se aos fatores de reflexão e transmissão em cada estágio. As diferenças entre os resultados experimentais e os resultados de simulação devem-se ao facto do modelo dos componentes reais não ser igual ao modelo dos componentes de simulação.

Na Figura 4.16, observam-se as formas de onda experimentais e de simulação da tensão no condutor exterior à entrada das linhas passivas que compõem o gerador Blumlein; V_{T2} à entrada da linha passiva do primeiro estágio; V_{T4} à entrada da linha passiva do segundo estágio e V_{T6} à entrada da linha passiva do terceiro estágio do gerador Blumlein; V_{Marx} forma de onda de tensão à saída do gerador de Marx. Estes resultados foram retirados com todas as pontas de prova referenciadas à massa do circuito.

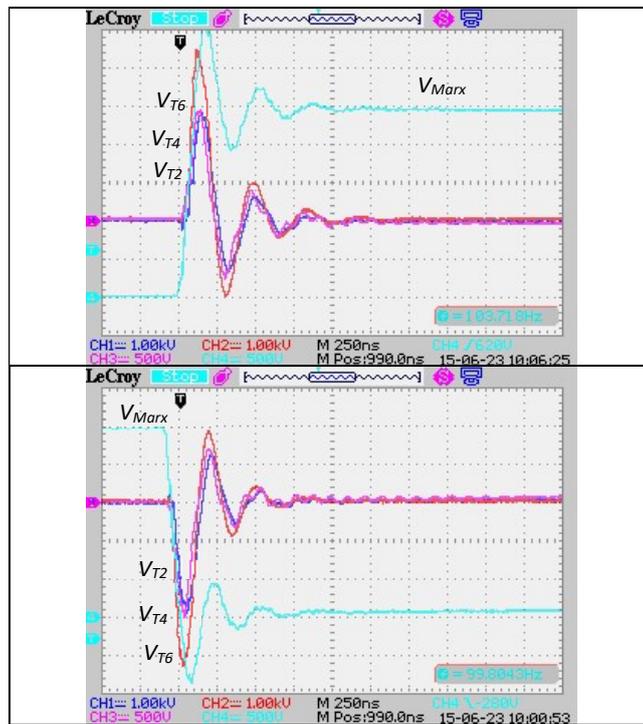


Figura 4.16a) Impulsão de tensão à entrada do condutor exterior das linhas passivas T_2 (rosa), T_4 (azul escuro) e T_6 (vermelho); Ganho horizontal: 250ns/div; Ganho vertical: V_{Marx} e V_{T2} 500V/div, V_{T4} e V_{T6} 1kV/div.

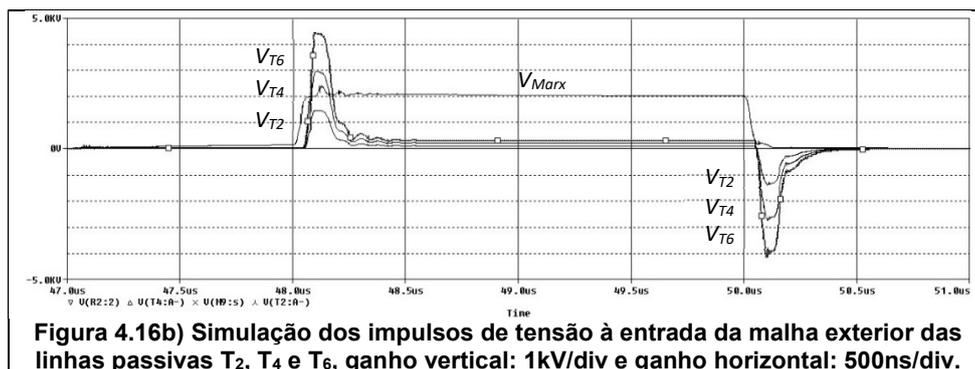
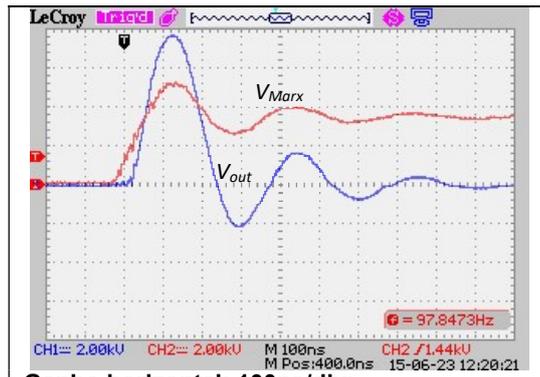


Figura 4.16 – Resultados experimentais e de simulação das formas de onda de tensão à entrada das linhas passivas T₂, T₄ e T₆, no condutor exterior do gerador Blumlein.

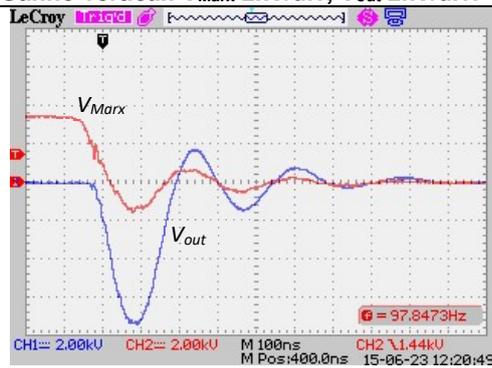
Da análise das formas de onda de tensão da Figura 4.16, e para $V_{Marx}=2500V$, verifica-se que durante o impulso na carga do gerador Blumlein, instante em que o impulso de tensão V_{Marx} varia de 0V para 2500V e de 2500V para 0V, surge em cada ponto respetivamente um pico de tensão de amplitude V_{Marx} , $2V_{Marx}$ e $3V_{Marx}$ neste ultimo caso, impulso de tensão na carga, considerando desprezáveis as perdas relativas à impedância de modo secundário do gerador.

Na Figura 4.15 e na Figura 4.16, tendo em conta como referência o valor da amplitude da forma de onda de tensão V_{Marx} verifica-se que as formas de onda no gerador Blumlein apresentam em termos de amplitude uma eficácia de cerca de 60%, devido aos elementos que caracterizam o gerador Blumlein, bem como ao tempo de subida e descida da tensão do gerador de Marx, consequência do tempo de comutação dos dispositivos semicondutores e dos problemas associados como o não sincronismo destes. Em termos ideais as formas de onda deveriam ser quase retangulares, os resultados experimentais obtidos validam os resultados de simulação.

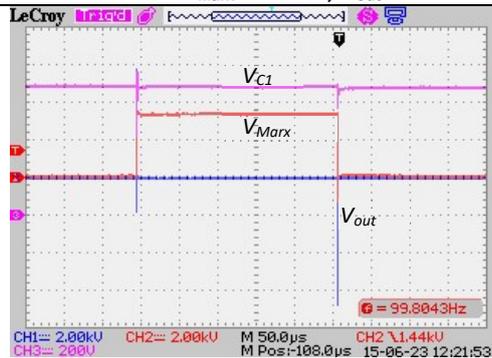
Nas figuras seguintes apresentam-se as formas de onda experimentais e de simulação da tensão à saída do gerador de Marx V_{Marx} e na carga do gerador Blumlein V_{out} para 3 casos distintos: Figura 4.17 impedância da carga do gerador Blumlein igual a 600Ω (duas vezes o valor da carga adaptada); Figura 4.18 impedância da carga do gerador Blumlein igual a 300Ω (o valor da carga adaptada); e Figura 4.19 impedância da carga do gerador Blumlein igual a 150Ω (metade do valor da carga adaptada). Para valores de amplitude de tensão $V_{C1}=700V$ e $V_{Marx}=3500V$.



Ganho horizontal: 100ns/div;
 Ganho vertical: V_{Marx} 2kV/div, V_{out} 2kV/div.



Ganho horizontal: 100ns/div;
 Ganho vertical: V_{Marx} 2kV/div, V_{out} 2kV/div.



Ganho horizontal: 50µs/div;
 Ganho vertical: V_{Marx} 2kV/div, V_{out} 2kV/div.

Figura 4.17a) Resultados experimentais
 V_{Marx} (vermelho), V_{out} (azul) e V_{C1} (rosa).

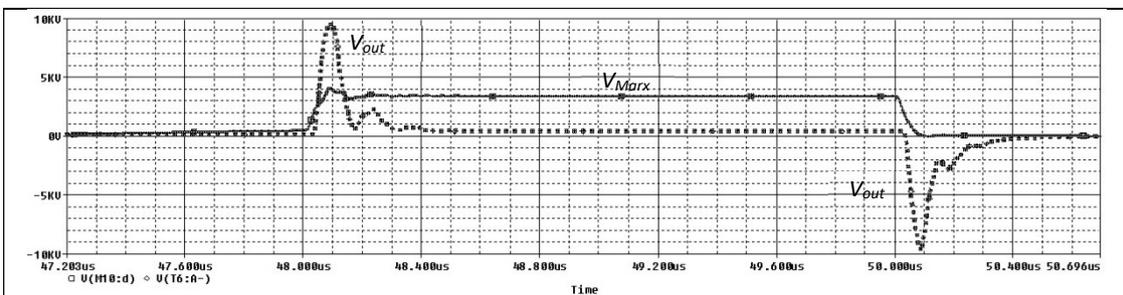
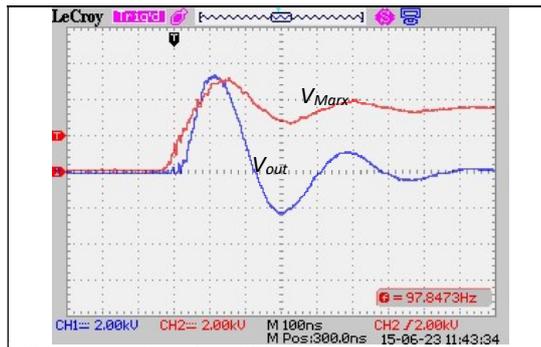
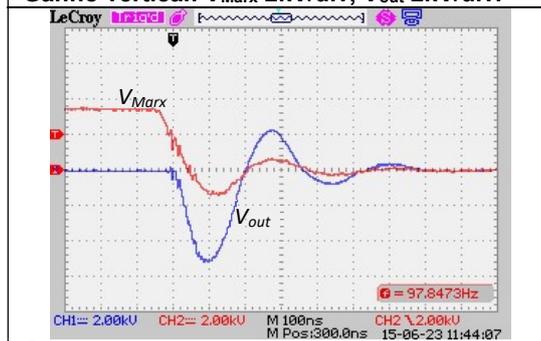


Figura 4.17b) Resultados de simulação, ganho horizontal: 100ns/div; ganho vertical: 1kV/div.

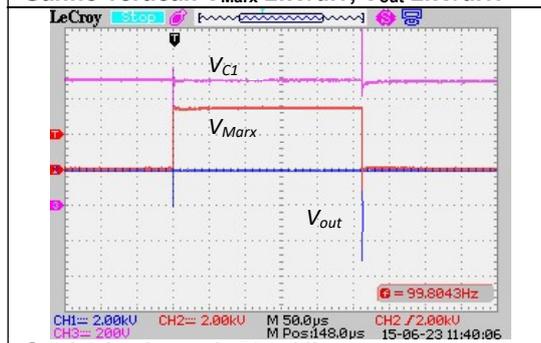
Figura 4.17 - Formas de onda de tensão à saída do gerador de Marx e na carga do gerador Blumlein com $Z_{out}=600\Omega$ (azul), o dobro de carga adaptada.



Ganho horizontal: 100ns/div;
 Ganho vertical: V_{Marx} 2kV/div, V_{out} 2kV/div.



Ganho horizontal: 100ns/div;
 Ganho vertical: V_{Marx} 2kV/div, V_{out} 2kV/div.



Ganho horizontal: 50µs/div;
 Ganho vertical: V_{Marx} 2kV/div, V_{out} 2kV/div.

Figura 4.18a) Resultados experimentais V_{Marx} (vermelho), V_{out} (azul) e V_{C1} (rosa).

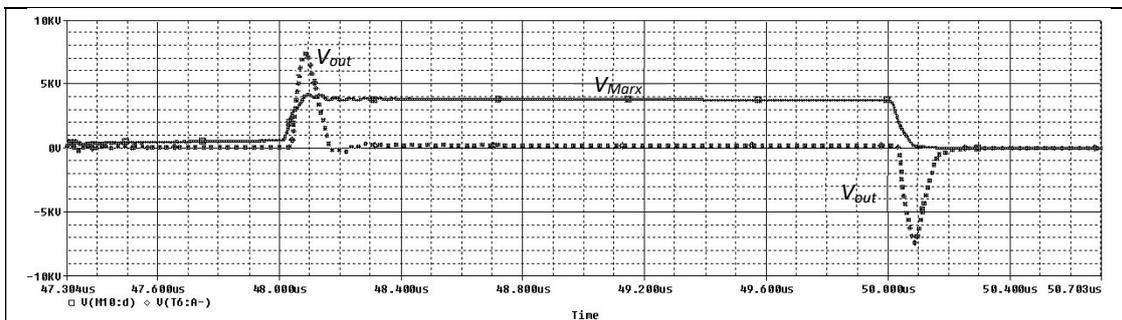


Figura 4.18b) Resultados de simulação, ganho horizontal: 100ns/div; ganho vertical: 1kV/div.

Figura 4.18 - Formas de onda de tensão à saída do gerador de Marx e na carga do gerador Blumlein com $Z_{out}=300\Omega$, igual a carga adaptada.

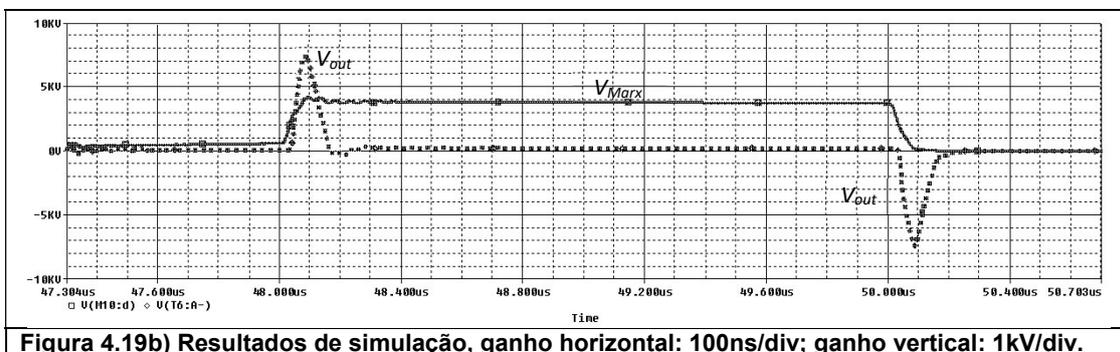
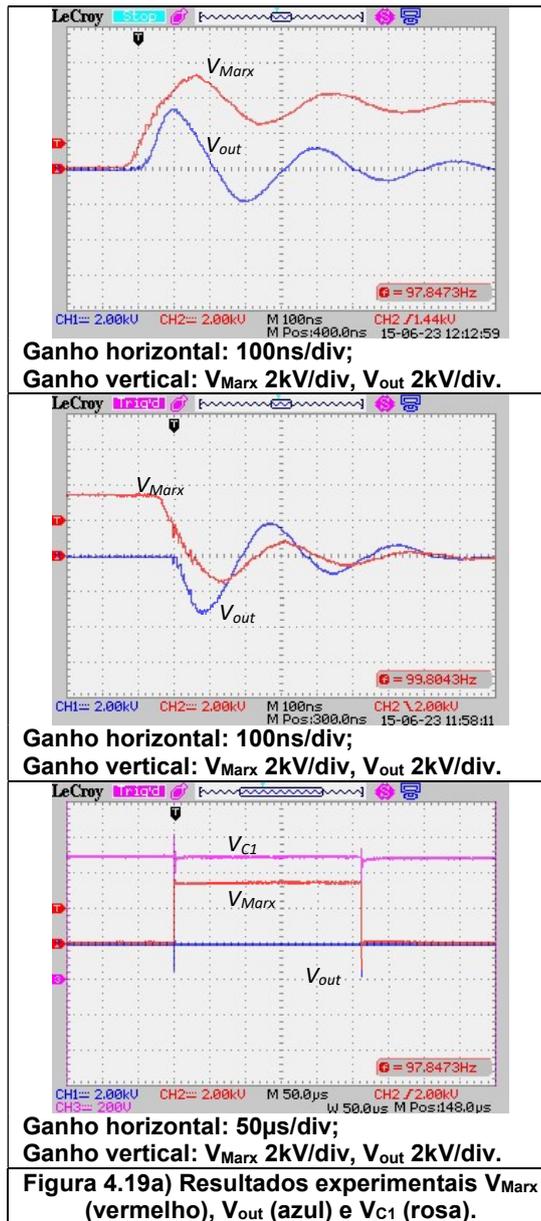


Figura 4.19 - Formas de onda de tensão à saída do gerador de Marx e na carga do gerador Blumlein com $Z_{out}=150\Omega$, igual a metade do valor da carga adaptada.

Da análise das formas de onda da Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19 observa-se, de acordo com a teoria, que a amplitude dos impulsos de tensão aumenta no caso de se ter uma carga resistiva de valor superior ao valor da impedância de carga adaptada Figura 4.17, quando o valor da impedância de carga é inferior, o valor da amplitude dos impulsos de tensão diminui, Figura 4.19. Efremov et al. (2010) com base num circuito Blumlein criaram um gerador de impulsos bipolares usando uma impedância de carga de valor inferior à impedância de carga adaptada, conforme se pode verificar na Figura 4.19a). Com impedância de carga adaptada o sistema tende para um sistema estável com um número finito de reflexões. Com impedância de carga não adaptada: impedância de carga de valor superior a impedância de carga adaptada, o sistema tende para uma sequência infinita decrescente de impulsos de tensão de sinal constante; impedância de carga de valor inferior a impedância de carga adaptada, o sistema tende para uma sequência infinita decrescente de impulsos de tensão de sinal alternado [Smith, 2002].

4.6 Balanço Energético do GHAT

Tendo em conta que o gerador de Marx é constituído por 5 estágios, cada um com uma capacidade de $0,66\mu\text{F}$, e que os condensadores são carregados com uma tensão de $666,67\text{V}$, tem-se pela equação (3.45) que a energia armazenada no gerador de Marx E_{Marx} , é dada por:

$$E_{\text{Marx}} = m \frac{1}{2} C_{(1,\dots,m)} V_{dc}^2 = 5 \times \frac{1}{2} \times 0,66 \times 10^{-6} \times 666,67^2 = 0,733\text{J} \quad (4.8)$$

Sabendo-se que a Blumlein é constituída por 3 estágios, 6 pedaços de linha coaxial, cada um com 5m de comprimento, capacidade 101pF/m , para uma tensão de alimentação $3333,33\text{V}$, a energia em cada estágio da Blumlein E_B , pela equação (3.47) é:

$$E_B = \frac{1}{2} (C_{\text{Linha1}} + C_{\text{Linha2}}) V_{\text{Marx}}^2 = \frac{1}{2} (2 \times 5 \times 101 \times 10^{-12}) \times 3333,33^2 = 5,61\text{mJ} \quad (4.9)$$

A energia armazenada nos 3 estágios do gerador Blumlein E_{Blumlein} , pela equação (3.48) é então:

$$E_{\text{Blumlein}} = 3E_B = 3 \times 5,61 \times 10^{-3} = 16,83\text{mJ} \quad (4.10)$$

A energia consumida pela carga E_{impulso} , considerando nulas as perdas no sistema, para os valores teóricos considerados a amplitude da tensão na carga de 10kV , e carga adaptada, durante cada impulso, pela equação (3.49) é:

$$E_{impulso} = \frac{V_{out}^2}{Z_{out}} t_{impulso} = \frac{10000^2}{300} \times 50,575 \times 10^{-9} = 16,86mJ \quad (4.11)$$

A corrente na carga I_{out} , pela equação (3.53) é:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{Z_{out}} = \frac{10000}{300} = 33,3A \quad (4.12)$$

A energia consumida nos 2 impulsos pela carga E_{out} , é:

$$E_{out} = 2E_{impulso} = 2 \times 16,86 \times 10^{-3} = 33,72mJ \quad (4.13)$$

Pela aplicação da equação (3.64) fazendo $C_{Blumlein}=6nF$ devido gerador de Marx quando carrega o gerador Blumlein ter de fornecer toda a energia necessária para os impulsos positivo e negativo na carga Z_{out} , sabe-se que:

$$V_{Marx_f} = \frac{C_{Marx}}{C_{Marx} + C_{Blumlein}} V_{Marx_i} = \frac{132 \times 10^{-9}}{132 \times 10^{-9} + 6 \times 10^{-9}} \times 3333,3 = 3188,4V \quad (4.14)$$

A queda de tensão estimada para o valor nominal de tensão do GHAT em V_{Marx} , é $\Delta V_{Marx} = V_{Marx_i} - V_{Marx_f} = 3333,3 - 3188,4 = 144,9V$ o que perfaz um valor de queda de tensão por estágio de cerca de 40V, valor aproximado da queda de tensão verificada no condensador da Figura 4.13a).

A energia armazenada no gerador de Marx no final do impulso pela equação (3.66), é então:

$$E_{Marx_f} = \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marx_f}^2 = \frac{1}{2} \times 132 \times 10^{-9} \times 3188,4^2 = 0,670J \quad (4.15)$$

E a eficiência energética do GHAT pode ser calculada então pela equação (3.68):

$$\eta = \frac{2E_{impulso}}{E_{MB}} \times 100 = \frac{2E_{impulso}}{E_{Marx} - E_{Marx_f}} \times 100 = \frac{2 \times 16,86 \times 10^{-3}}{0,733 - 0,670} = 54,3\% \quad (4.16)$$

Comparando o resultado da equação (4.8) com o resultado da equação (4.13) pode-se concluir que a energia disponível no gerador de Marx é muito maior que a energia consumida na carga do gerador Blumlein. O gerador Blumlein, desprezando as perdas por efeito de joule nos condutores e as perdas de modo secundário, é um sistema onde se verifica a máxima transferência de energia para a carga, porque a carga absorve toda a energia com que o gerador Blumlein é carregado.

Durante o projeto e construção do GHAT optou-se por ter disponível no gerador de Marx um valor de capacidade muito maior do que o valor da capacidade que constitui o gerador Blumlein de modo

que a tensão dos condensadores do gerador de Marx não descesse significativamente, e assim a eficiência se aproximasse dos 50%.

4.6.1 Trânsito de energia do gerador de Marx para o gerador Blumlein

Para o cálculo da energia foi feita a integração da corrente e tensão, considerando as formas de onda destas grandezas medidas experimentalmente, conforme a Figura 4.20, para um valor médio de patamar superior de tensão $V_{Marx}=2500V$.

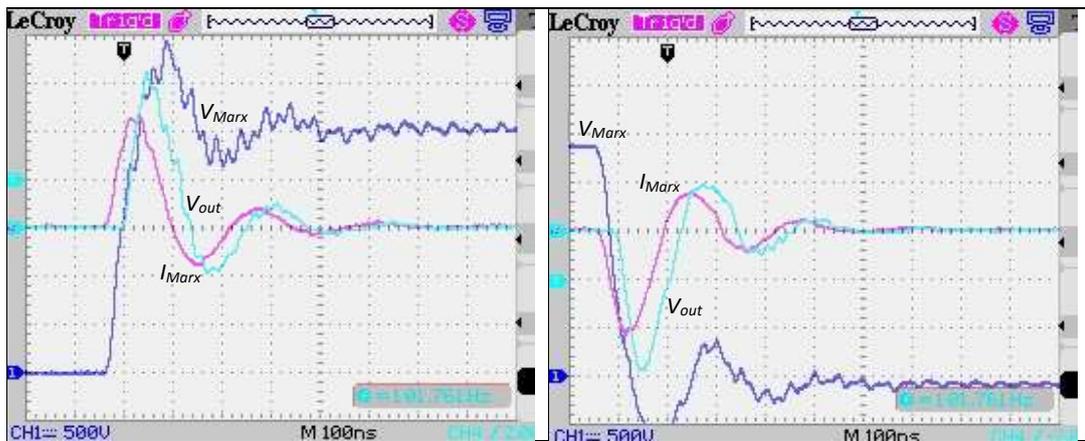


Figura 4.20 - Cálculo da Energia utilizando o método das áreas por integração das imagens da Figura 4.10, V_{Marx} 500V/div (azul escuro), V_{out} 2kV/div(azul claro) e I_{Marx} 50A/div(roxo).

Considerando, nesta situação os 2500V à saída do Marx, da integração das formas de onda de tensão e corrente da Figura 4.20, conclui-se que a energia em trânsito no gerador de Marx para a carga do gerador Blumlein é igual a 34,46mJ, isto é, 16,86mJ de energia enviada para o gerador Blumlein mais cerca de 17,60mJ de perdas, cerca de 50%. Como se pode verificar nos cálculos realizados de seguida para esta amplitude de tensão à saída do Marx.

Tendo em conta que o gerador de Marx é constituído por 5 estágios, cada um com uma capacidade de 0,66 μ F, e que a fonte de tensão carrega os condensadores com uma tensão de 500V, tem-se pela equação (3.45) que a energia armazenada no gerador de Marx E_{Marx} , é dada por:

$$E_{Marx} = m \frac{1}{2} C_{(1,\dots,m)} V_{dc}^2 = 5 \times \frac{1}{2} \times 0,66 \times 10^{-6} \times 500^2 = 412,5mJ \quad (4.17)$$

Sabendo-se que a Blumlein é constituída por 3 estágios, 6 pedaços de linha coaxial, cada um com 5m de comprimento, capacidade 101pF/m, para uma tensão de alimentação 2500V, a energia em cada estágio da Blumlein E_B , pela equação (3.47) é:

$$E_B = \frac{1}{2}(C_{Linha1} + C_{Linha2})V_{Marx}^2 = \frac{1}{2}(2 \times 5 \times 101 \times 10^{-12})2500^2 = 3,16mJ \quad (4.18)$$

A energia armazenada nos 3 estgios do gerador Blumlein $E_{Blumlein}$, pela equaço (3.48) é ento:

$$E_{Blumlein} = 3E_B = 3 \times 3,16 \times 10^{-3} = 9,47mJ \quad (4.19)$$

A energia consumida pela carga $E_{impulso}$, considerando nulas as perdas no sistema, para os valores teóricos considerados a amplitude da tensão na carga de 7500V, e carga adaptada, durante cada impulso, pela equaço (3.49) é:

$$E_{impulso} = \frac{V_{out}^2}{Z_{out}} t_{impulso} = \frac{7500^2}{300} \times 50 \times 10^{-9} = 9,48mJ \quad (4.20)$$

A corrente na carga I_{out} , pela equaço (3.53) é:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{Z_{out}} = \frac{7500}{300} = 25A \quad (4.21)$$

A energia consumida nos 2 impulsos pela carga E_{out} , é:

$$E_{out} = 2E_{impulso} = 2 \times 9,48 \times 10^{-3} = 18,96mJ \quad (4.22)$$

Pela aplicaço da equaço (3.64) sabe-se que:

$$V_{Marx_f} = \frac{C_{Marx}}{C_{Marx} + C_{Blumlein}} V_{Marx_i} = \frac{132 \times 10^{-9}}{132 \times 10^{-9} + 6 \times 10^{-9}} \times 2500 = 2391,3V \quad (4.23)$$

A energia armazenada no gerador de Marx no final do impulso, é pela equaço (3.66):

$$E_{Marx_f} = \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marx_f}^2 = \frac{1}{2} \times 132 \times 10^{-9} \times 2391,3^2 = 377mJ \quad (4.24)$$

E a eficiência energética do GHAT pode ser calculada ento pela equaço (3.68):

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{Marx} - E_{Marx_f}} \times 100 = \frac{18,96 \times 10^{-3}}{0,733 - 0,670} \times 100 = 53,4\% \quad (4.25)$$

Para o cálculo das perdas na transferência de energia entre geradores considera-se o circuito equivalente simplificado da Figura 4.21.

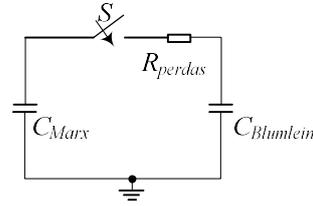


Figura 4.21 - Esquema simplificado do GHAT.

Pela conservação da energia, equação (3.69) tem-se que:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marx_i}^2 &= \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marx_f}^2 + \frac{1}{2} C_{Blumlein} V_{Marx_f}^2 + perdas \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow perdas &= \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marx_i}^2 - \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marx_f}^2 - \frac{1}{2} C_{Blumlein} V_{Marx_f}^2 \end{aligned} \quad (4.26)$$

Pela conservação da carga a tensão final no gerador de Marx pela equação (3.64) é:

$$V_{Marx_f} = \frac{C_{Marx}}{C_{Marx} + C_{Blumlein}} V_{Marx_i} \quad (4.27)$$

Sabendo que:

$$\begin{cases} C_{Marx} = 132nF \\ C_{Blumlein} = 6nF \end{cases} \Rightarrow C_{Blumlein} = \frac{C_{Marx}}{22}$$

$$V_{Marx_f} = \frac{22}{23} V_{Marx_i}$$

Então pela equação de conservação da energia (4.26):

$$\begin{aligned} perdas &= \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marx_i}^2 - \frac{1}{2} C_{Marx} \left(\frac{22}{23} V_{Marx_i} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{C_{Marx}}{22} \left(\frac{22}{23} V_{Marx_i} \right)^2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow perdas &= \frac{1}{2} C_{Marx} V_{Marx_i}^2 \left(\frac{23^2 - 22^2 - 22}{23^2} \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow perdas &= \frac{1}{2} \times 132 \times 10^{-9} \times 2500^2 \left(\frac{23^2 - 22^2 - 22}{23^2} \right) = 17,74mJ \end{aligned}$$

O resultado obtido pela equação (4.26) confirma o valor da eficiência energética obtido pela equação (4.25).

Na descarga da Blumlein aplicando o mesmo método à Figura 4.20 do lado direito, a energia em trânsito é igual a 5,24mJ, este valor corresponde apenas às perdas no GHAT durante este período, uma vez que a energia armazenada no gerador Blumlein é consumida pela carga.

4.7 Comparação das Formas de Onda de Tensão na Carga do GHAT com 1 até 5 Estágios no Gerador de Marx e com 2 e 3 Estágios no Gerador Blumlein

Tendo em conta que o gerador de Marx é constituído por 5 estágios e o gerador Blumlein constituído por 3 estágios, para se comparar a eficiência do GHAT em termos de amplitude das formas de onda, função do número de estágios no gerador de Marx e Blumlein, foram efetuados os seguintes ensaios laboratoriais com carga adaptada.

No cálculo da eficácia do GHAT nesta secção, 4.7, foi aplicada a seguinte equação:

$$\eta_t = \frac{V_{out}}{V_{esperado}} \times 100 \quad (4.28)$$

Em que $V_{esperado}$ é o valor de tensão na carga teórico considerando um gerador Blumlein ideal.

Na Figura 4.22 até à Figura 4.26 apresentam-se as formas de onda de tensão experimentais à saída do gerador de Marx V_{Marx} (azul escuro) e na carga V_{out} (azul claro), na coluna do lado esquerdo varia m no gerador de Marx de 1 a 5 com 2 estágios no gerador de Blumlein, e na coluna do lado direito varia m no gerador de Marx de 1 a 5 com 3 estágios no gerador de Blumlein.

Na Figura 4.22 apresentam-se as formas de onda de tensão V_{Marx} e V_{out} , com 1 estágio no gerador de Marx e à esquerda com 2 estágios e à direita com 3 estágios no gerador Blumlein.

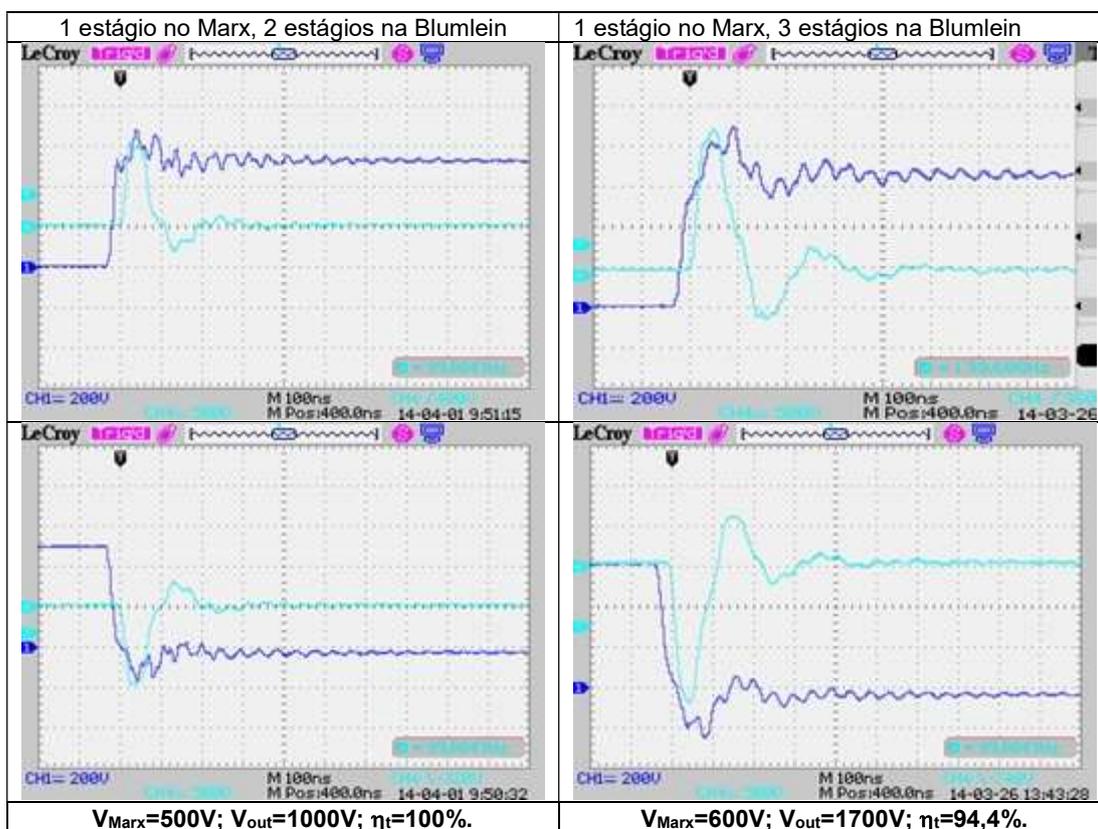


Figura 4.22 - Formas de onda de tensão V_{Marx} (azul escuro 200V/div) e V_{out} (azul claro 500V/div), com 1 estágio no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein.

Nas formas de onda de tensão da Figura 4.22 observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=500V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=1000V$, e eficácia $\eta_t=100\%$ com dois estágios na Blumlein; com 3 estágios na Blumlein observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=600V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=1700V$, e eficácia $\eta_t=94,4\%$ a forma de onda de tensão V_{Marx} não sobe tão rapidamente cerca de 15ns e a eficácia cai cerca de 6%.

Na Figura 4.23 apresentam-se as formas de onda de tensão V_{Marx} e V_{out} , com 2 estágios no gerador de Marx e à esquerda com 2 estágios e à direita com 3 estágios no gerador Blumlein.

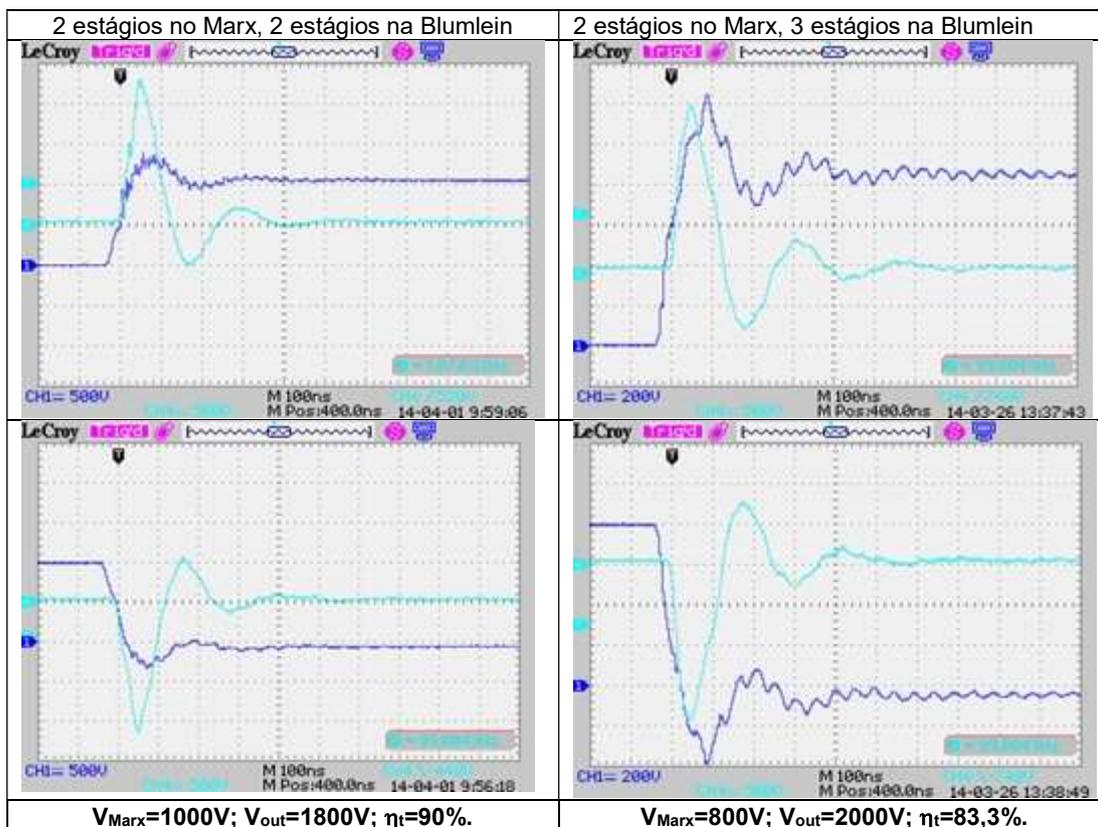


Figura 4.23 - Formas de onda de tensão V_{Marx} (azul escuro 500V/div) e V_{out} (azul claro 500V/div), com 2 estágios no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein.

Nas formas de onda de tensão da Figura 4.23 observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=1000V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=1800V$, e eficácia $\eta_t=90\%$ com dois estágios na Blumlein; com 3 estágios na Blumlein observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=800V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=2000V$, e eficácia $\eta_t=83,3\%$; o tempo de subida da forma de onda de tensão V_{Marx} não sobe tão rapidamente, cerca de 35ns e a eficácia cai cerca de 10% relativamente ao exemplo da Figura 4.22.

Na Figura 4.24 apresentam-se as formas de onda de tensão V_{Marx} e V_{out} , com 3 estágios no gerador de Marx e à esquerda com 2 estágios e à direita com 3 estágios no gerador Blumlein.

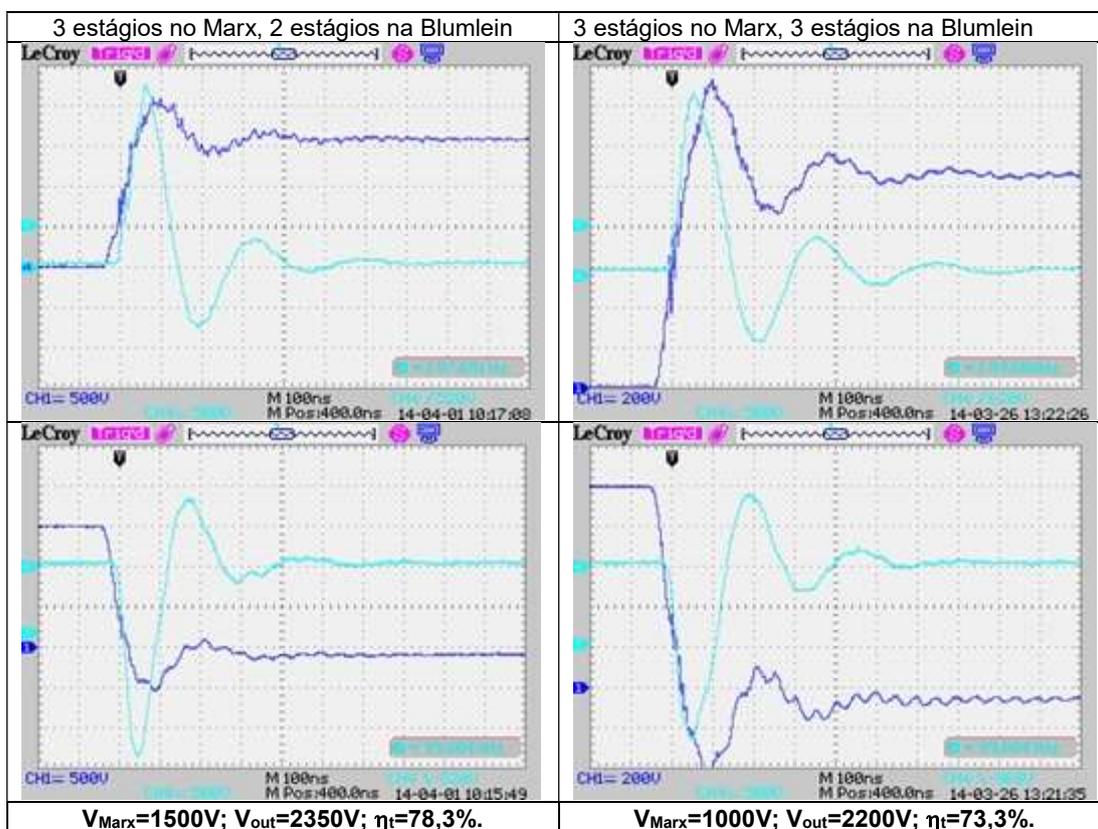


Figura 4.24 - Formas de onda de tensão V_{Marx} (azul escuro 500V/div) e V_{out} (azul claro 500V/div), com 3 estágios no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein.

Nas formas de onda de tensão da Figura 4.24 observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=1500V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=2350V$, e eficácia $\eta_t=78,3\%$ com dois estágios na Blumlein; com 3 estágios na Blumlein observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=1000V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=2200V$, e eficácia $\eta_t=73,3\%$; o tempo de subida da forma de onda de tensão V_{Marx} não sobe tão rapidamente, cerca de 60ns e a eficácia cai cerca de 10% relativamente ao exemplo da Figura 4.23.

Na Figura 4.25 apresentam-se as formas de onda de tensão V_{Marx} e V_{out} , com 4 estágios no gerador de Marx e à esquerda com 2 estágios e à direita com 3 estágios no gerador Blumlein.

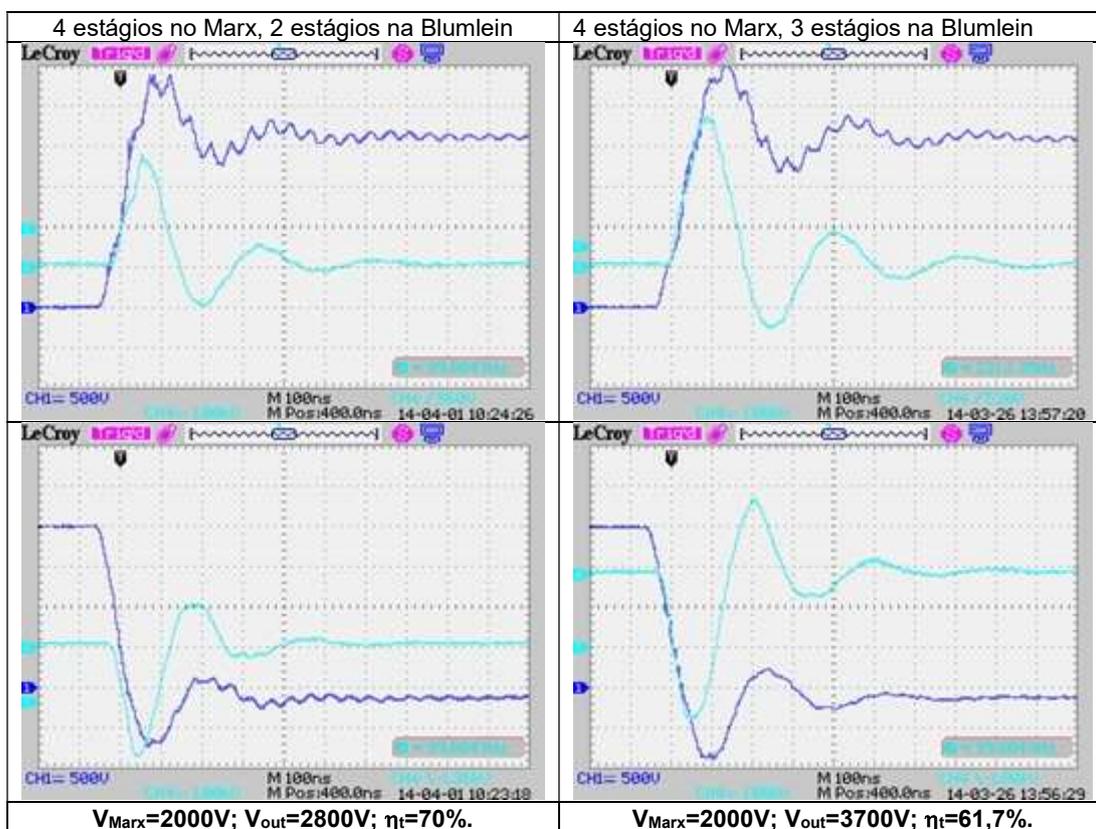


Figura 4.25 - Formas de onda de tensão V_{Marx} (azul escuro 500V/div) e V_{out} (azul claro 100V/div), com 4 estágios no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein.

Nas formas de onda de tensão da Figura 4.25 observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=2000V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=2800V$, e eficácia $\eta_t=70\%$ com dois estágios na Blumlein; com 3 estágios na Blumlein observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=2000V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=3700V$, e eficácia $\eta_t=61,7\%$; o tempo de subida da forma de onda de tensão V_{Marx} não sobe tão rapidamente, cerca de 80ns e a eficácia cai cerca de 10% relativamente ao exemplo da Figura 4.24.

Na Figura 4.26 apresentam-se as formas de onda de tensão V_{Marx} e V_{out} , com 5 estágios no gerador de Marx e à esquerda com 2 estágios e à direita com 3 estágios no gerador Blumlein.

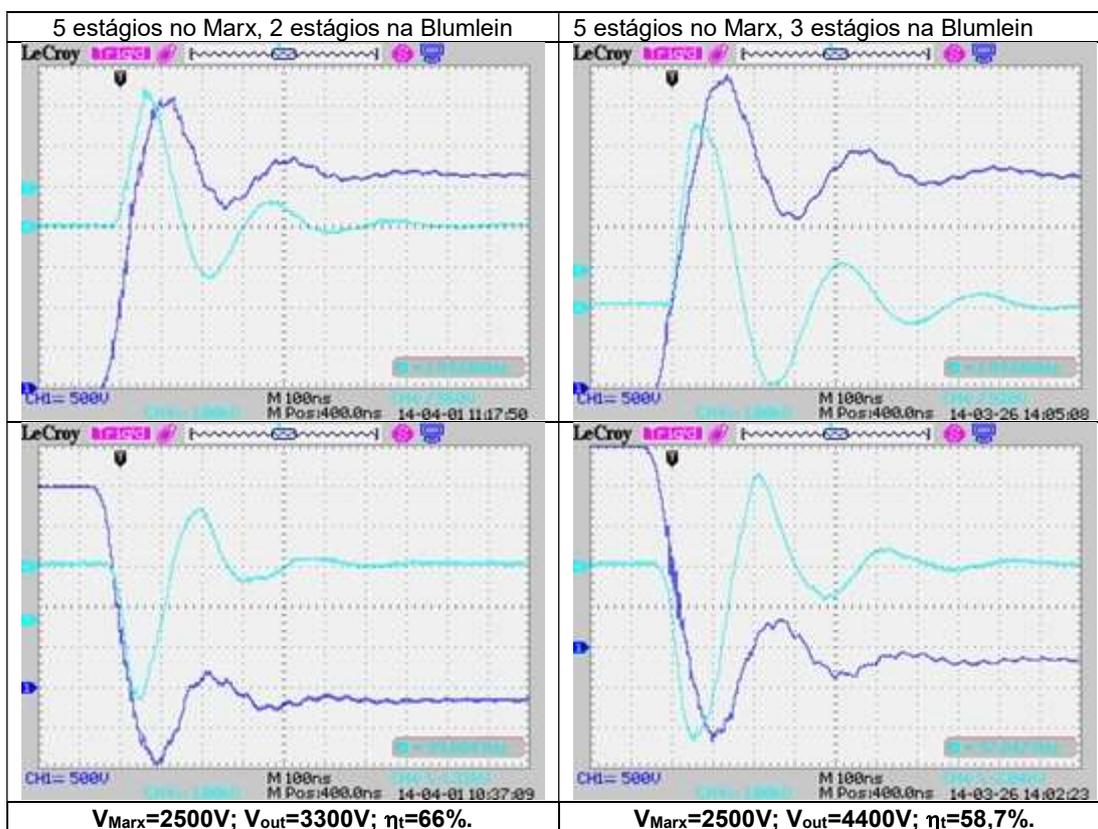


Figura 4.26 - Formas de onda de tensão V_{Marx} (azul escuro 500V/div) e V_{out} (azul claro 1000V/div), com 5 estágios no gerador de Marx e à esquerda 2 estágios no gerador Blumlein e à direita 3 estágios no gerador Blumlein.

Nas formas de onda de tensão da Figura 4.26 observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=2500V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=3300V$, e eficácia $\eta_t=66\%$ com dois estágios na Blumlein; com 3 estágios na Blumlein observa-se que para uma amplitude de $V_{Marx}=2500V$, corresponde uma amplitude de tensão na carga de $V_{out}=4400V$, e eficácia $\eta_t=58,7\%$; o tempo de subida da forma de onda de tensão V_{Marx} não sobe tão rapidamente, cerca de 110ns e a eficácia cai cerca de 3 a 4% relativamente ao exemplo da Figura 4.25.

Da análise dos resultados experimentais da Figura 4.22 até à Figura 4.26 conclui-se que a eficácia do GHAT cai com o aumento do número de estágios quer do gerador de Marx quer do gerador Blumlein. Com o aumento do número de estágios também aumenta o tempo de subida e descida da forma de onda do impulso de tensão V_{Marx} .

4.8 Comparação das Formas de Onda de Tensão na Carga do GHAT com os resultados de outros autores

Para a comparação dos resultados experimentais do GHAT com os resultados de outros autores foram recolhidos resultados com 1 estágio no gerador de Marx e 3 estágios no gerador Blumlein porque usualmente estas máquinas são geradores monopolares e comandados apenas por um interruptor do tipo *spark gap*. Desta forma foram registadas as formas de onda da Figura 4.27, em que CH1(azul escuro) $V_{C1}=800V$ é a tensão no condensador do estágio de potência, CH2(vermelho) $V_{Marx}=800V$ é a forma de onda de tensão à saída do gerador Marx, e CH4(azul claro) $V_{out}=2300V$ a forma de onda de tensão na carga do gerador Blumlein.

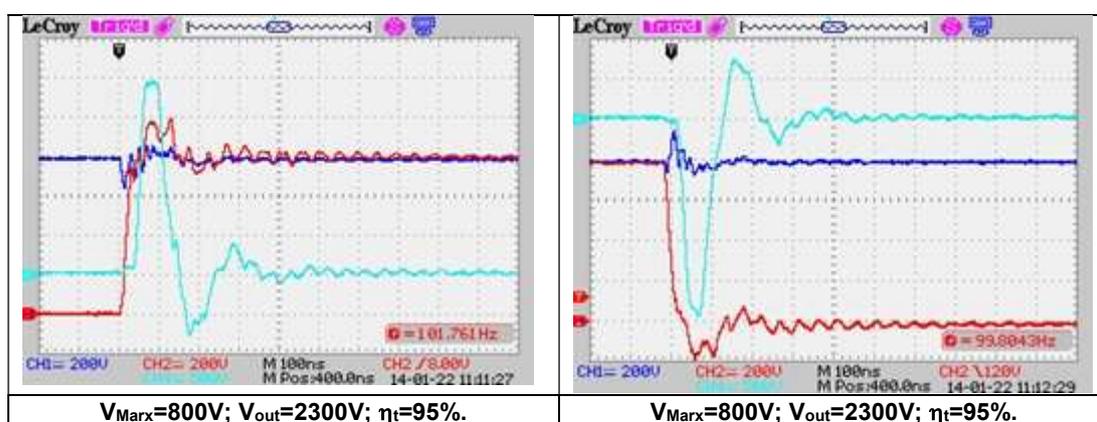


Figura 4.27 - Formas de onda de tensão V_c (azul escuro), V_{Marx} (vermelho) e V_{out} (azul claro), com 1 estágio no gerador de Marx e 3 estágios no gerador Blumlein.

A forma de onda de tensão registada na Figura 4.28, foi obtida por [Verma et al., 2006] a partir de um sistema alimentado por uma fonte de alta tensão com amplitude de tensão 23kV, e com 3 estágios no gerador Blumlein.

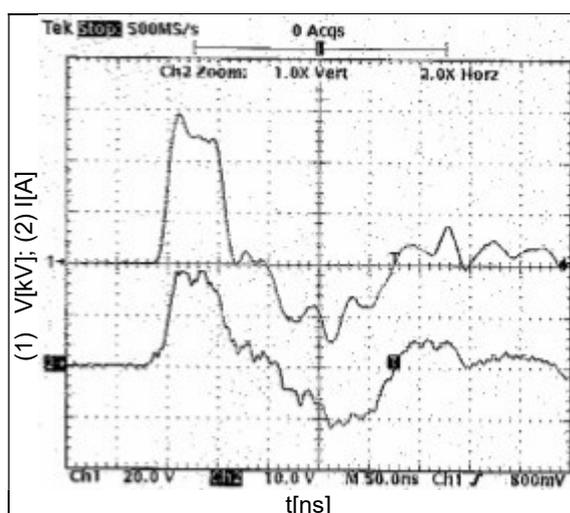


Figura 4.28 – (1) Forma de onda de tensão num sistema alimentado por uma fonte de alta tensão e 3 estágios no gerador Blumlein. Ganho vertical 20kV/div, ganho horizontal 50ns/div. (2) Forma de onda de corrente na carga. Ganho vertical 100A/div, [Verma et al., 2006].

No ensaio registado na Verma et al. (2006), Figura 4.28, para uma tensão de alimentação de 23kV, obtiveram uma amplitude máxima do impulso da forma de onda de tensão de 60kV, o que representa uma eficácia máxima de 87%.

A forma de onda de tensão registada na Figura 4.29, foi obtida por [Rossi et al., 2003b] a partir de um sistema alimentado por uma fonte de alta tensão com amplitude de tensão 10kV, e com 5 estágios no gerador Blumlein.

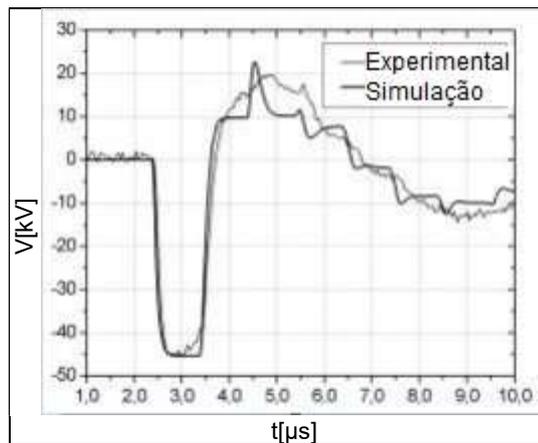


Figura 4.29 - (Experimental) Forma de onda de tensão num sistema alimentado por uma fonte de alta tensão e 5 estágios no gerador Blumlein. Ganho vertical 10kV/div, ganho horizontal 1μs/div, [Rossi et al., 2003b].

No ensaio registado por Rossi et al. (2003b), Figura 4.29, para uma tensão de alimentação de 10kV, obtiveram uma amplitude máxima do impulso da forma de onda de tensão de 45kV, o que representa uma eficácia máxima de 90%.

Considerando os resultados apresentados, tendo em conta a diferença das amplitudes envolvidas, pode concluir-se que não diferem significativamente dos autores de referência.

5. Conclusões

5.1 Considerações finais

O trabalho apresentado teve como objetivo principal o desenvolvimento, projeto e verificação experimental, de um Gerador Híbrido de Alta Tensão, GHAT, com base em semicondutores, para obtenção de impulsos bipolares de tensão com amplitude aproximadamente de 10kV e largura de cerca de 100ns, para aplicações na área da biomedicina.

Foram apresentados um conjunto de conceitos e de desenvolvimentos teóricos com base em bibliografia específica que guiaram o projeto, a construção e o ensaio do protótipo do GHAT baseado em semicondutores de potência e linhas de transmissão.

A metodologia de projeto permitiu a construção de um protótipo experimental capaz de fornecer impulsos bipolares com as características (tensão, frequência e largura do impulso) necessárias para cargas biológicas. Para a concretização deste objetivo impuseram-se algumas condições:

- Seleção de topologia baseada num número mínimo de dispositivos semicondutores de potência, de tensão relativamente reduzida, capaz de entregar impulsos bipolares de alta tensão com as características desejadas;
- Utilização de componentes pouco dispendiosos e facilmente acessíveis no mercado e técnicas pouco complexas em termos de comando, para tornar o protótipo com interesse industrial;
- Modelação do funcionamento dos circuitos usados para validação do conceito proposto e auxílio do seu dimensionamento.

5.2 Trabalho realizado

No enquadramento do trabalho desenvolvido estudou-se a modelação do comportamento equivalente das células biológicas perante a aplicação de campos elétricos pulsados de curta duração, uma vez que a aplicação de campos elétricos origina a permeabilização da membrana celular (i. e. electroporação), facilitando a troca de componentes de dentro para fora da célula ou vice-versa ou mesmo a sua morte, sem recurso à utilização de químicos ou aquecimento das mesmas.

Tendo por base os objetivos propostos inicialmente e o estudo realizado das técnicas para a geração de impulsos bipolares, projetou-se um gerador híbrido de alta tensão inovador para gerar impulsos bipolares, com base num gerador de Marx monopolar que alimenta um gerador Blumlein. Conceptualmente o gerador proposto, denominado de GHAT, é um dispositivo compacto, que usa

reduzido número de dispositivos semicondutores de potência por estágio, e que gera impulsos de alta tensão bipolares, com flexibilidade de variação da distância entre impulsos positivo e negativo, a partir de uma fonte de alimentação única de tensão relativamente reduzida.

Devido aos elevados valores de corrente na carga/descarga do gerador Blumlein foram associados em paralelo 2 dispositivos semicondutores, por estágio do gerador de Marx.

Para tornar o gerador Blumlein mais compacto e com melhor desempenho evolui-se de um gerador constituído por cabo coaxial RG213 de tensão máxima 10kV, enrolado em tubos de PVC para um gerador Blumlein constituído por cabo coaxial URM43 de tensão máxima 4kV, enrolado em núcleos de ferrite de forma toroidal.

Foi feito o estudo teórico detalhado da propagação de ondas de tensão num gerador Blumlein, o qual permite caracterizar de forma mais expedita a amplitude das ondas de tensão em cada estágio em função do número de estágios

A modelação do circuito foi complementada com recurso ao uso do programa PSPICE, tendo sido simulados circuitos e componentes equivalentes aos utilizados no protótipo experimental e condições de funcionamento semelhantes às utilizadas na prática.

Foi, ainda, realizada a modelação do trânsito de energia durante a geração dos impulsos nos dois geradores acoplados, bem como a determinação da eficiência deste trânsito de energia.

Finalmente, os resultados obtidos mais importantes foram publicados em duas revistas internacionais, com revisores, além de terem sido apresentados em conferencias nacionais e internacionais.

5.3 Principais resultados alcançados

Com a topologia adotada foi possível criar um GHAT, que entrega, a uma carga biológica equivalente, impulsos quase retangulares bipolares de 10kV, com uma largura de cerca de 100ns, com possibilidade de alteração da distância entre impulsos positivo e negativo por variação da largura do impulso do gerador de Marx, em que:

- gerador de Marx apresenta as seguintes características:
 - gerador de impulsos monopolares positivos, até 4kV, construído com base em MOSFETs, alimentado por uma fonte de tensão contínua até 800V;
 - impulso de saída com um tempo de subida de aproximadamente 50ns para carregar o gerador Blumlein, para um valor de tensão por estágio de 500V, este valor aumenta com o incremento do número de estágios, cerca de 10ns por estágio.

- gerador de Blumlein apresenta as seguintes características:
 - gerador de impulsos bipolares, até 10kV, construído com cabo coaxial enrolado em núcleo de ferrites, para diminuição das perdas;
 - desempenho do gerador diminui com o aumento do número de estágios e da amplitude do valor da tensão cerca de 10% por estágio.
 - dimensões reduzidas devido às características do cabo coaxial escolhido.
 - Para os valores dimensionados a eficiência do GHAT é cerca de 50%, considerando a razão entre a energia que sai do gerador de Marx e a energia entregue à carga pelo gerador Blumlein.

Modelação da propagação de ondas de tensão no gerador Blumlein, com base nos factores de reflexão e transmissão para n estágios, que permite estimar a amplitude das ondas de tensão em cada estágio, tendo em conta a influência dos outros estágios.

Em relação às questões de investigação 1) e 2), geração de impulsos bipolares de alta tensão, na ordem da centena de nanossegundos, com utilização de semicondutores, os resultados de simulação e do protótipo experimental confirmam o estudo teórico do Capítulo 3, tendo em conta que a partir de uma fonte de tensão contínua de 800V, que alimenta um gerador de Marx monopolar, utilizando semicondutores de 1000V, obtiveram-se impulsos de 10kV bipolares, com 100ns de largura, sendo que a eficácia calculada experimentalmente, no gerador Blumlein, foi aproximadamente 60%.

Em relação à questão de investigação 3), verificou-se que a falta de sincronismo no funcionamento dos semicondutores, do gerador de Marx, devido às diferenças dos tempos de comando destes dispositivos, influencia significativamente a largura de impulso e amplitude dos impulsos na carga, tendo sido o maior entrave à obtenção de resultados mais parecidos com a modelação teórica.

Finalmente, a modelação dos factores de reflexão e transmissão para n estágios, levantada na questão de investigação 4), permitiu estimar a amplitude das ondas de tensão em cada estágio, tendo em conta a influência dos outros estágios.

5.4 Perspetivas de trabalho futuro

As perspetivas de desenvolvimento deste trabalho prendem-se com a melhoria do desempenho do funcionamento do circuito desenvolvido:

- Otimizar o funcionamento do gerador de Marx nomeadamente na redução do tempo de comutação dos semicondutores usados de forma a diminuir o tempo de subida e o tempo de descida da tensão que alimenta o gerador Blumlein, com tempos na ordem de 10ns;
- Estudar as técnicas de isolamento galvânico mais adequadas ao correto funcionamento do GHAT, de modo a colocar à entrada das portas dos MOSFETs, sinais de comando adequados de modo a otimizar a passagem à condução dos MOSFETs.
- Identificar no mercado e testar novos semicondutores de potência de modo a melhorar os resultados alcançados.
- Construir um gerador de Marx com o número de estágios adequado à amplitude de tensão desejada a combinar com um gerador Blumlein com um estágio apenas com o intuito de formatar a largura do impulso bipolar desejado, reduzindo as perdas do GHAT.
- Desenvolver uma solução *stripline* capaz de gerar impulsos de alta tensão bipolares de largura inferior à dezena nanossegundos em vez do gerador Blumlein que para estes casos deixa de ser competitivo.

Realizar vários testes com cargas biológicas reais de forma a verificar os efeitos da aplicação dos campos elétricos pulsados.

Bibliografia

- Altunc, S. 2009. *Subnanosecond Pulsed-power Generated Electric Fields for Cancer Treatment*. Nuclear & Plasma Sciences Society: 34-38.
- Andreev, A., Fuks, M., Roybal, M. and Schamiloglu, E. 2005. *Design and Optimization of a Low-Impedance Pulsed-Power Marx Generator to Drive High-Power Relativistic X-Band Magnetron*, Pulsed Power Conference: 214-217. Monterey, CA: IEEE.
- Angelis, A., Zeni, L. and Leone, G. 2006. *Blumlein Configuration for Variable Length High-voltage Pulse Generation by Simultaneous Switch Control*, Electronics Letters, Vol. 42: 205-207.
- Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., Saraiva, J. A., Raso, J., Martin-Belloso, O., Witrowa-Rajchert, D., Lebovka, N., Vorobiev, E. 2015. *Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry*, Food Research International, 77: 773–798.
- Barsotti, L. and Cheftel, J. 1999. *Food processing by pulsed electric fields*. II. Biological aspects. Food Reviews International, 15(2): 181-213.
- Behrend, M., Kuthi, A., Gu, X., Vernier, P., Marcu, L., Craft, C. and Gundersen, M. 2003. *Pulse Generators for Pulsed Electric Field Exposure of Biological Cells and Tissues*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10(5): 820-825.
- Biela, J., Aggeler, D., Bortis, D. and Kolar, J. 2008. *5kV/200ns pulsed power switch based on a SiC-JFET Super Cascode*, International Power Modulators and High Voltage Conference: 358-361. Las Vegas, NV: IEEE.
- Brito, P. S., Canacsinh, H., Mendes, J., Redondo, L. M. and Pereira, M. T. 2012. *Comparison between monopolar and bipolar μ s range pulsed electric fields in enhancement of apple juice extraction*. IEEE Transactions on Plasma Science, 40(10): 2348-2354.
- Canacsinh, H., Redondo, L. M., Silva, J. F. 2007. *Isolated Autonomous Capacitive Power Supplies to Trigger Floating Semiconductors in a Marx Generator*. In: ISIE 2007 - 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 4-7 June, Vigo, Spain, 821-826.
- Canacsinh, H., Redondo, L. M. and Silva, J. F. 2008. *New Solid-State Marx Topology for Bipolar Repetitive High-Voltage Pulses*. IEEE Power Electronics Specialists Conference(PESC2008): 791-795.
- Canacsinh, H., Redondo, L. M. and Silva, J. F. 2012. *Marx-Type Solid-State Bipolar Modulator Topologies: Performance Comparison*. IEEE Transactions on Plasma Science, 40(10): 2603-2610.
- Canacsinh, H. 2015. *Modulador Pulsado de alta Tensão Bipolar Baseado em Semicondutores de Potência, Análise e Otimização do Funcionamento*. Tese de Doutoramento, IST, Lisboa.
- Chen, F., Dobson, P., Graneau, N. and Smith, P. W. 2000. *Design of bipolar pulse generator for ferroelectric electron emission excitation*. Proc. IEE Symp. Pulsed Power: 24/21-24/24.
- Cherry, S. R., Sorenson, J. A. and Phelps, M. E. 2012. *Physics in Nuclear Medicine* (fourth ed.): Saunders Elsevier.

- Cook, E. G. 2000. *Review of Solid-State Modulators*, XX International Linac Conference. Monterey.
- Cook, E. G., Akana, G., Gower, E. J., Hawkins, S. A., Hickman, B. C., Brooksby, C. A., Cassel, R. L., Lamare, J. E. D., Nguyen, M. N. and Pappas, G. C. 2005. *Solid-State Modulators for RF and Fast Kickers*. Paper presented at the Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee.
- Detemmerman, B. 1985. *Parallel and Serie Connection of GTOs in Traction Applications*. I European Conference on Power Electronics and Applications.
- Efremov, A. M., Korolev, Y. D. and Kovalchuk, B. M. 2010. *Generation of Bipolar High-Voltage Pulses of Nanosecond Duration in the Electric Circuits with High-Pressure Spark Gaps*. Paper presented at the 16th International Symposium on High Current Electronics, Tomsk.
- Fryer, P. J. and Versteeg, C. 2008. *Processing technology innovation in the food industry*. Innovation: Management, Policy & Practice, 10(1): 74-90.
- Gao, L., Liu, K., Qiu, J. and Wang, D. 2010. *All Solid-State Marx Modulator with Bipolar High-Voltage Fast Narrow Pulses Output*, International Power Modulator and High Voltage: 373-376. Atlanta, USA: IEEE.
- Gao, L., Wang, D., Qiu, J. and Liu, K. 2011. *All-Solid-State Pulse Adder with Bipolar High Voltage Fast Narrow Pulses Output*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 18(3): 775-782.
- Gaudreau, M., Casey, J., Hawkey, T., Mulvaney, J. M. and Kempkes, M. 1998. *Solid-state pulsed power systems*, Conference Record of the Twenty-Third International Power Modulator Symposium, 160-163. Rancho Mirage, CA, USA.
- Gaudreau, M., Hawkey, T., Petry, J. and Kempkes, M. 2001. *A solid state pulsed power system for food processing*, Pulses Power Plasma Science Conference, Vol. 2: 1174-1177, Las Vegas, USA.
- Grenier, J. R. 2006. *Design of a MOSFET-Based Pulsed Power Supply for Electroporation*. University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Gundersen, M., Vernier, P., Marcu, L., Li, A., Zhu, X., Gallan, A., Katsouleas, T., Young, C., Behrend, M. and Craft, C. 2002. *Ultrashort Pulse Electroporation: Applications of High Pulsed Electric Fields to Induced Caspase Activation of Human Lymphocytes*, Proc. IEEE Power Modulator Conference: 667-670.
- Hair, P., Schoenbach, K. and Buescher, E. 2003. *Sub-microsecond, intense pulsed electric field applications to cells show specificity of effects*. Bioelectrochemistry, 61(1-2): 65-72.
- Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. 1996. *Fundamentos de Física - Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC.
- Heeren, T., Kolb, J. F., Xiao, S., Schoenbach, K. H. and Akiyama, H. 2006. *Pulsed Power Generators and Delivery Devices for Bioelectrical Applications*. IEEE Power Modulator Symposium: 486-489.
- Holma, J., and Barnes, M. J. 2014. *The Prototype inductive adder with droop compensation for the CLIC kiker systems*. IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, 10, 2899-2908.
- Jiang, W., Wang, X., Yuan, J., Liu, K., Qiu, J., Yokoo, T., Takayama, K., Wake, M., Shimizu, N. and Tokuchi, A. 2009. *Compact pulsed power and its industrial applications*, IEEE International Pulsed Power Conference: 1-10: IEEE.
- Johnstone, P. T. 2001. *Applications of High Voltage Power Supplies in the Purification of Water*. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

- Jonhk, C. T. A. 1988. *Engineering Electromagnetic Fields and Waves* (second ed.): John Wiley & Sons.
- Keith, W., Pringle, D., Rice, P. and Birke, P. 2000. *Distributed magnetic coupling synchronizes a stacked 25-kV mosfet switch*. IEEE Transactions on Power Electronics, 15(1): 58-61.
- Klonowski, I., Heinz, V., Toepfl, S., Gunnarsson, G. and Porkelsson, G. 2006. *Applications of Pulsed Electric Field Technology for the Food Industry*. Islândia: Icelandic Fisheries Laboratories.
- Kolikov, V., Kurochkin, V., Panina, L. and Rutberg, F. 2005. *Pulse Electric Discharges and Prolonged Microbial Resistance of Water*. Doklady Biological Sciences, 403: 279-281.
- Korioth, J. L. 1998. *A computational analysis of stacked Blumlein pulse generators*. Thesis (PhD). The University of Texas at Dallas, USA.
- Kotnik, T., Miklavcic, D. and Mir, L. M. 2001a. *Cell membrane electroporation by symmetrical bipolar rectangular pulses*. Part II. Reduced electrolytic contamination. Bioelectrochemistry, 54: 91-95.
- Kotnik, T., Mir, L. M., Flisar, K., Puc, M. and Miklavcic, D. 2001b. *Cell membrane electroporation by symmetrical bipolar rectangular pulses*. Part I. Increased efficiency of permeabilization. Bioelectrochemistry, 54: 83-90.
- Kotnik, T., Kramar, P., Pucihar, G., Miklavcic, D., and Tarek, M. 2012. *Cell membrane electroporation – Part I: The phenomenon*. IEEE Electrical Insulation Magazine, 28: 14-23.
- Kristiansen, M. 1993. *Pulsed power applications*, Pulsed Power Conference, Vol. 1: 6-10: IEEE.
- Kuthi, A., Gabrielsson, P., Behrend, M. R., Vernier, P. T. and Gundersen, M. A. 2005. *Nanosecond Pulse Generator Using Fast Recovery Diodes for Cell Electromanipulation*. IEEE Transactions on Plasma Science, 33(4): 1192-1197.
- Laurita, R., Alviano, F., Marchionni, C., Abruzzo, P., Bolotta, A., Bonsi, L., Colombo, V., Gherardi, M., Liguori, A., Ricci, F., Rossi, M., Stancampiano, A., Tazzari, P., Marini, M., 2016. *A study of the effect on human mesenchymal stem cells of an atmospheric pressure plasma source driven by different voltage waveforms*. Special issue on Plasma Medicine, Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 49, Number 36.
- Leusenkamp, M. B. J. 2012. *Impulse Voltage Generator Design and the Potential Impact on Vacuum Interrupter De-conditioning*. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.
- Levy, S., Nikolich, M., Alexeff, I., Rader, M., Buttram, M. and Sarjeant, W. 1992. *Commercial applications for modulators and pulse power technology*. Power Modulator Symposium: 8-14.
- Li, S., Huang, Y., Wang, F., Liu, J., Feng, F., Shen, X., Zheng, Q., Liu, Z., Wang, L., and Yan, K. 2015. *Fundamentals and Environmental Applications of Non-thermal Plasmas: Multi-pollutants Emission Control from Coal-Fired Flue Gas*. Plasma Chemistry & Plasma Processing, Vol. 34, Issue 3, 579-603.
- Liu, K., Luo, Y. and Qiu, J. 2009. *A Repetitive High Voltage Pulse Adder Based on Solid State Switches*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(4): 1076 - 1080.
- Liu, Z. 2008. *Multiple-switch pulsed power generation based on a transmission line transformer*. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- Luft, C. and Ketteler, R. 2015. *Electroporation Knows No Boundaries: The Use of Electrostimulation for siRNA Delivery in Cells and Tissues*. J Biomol Screen, 20(8): 932-42.

- Mankowski, J. and Kristiansen, M. 2000. *A Review of Short Pulse Generator Technology*. IEEE Transactions on Plasma Science, 28(1): 102-108.
- Martin, J. 1992. *Nanosecond pulse techniques*. Proceedings of the IEEE, 80(6): 934-945.
- Mendes, J. P. M., Redondo, L. M., Canacsinh, H. and Rossi, J. O. 2012a. *Modeling of a Solid-State Bipolar Blumlein Generator for n Stages*. IEEE Transactions on Plasma Science, 40(10): 2611-2617.
- Mendes, J. P. M., Redondo, L. M., Canacsinh, H., Vieira, M. and Rossi, J. O. 2012b. *Modelling of n Stage Blumlein Stacked Lines for Bipolar Pulse Generation*. Paper presented at the DoCEIS'12, Lisbon.
- Mir, L., Orlowski, S., Jr., J. B., Teissié, J., Rols, M., Sersa, G., Miklavcic, D., Gilbert, R. and Heller, R. 1995. *Biomedical applications of electric pulses with special emphasis on antitumor electrochemotherapy*. Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 38: 203-207.
- Moura, D. 1980. *Técnicas de alta tensão*. Lisboa: Técnica.
- Narsetti, R., Curry, R., McDonald, K., Nichols, L. and Clevenger, T. 2005. *Application of Pulsed Electric Fields and Magnetic Pulse Compressor Technology for Water Sterilization*, Pulsed power conference: 1282-1285. Monterey, CA.
- Ramaswamy, R., Jin, T., Balasubramaniam, V. M. and Zhang, H. *Pulsed Electric Field Processing, Fact Sheet for Food Processors* - The Ohio State University. Columbus: Department of Food Science and Technology.
- Ramo, S., Whinnery, J. and Duzer, T. V. 1965. *Fields and waves in communication electronics*. California: John Wiley & Sons, Inc.
- Raso, J. and Heinz, V. 2006. *Pulse Electric Fields Technology for the Food Industry*. In Springer (Ed.). United States of America.
- Rebersek, M., Kranjc, M., Pavliha, D., Batista-Napotnik, T., Danilo Vrtacnik, Amon, S. and Miklavcic, D. 2009. *Blumlein Configuration for High-Repetition-Rate Pulse Generation of Variable Duration and Polarity Using Synchronized Switch Control*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 56(11): 2642-2648.
- Rebersek, M. and Miklavcic, D. 2011. *Advantages and Disadvantages of Different Concepts of Electroporation Pulse Generation*. Automatika, 52(1): 12-19.
- Redondo, L. M., Pinhão, N., Margato, E. and Silva, J. F. 2002. *Progress on High-voltage Pulse Generators, Using Low Voltage Semiconductors (< 1 kV), Designed for Plasma Immersion Ion Implantation (PIII)*. Surface and Coatings Technology, 156(1): 61-65.
- Redondo, L. M. 2003. *Fontes de Alta Tensão Pulsada para Implantação Iónica de Imersão em Plasma*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Redondo, L., Silva, J., Tavares, P. and Margato, E. 2005a. *All silicon Marx-bank topology for high-voltage, high-frequency rectangular pulses*, IEEE Power Electronics Specialists Conference: 1170-1174.
- Redondo, L. M., Silva, J. F., Tavares, P., Margato, E. 2005b. *All Silicon Marx-bank topology for high-voltage, high-frequency rectangular pulses*. In Proceedings of the 2005 IEEE 36th Annual Power Electronics Specialists Conference, 12-16 June, Recife, Brasil, 1170-1174.
- Redondo, L. and Silva, J. F. 2011. *Solid State Pulsed Power Electronics*. In M. H. Rashid (Ed.), Power Electronics Handbook, Third ed.: 669-707.

- Rivaletto, M. and Pignolet, P. 1998. *Characterization and realization of 120 kV, 200 ns transmission line pulse generator*. The European Physical Journal Applied Physics, 3(2): 159-167.
- Roche, S. 1998. *Solid state pulsed power systems*. Physique & industrie.
- Rossi, J. O. 1998. *Transmission Line Transformers*. Thesis (PhD). Oxford University, United Kingdom.
- Rossi, J., Ueda, M. and Barroso, J. 2002. *Design of 150-kV 300-A 100-Hz Blumlein Coaxial Pulser for Long-Pulse Operation*. IEEE Transactions on Plasma Science, 30(5): 1622-1626.
- Rossi, J., Ueda, M. and Barroso, J. 2003a. *Design and Construction of a 150kV/300A/1us Blumlein Pulser*. WSEAS Transactions on Systems, 2(1): 24-28.
- Rossi, J., Ueda, M. and Barroso, J. 2003b. *Design and pspice simulation of a 150kV/300A/1μs coaxial pulse generator*. Proc. 7th Brazilian Power Electronics Conference, 1: 521-523.
- Rossi, J. O., Barroso, J. J. and Ueda, M. 2006. *Modelling of Wound Coaxial Blumlein Pulsers*. IEEE Transactions on Plasma Science, 34(5): 1846-1852.
- Schamiloglu, E., Barker, R. J., Gundersen, M. and Neuber, A. A. 2004. *Modern Pulsed Power: Charlie Martin and Beyond*. Proceedings of the IEEE, 92(7): 1014-1020.
- Schoenbach, K., Beebe, S. and Buescher, E. 2001. *Intracellular effect of ultrashort electrical pulses*. Bioelectromagnetics, 22(6): 440-448.
- Schoenbach, K. H., Katsuki, S., Stark, R. H., Buescher, E. S. and Beebe, S. J. 2002. *Bioelectric - New Applications for Pulsed Power Technology*. IEEE Transactions on Plasma Science, 30(1): 293-300.
- Schoenbach, K., Joshi, R., Kolb, J., Chen, N., Stacey, M., Blackmore, P., Buescher, E. and Beebe, S. 2004. *Ultrashort Electrical Pulses Open a New Gateway into Biological Cells*. Proc. IEEE, 92(7): 1112-1137.
- Schoenbach, K. H., Katsuki, S., Akiyama, H., Heeren, T., Kolb, J. F., Xiao, S., Camp, T., Joshi, R. P., Osgood, C., Nuccitelli, R. and Beebe, S. J. 2006. *Biological Effects of Intense Subnanosecond Electrical Pulses*. Power Modulator Symposium: 573-576.
- Shin, W., Choi, J. and Kim, T. 2006. *Bidirectional pulse plasma power supply for treatment of air pollution*, Power Electronics Specialists Conference: 1-6. Jeju, Korea: IEEE.
- Silva, J. F. 1998. *Eletrónica Industrial*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Sluis, L. V. d. 2001. *Transients in Power Systems*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Smith, P. W. 2002. *Transient Electronics Pulse Circuit Technology: 71-88*: Jonh Wiley & Sons, LTD.
- Stacey, M., Osgood, C., Kalluri, B. S., Cao, W., Elsayed-Ali, H. and Abdel-Fattah, T. 2011. *Nanosecond pulse electrical fields used in conjunction with multi-wall carbon nanotubes as a potential tumor treatment*. Biomedical Materials, 6.
- Takaki, K. and Katsuki, S. 2009. *Industrial Applications of Pulsed Power Technology*. IEEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 129-A(2): 62-65.
- Verma, R., Shyam, A., Chaturvedi, S., Kumar, R., Lathi, D., Sarkar, P., Chaudhary, V., Shukla, R., Debnath, K., Sharma, S., Sonara, J., Shah, K., Adhikary, B., Jigna, T. and Piyush, J. 2004. *A transmission line based compact repetitive and portable cascaded Blumlein pulser*. 526-529.

- Verma, R., Shyam, A., Chaturvedi, S., Kumar, R., Lathi, D., Chaudhary, V., Shukla, R., Debnath, K., Sharma, S., Sonara, J., Shah, K., Adhikary, B., Thakkar, R. and Chauhan, B. 2005. *Portable & low cost giga-watt pulsed power source for intense electron beam generation*, Pulsed Power Conference: 692-695. Monterey: IEEE.
- Verma, R., Shyam, A. and Shah, K. 2006. *Design and performance analysis of transmission line-based nanosecond pulse multiplier*. *Sādhanā*, 31(5): 597-611.
- Vernier, P., Sun, Y., Marcu, L., Salemi, S., Craft, C. and Gundersen, M. 2003. *Calcium bursts induced by nanosecond electric pulses*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 310(2): 286-295.
- Wang, M. 2016. *A Tesla-Blumlein PFL-Bipolar Pulsed Power Generator*. Doctor Thesis, Loughborough University, UK.
- Weaver, J. C. 2000. *Electroporation of Cells and Tissues*. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1).
- Weaver, J. C. and Chizmadzhev, Y. A. 1996. *Theory of electroporation: A review*. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 41: 135-160.
- Wijetunga, P., Gu, X., Vernier, P. T., Kuthi, A., Behrend, M. and Gundersen, M. A. 2003. *Electrical modeling of pulsed power systems for biomedical applications*, IEEE Pulsed Power Conference.
- Williams, B.W. 2005. *Chapter 10: Series and Parallel Device Operation, Protection, and Interference*, *Power Electronics: Device, Drivers, Applications and Passive Components*.
- Yarmush, M. L., Golberg, A., Sersa, G., Kotnik, T. and Miklavcic D. 2014. *Electroporation-based technologies for medicine: principles, applications, and challenges*. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 16: 295-320.
- Zhang, Q., Barbosa-Cánovas, G. V. and Swanson, B. G. 1995. *Engineering Aspects of Pulse Electric Field Pasteurization*. *Journal of Food Engineering*, 25: 261-281.

Anexos

Anexo 1 – Impulsos num Gerador Blumlein Usando o Teorema de Laplace

Pretende-se demonstrar que o valor da impedância da carga adaptada e o seu efeito no gerador Blumlein.

Considerando que as impedâncias dos troços de LT e a impedância da carga são resistivas ou não reactivas. A análise começa pela caracterização do circuito equivalente de Laplace de um circuito Blumlein. Conforme o circuito da Figura A.1, este circuito é constituído por 2 troços de LT coaxial onde se pode verificar que a LT_2 está em aberto e pode ser representada por uma impedância, dada pela equação A1.1.

$$Z_{LT_2} = Z_0 \coth(s\delta) \quad (\text{A1.1})$$

O comportamento da LT_1 é mais complexo, como inicialmente o troço de LT está carregado com uma tensão V , assume-se que em $t=0$, quando S_1 é fechado, começa a propagar-se uma onda quadrada de tensão de amplitude $-V$ ao longo da LT_1 . Esta acção quando o interruptor S_1 fecha é o início do processo de geração dos impulsos de alta tensão V_{out} , S_1 representa que a impedância do gerador é nula, equivalente a um curto circuito naquele ponto.

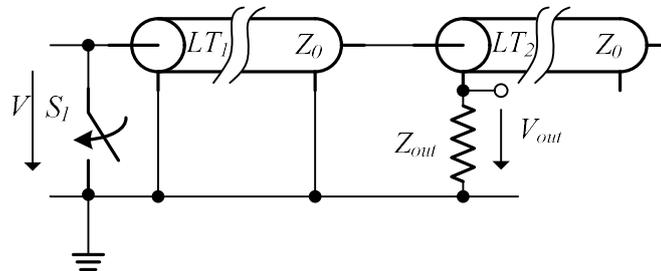


Figura A1.1 – Esquemático de um circuito Blumlein.

O circuito equivalente de Laplace para um circuito Blumlein é apresentado na Figura A.2.

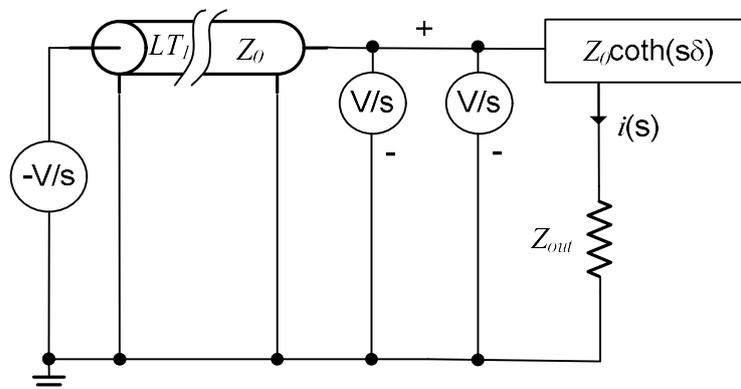


Figura A1.2 – Circuito equivalente da transformada de Laplace de um circuito Blumlein.

Neste circuito ambas as linhas LT_1 e LT_2 estão inicialmente carregadas com uma tensão, representada pelas fontes de tensão de amplitude V , no início da geração do impulso de tensão em V_{out} , $t=0^+$, representada pelas fontes de tensão entre as duas LT.

A polaridade das duas fontes de tensão assinalada mostra que quando as duas LT estão carregadas com a mesma tensão, a influência de uma é anulada pelo potencial da outra. O problema é determinar a corrente na carga $I(s)$. Das equações que caracterizam as LT, sabe-se que:

$$\begin{aligned} V_s &= V_r \cosh(\gamma l) + I_r Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \frac{V_s}{I_r} &= Z_r \cosh(\gamma l) + Z_0 \sinh(\gamma l) \end{aligned} \quad (A1.2)$$

Com:

$$\begin{aligned} V_s &= -\frac{V}{s} \\ I_r &= I(s) \end{aligned} \quad (A1.3)$$

Onde V_s é a tensão à entrada da LT_1 , V_r é a tensão na carga Z_{out} , I_r é a corrente na carga, l o comprimento eléctrico de cada LT e γ a constante de propagação.

Considerando neste caso LT sem perdas, temos:

$$\gamma l = s\delta \quad (A1.4)$$

A carga Z_r é a soma da carga do gerador Blumlein Z_{out} em série com a impedância da LT_2 :

$$Z_r = Z_{out} + Z_0 \coth(s\delta) \quad (A1.5)$$

A tensão na carga $V_{out}(s)$ é dada por:

$$\begin{aligned} V_{out}(s) &= I(s)Z_{out} \\ &= -\frac{VZ_{out}}{s} \frac{1}{(Z_{out} + Z_0 \coth(s\delta)) \cosh(s\delta) + Z_0 \sinh(s\delta)} \\ &= -\frac{VZ_{out}}{s} \frac{\sinh(s\delta)}{Z_{out} \cosh(s\delta) \sinh(s\delta) + Z_0 + 2Z_0 \sinh^2(s\delta)} \end{aligned} \quad (A1.6)$$

Convertendo as funções hiperbólicas nas suas identidades exponenciais, tem-se:

$$\begin{aligned}
 V_{out}(s) &= \frac{-VZ_{out}}{s} \frac{\frac{e^{s\delta} - e^{-s\delta}}{2}}{\frac{Z_{out}(e^{s\delta} + e^{-s\delta})(e^{s\delta} - e^{-s\delta})}{4} + Z_0 \left(1 + \frac{(e^{s\delta} - e^{-s\delta})^2}{2}\right)} \\
 &= \frac{-VZ_{out}}{s(Z_{out} + 2Z_0)} e^{-s\delta} \frac{(1 - e^{-2s\delta})}{\left(1 - \left(\frac{Z_{out} - 2Z_0}{Z_{out} + 2Z_0}\right) e^{-4s\delta}\right)}
 \end{aligned} \tag{A1.7}$$

Esta expressão, do impulso de tensão na carga V_{out} , pode ser escrita usando a série binomial, tem-se:

$$V_{out}(s) = \frac{-VZ_{out}}{s(Z_{out} + 2Z_0)} e^{-s\delta} (1 - e^{-2s\delta}) \left(1 + \left(\frac{Z_{out} - 2Z_0}{Z_{out} + 2Z_0}\right) e^{-4s\delta} + \left(\frac{Z_{out} - 2Z_0}{Z_{out} + 2Z_0}\right)^2 e^{-8s\delta} + \left(\frac{Z_{out} - 2Z_0}{Z_{out} + 2Z_0}\right)^3 e^{-12s\delta} + \dots \right) \tag{A1.7}$$

Calculando a transformada inversa de Laplace, tem-se:

$$v_{out}(t) = \frac{-VZ_{out}u(t-\delta)}{Z_{out} + 2Z_0} \left(1 - u(t-3\delta) + \left(\frac{Z_{out} - 2Z_0}{Z_{out} + 2Z_0}\right) (u(t-5\delta) - u(t-7\delta)) + \left(\frac{Z_{out} - 2Z_0}{Z_{out} + 2Z_0}\right)^2 (u(t-9\delta) - u(t-11\delta)) + \left(\frac{Z_{out} - 2Z_0}{Z_{out} + 2Z_0}\right)^3 (u(t-13\delta) - u(t-15\delta)) + \dots \right) \tag{A1.8}$$

Onde:

$u(\Delta t)=1$ para $\Delta t>0$, $u(\Delta t)=0$ para $\Delta t<0$ e $\Delta t=(t-n\delta)$, para $n=1, 3, 5, \dots$

Por análise da equação (A1.8) conclui-se que se $Z_{out}=2Z_0$, valor de carga adaptada para um gerador Blumlein com 1 estágio as reflexões no circuito são anuladas.

Para um gerador Blumlein com n estágios a equação (A1.8) toma a seguinte forma:

$$v_{out}(t) = \frac{-VZ_{out}u(t-\delta)}{Z_{out} + 2nZ_0} \left(\begin{aligned} &1 - u(t-3\delta) + \left(\frac{Z_{out} - 2nZ_0}{Z_{out} + 2nZ_0}\right) (u(t-5\delta) - u(t-7\delta)) \\ &+ \left(\frac{Z_{out} - 2nZ_0}{Z_{out} + 2nZ_0}\right)^2 (u(t-9\delta) - u(t-11\delta)) \\ &+ \left(\frac{Z_{out} - 2nZ_0}{Z_{out} + 2nZ_0}\right)^3 (u(t-13\delta) - u(t-15\delta)) + \dots \end{aligned} \right) \quad (A1.9)$$

Anexo II – Imagens do protótipo construído.



Figura All.1 – Vista geral.

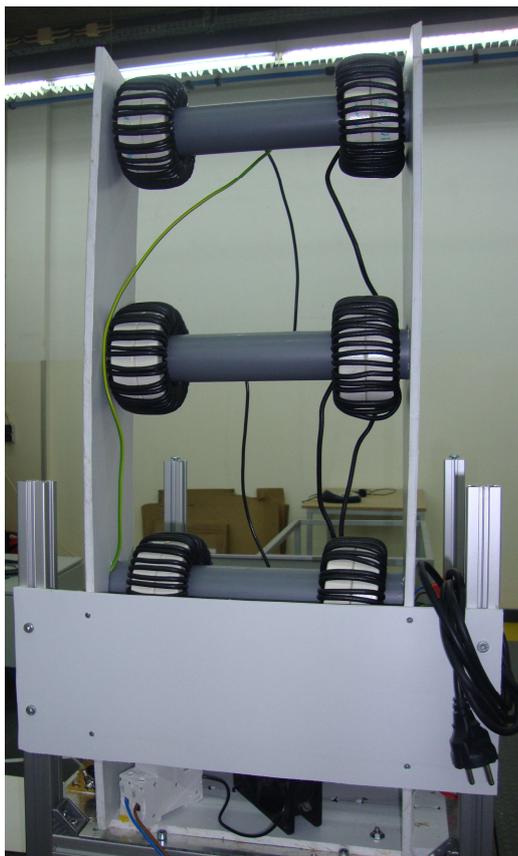


Figura All.2 – Pormenor do Gerador Blumlein.



Figura All.3 – Comando e controlo do GHAT.

Anexo III – Placa de cada estágio do gerador de Marx.

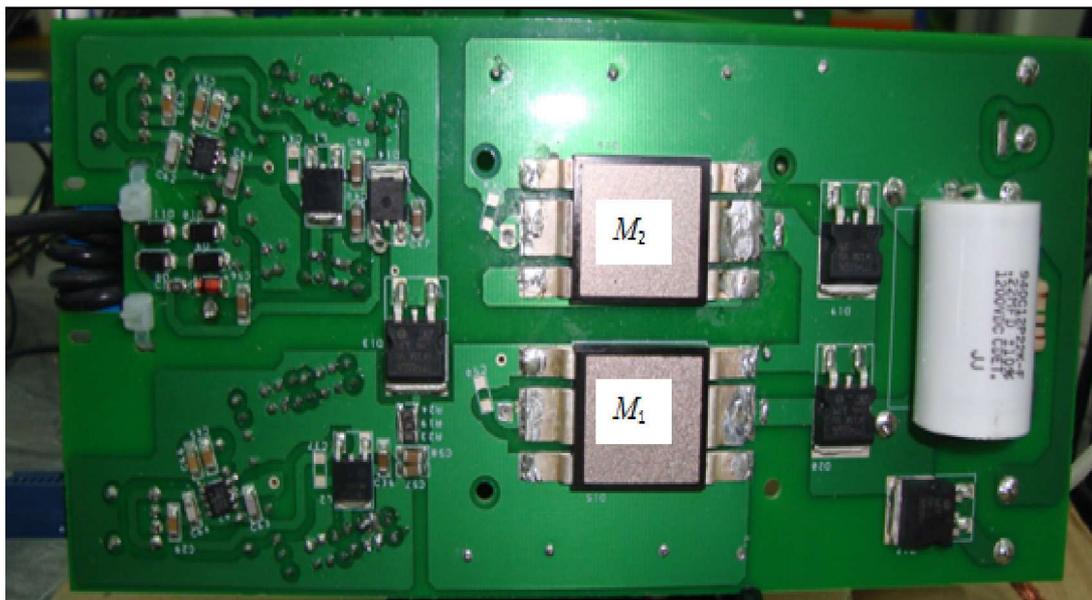


Figura AIII.1 – Vista de baixo.



Figura AIII.1 – Vista de cima.