

FERNANDO IMAI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE
UM GERADOR DE MARX BIPOLAR
BASEADO EM TOPOLOGIA
FULL-BRIDGE PARAMETRIZÁVEL
APLICADO À ELETROPORAÇÃO**

Joinville

2019

FERNANDO IMAI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM
GERADOR DE MARX BIPOLAR BASEADO EM
TOPOLOGIA FULL-BRIDGE PARAMETRIZÁVEL
APLICADO À ELETROPORAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Centro de Ciências Tecnológicas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Yales Rômulo de Novaes

Joinville

2019

FERNANDO IMAI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM
GERADOR DE MARX BIPOLAR BASEADO EM
TOPOLOGIA FULL-BRIDGE PARAMETRIZÁVEL
APLICADO À ELETROPORAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Trabalho aprovado. Joinville, 26 de março de 2019.

Prof. Yales Rômulo de Novaes, Dr
Orientador/Avaliador

Prof. Diego Santos Greff, Dr
Avaliador

Prof. Joselito Anastácio Heerd, Dr
Avaliador

Joinville
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha noiva Carolina Mayumi Murakami pelo companheirismo, ajuda e compreensão desde que nos conhecemos. Em especial nestes últimos três anos de muito trabalho e estudo.

À minha família, em especial meu pai Oscar, minha irmã Ana Paula, meu irmão Yudi e minha tia Rosa. Por tudo que fizeram e fazem por mim nesta vida.

Aos doutorandos Felipe Joel Zimann, Gustavo Lambert e Rodolfo Lauro Weinert pelos conhecimentos e ajuda transmitidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos docentes Prof. Dr. Antônio Flavio Licarião, Prof. Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira e Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UDESC, pelas excelentes aulas ministradas.

Em especial ao Prof. Dr. Yales Rômulo de Novaes pelas aulas ministradas, conhecimento, apoio e paciência durante a orientação no desenvolvimento desta dissertação.

Às equipes de limpeza, segurança, apoio técnico e bolsistas do campus por manterem o nPEE um local com boas condições e estrutura para estudo e trabalho.

Ao IFSC pela concessão de afastamento integral ao longo do último ano, para finalização desta pós graduação.

*"Sejas dedicada(o),
ame o que faz,
construa um caráter
e ajude os demais. "
(Maneva)*

*"Don't lose your grip
on the dreams of the past.
You must fight
just to keep them alive. "
(Survivor)*

RESUMO

A eletroporação é um procedimento que vem sendo utilizado em crescentes aplicações relacionadas às áreas médica, biológica, de processamento de alimentos e estética. Ela consiste da aplicação de pulsos de tensão com elevadas intensidades, para que se crie um campo elétrico no meio, que pode ser um conjunto de células em suspensão, tecidos vivos, órgãos ou fluidos diversos, de modo a gerar poros nas membranas celulares das entidades biológicas mais básicas desses ambientes, para procedimentos como introdução de medicamentos, transferência genética, fusão ou até acelerar a morte de um conjunto de células. Compreender as causas da eletroporação é o primeiro foco deste trabalho, que detalha o comportamento físico da membrana quando exposta a um campo elétrico. Em seguida são analisados os principais tipos e topologias de circuitos geradores de pulsos de tensão relatados e propostos no meio acadêmico, verificados quais os parâmetros mais relevantes nos trens de pulso envolvidos na eletroporação, detalhado um circuito para análise, projeto, montagem e testes em laboratório a ser aplicado em determinada finalidade. A escolha quanto ao tipo de circuito foi de um Gerador de Marx, sistema multiplicador da tensão de entrada através da carga de capacitores em paralelo e os descarregando em série sobre o meio a ser eletroporado. Esse tipo de topologia eleva a tensão de entrada de acordo com a quantidade de células capacitivas. O protótipo deste trabalho é capaz de quadruplicar uma tensão de entrada de até 300 V. Ao final, são realizados testes em uma amostra vegetal, para analisar o funcionamento do gerador quanto aos múltiplos parâmetros ajustáveis proporcionados pelo circuito e resposta obtida na amostra.

Palavras-chave: Eletroporação. Campo elétrico pulsado. Multiplicador de tensão. Gerador de Marx. Parâmetro elétricos.

ABSTRACT

Electroporation is a technique in constant development that has been used specially in medical, biological, food processing and beauty areas. It consists of applying high voltage pulses to generate an electric field in a sample like a cell culture, alive tissue, organs or some kind of fluid, in order to create pores on the cell membranes of the biological material. So processes like drug introduction, genetics transfer, cell fusion or even sterilization can be facilitated. Understanding the causes of electroporation is the first goal of this work, that will explain the physical behaviour of a membrane when exposed to an electric field. Afterwards the main circuits and topologies proposed in international publications capable of generating high pulsed voltage are analyzed. Then it is focused on the most important electrical parameters related to electroporation processes, so a circuit can be studied, designed, built and tested to a specific use. The chosen circuit is a Marx Generator, a voltage multiplier that charges a bunch of electrolytic capacitors in parallel and discharges them on the electroporated sample. The circuit in this work is capable of achieving 1200 V on the load with a 300 V power supply. In the end, practical tests are made using a vegetable sample, in order to analyze the functions of the generator, controlling the adjustable parameters of the prototype.

Keywords: Electroporation. Pulsed electric field. Voltage multiplier. Marx generator. Electrical parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exposição de uma célula a um campo elétrico e possíveis efeitos	29
Figura 2 – Largura de pulso e campo elétrico aplicáveis aos principais tratamentos relacionados à eletroporação	30
Figura 3 – Comportamento dos principais elementos químicos em um processo de eletroporação. (a) Repouso. (b) Período de aplicação dos pulsos. (c) Íons transferidos para o meio intracelular após reorientação da bicamada.	36
Figura 4 – Dinâmica molecular em um processo de eletroporação. (a) Repouso. (b) Início da transferência molecular entre os meios. (c) Poro estabelecido na membrana.	36
Figura 5 – Esquema de uma PFN de Blumlein	42
Figura 6 – Arranjo duplo de PFN de Blumlein para obtenção de valor maior que da entrada	43
Figura 7 – Exemplo de circuito Gerador de Marx	47
Figura 8 – Gerador de Marx com dois estágios proposto em (ZABIHI; ZABIHI; ZARE, 2011)	48
Figura 9 – Gerador de Marx com cinco estágios proposto em (REZANEJAD; SHEIKHOLESAMI; ADABI, 2014)	49
Figura 10 – Gerador de Marx bipolar com dois estágios proposto em (DELSHAD; REZANEJAD; SHEIKHOLESAMI, 2017)	50
Figura 11 – Gerador de Marx bipolar proposto em (REDONDO; CANACSINH; SILVA, 2009)	50
Figura 12 – Gerador de Marx bipolar com redução de componentes proposto em (CANACSINH; REDONDO; SILVA, 2012)	51
Figura 13 – Gerador de Marx bipolar proposto em (YAO et al., 2016)	51
Figura 14 – Gerador de Marx unipolar com dois estágios proposto em (SHI et al., 2015)	52
Figura 15 – Gerador de Marx unipolar com dois estágios de topologia HB proposto em (SAKAMOTO et al., 2012)	52
Figura 16 – Gerador de Marx bipolar com dois estágios de topologia FB proposto em (SAKAMOTO et al., 2012)	53
Figura 17 – Topologias básicas dos principais circuitos geradores de pulsos de tensão. (a) Circuito com fonte tensão no nível do pulso de saída (b) <i>Pulse Forming Network</i> de Blumlein (c) Inversor multinível (d) Conversor CC-CC elevador (e) Gerador de Marx.	56
Figura 18 – Gerador de Marx proposto	57
Figura 19 – Período completo de um protocolo de eletroporação	60

Figura 20 – Circuito análogo do eletroporador conectado à uma carga biológica. Sendo (a) referente aos pulsos iniciais e (b) após a minimização de sua taxa de aumento da condutância	61
Figura 21 – Etapa de carga dos capacitores	64
Figura 22 – Etapa de aplicação de pulsos positivos	65
Figura 23 – Etapa de aplicação de pulsos negativos	65
Figura 24 – Estado dos interruptores e tensão de saída durante aplicação dos pulsos	66
Figura 25 – Etapa descarga dos capacitores	66
Figura 26 – Diagrama de blocos do sistema de potência do protótipo	67
Figura 27 – Arranjo dos circuitos auxiliares do protótipo	68
Figura 28 – Diagrama de blocos do circuito do oscilador	68
Figura 29 – Intensidades das correntes que fluem pelos interruptores de célula na etapa de carga	77
Figura 30 – Potencial dos nós conectados aos polos superiores dos capacitores nos pulsos positivos	79
Figura 31 – Potencial dos nós conectados aos polos superiores dos capacitores nos pulsos negativos	80
Figura 32 – Comportamentos possíveis da temperatura de junção de um interruptor em aplicação pulsada	86
Figura 33 – Tensão de carga de um capacitor e estado dos interruptores de célula	89
Figura 34 – Correntes de carga nos interruptores S_B e S_D	90
Figura 35 – Tensão sobre os interruptores das células na etapa de pulsos	90
Figura 36 – Correntes nos interruptores das células na etapa de pulsos	91
Figura 37 – Esforços de tensão sobre os interruptores de carga na etapa de pulsos	91
Figura 38 – Esforços de tensão sobre os diodos na etapa de pulsos	92
Figura 39 – Vista geral do protótipo	97
Figura 40 – Detalhe da placa do microcontrolador	98
Figura 41 – Detalhe da placa com as fontes isoladas	98
Figura 42 – Sinal pulsado de saída do CI SN7407	99
Figura 43 – Sinal de alimentação dos transformadores de comando	100
Figura 44 – Tensões de <i>gate</i> dos interruptores de célula durante período de carga	100
Figura 45 – Tensões de <i>gate</i> dos interruptores de célula durante período de pulsos	101
Figura 46 – Pulsos de tensão de 1160 V, 500 μs e 440 Hz e corrente sobre a carga	102
Figura 47 – Tempo de subida do primeiro pulso do protocolo	103
Figura 48 – Tensões V_{DS} dos interruptores de um braço das células	103
Figura 49 – Detalhe da tensão sobre os interruptores de carga em um pulso negativo	104
Figura 50 – Detalhe da tensão sobre os diodos em um pulso positivo	105
Figura 51 – Dimensões em mm do dissipador HS 4225	108
Figura 52 – Eletrodo utilizado nos testes	110
Figura 53 – Resultados das aplicações dos quatro primeiros protocolos	111

Figura 54 – Resultados das aplicações dos protocolos 5 e 6	112
Figura 55 – Resultados das aplicações dos protocolos 7 e 8	112
Figura 56 – Resultados das aplicações dos protocolos 9 e 10	113
Figura 57 – Tensão e corrente sobre a carga no protocolo 4	114
Figura 58 – Corrente sobre a carga no protocolo 4	114
Figura 59 – Corrente sobre a carga no protocolo com dez pulsos de 500 V, 500 μs e 440 Hz	115
Figura 60 – Resultado prático da aplicação do protocolo com dez pulsos de 500 V, 500 μs e 440 Hz	115
Figura 61 – Queda de tensão de pulsos do protocolo 4	117
Figura 62 – Fluxograma do programa implementado no microcontrolador .	141
Figura 63 – Layout da placa de célula capacitiva	143
Figura 64 – Layout da placa de fontes isoladas	144
Figura 65 – Layout da placa do oscilador	145
Figura 66 – Layout da placa do microcontrolador	146
Figura 67 – Esquema elétrico do Gerador de Marx	148
Figura 68 – Esquema elétrico dos circuitos do oscilador e de fontes isoladas .	150
Figura 69 – Esquema elétrico dos circuitos de <i>drivers</i> dos interruptores e microcon- trolador	151
Figura 70 – Dimensões do núcleo e carretel utilizados nos transformadores das fon- tes	153
Figura 71 – Gráfico da impedância térmica do MOSFET APT5010B2VR .	161
Figura 72 – Configuração de pinos dos CIs SN74HC14 e SN7407 . . .	162
Figura 73 – Configuração de pinos do CI IR442X	162
Figura 74 – Configuração de pinos do CI HCPL3120	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos comerciais de eletroporadores e especificações	31
Tabela 2 – Comparação entre as propostas acadêmicas de GM	54
Tabela 3 – Comparação entre os principais circuitos geradores de pulsos de tensão	55
Tabela 4 – Parâmetros elétricos dos pulsos do protótipo	58
Tabela 5 – Relação entre tensões de entrada e saída e quantidade de células carregadas	59
Tabela 6 – Relação entre larguras de pulsos, frequências e tempos entre pulsos disponíveis no protótipo	60
Tabela 7 – Máximas correntes dos interruptores de células	94
Tabela 8 – Informações técnicas do MOSFET APT5010B2VR	94
Tabela 9 – Máximas correntes dos interruptores de carga e diodos	95
Tabela 10 – Informações técnicas do IGBT G4PH40UD	95
Tabela 11 – Informações técnicas do IGBT GP50B60PD	96
Tabela 12 – Informações técnicas do diodo FR307	96
Tabela 13 – Protocolos dos pulsos aplicados nas batatas	110
Tabela 14 – Quedas de tensões teóricas e reais do gerador	116
Tabela 15 – Variação das impedâncias de carga	118
Tabela 16 – Parâmetros de dimensionamento dos transformadores das fontes	152
Tabela 17 – Áreas dos núcleo <i>NEE-20/10/5</i> e carretel <i>E-20</i>	153
Tabela 18 – Dimensões dos fios AWG 30 e 31	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWG	<i>Alternate Wire Gauge</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
FB	<i>Full-Bridge</i>
GM	Gerador de Marx
GND	<i>Ground</i>
HB	<i>Half-Bridge</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IRE	<i>Irreversible Electroporation</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PEF	<i>Pulsed Electric Field</i>
PFN	<i>Pulse Forming Network</i>
SiC	Carbeto de silício

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Relação entre secundário e primário do transformador
A_e	Área da seção transversal do núcleo magnético
A_w	Área da janela do carretel
B_{max}	Máxima densidade de fluxo magnético do núcleo
C	Capacitância de uma célula do gerador
D_p	<i>Duty cycle</i> dos pulsos
D_s	<i>Duty cycle</i> de chaveamento
D_1	Diodo de carga 1
D_2	Diodo de carga 2
D_3	Diodo de carga 3
D_4	Diodo de carga 4
E	Intensidade do campo elétrico
E_c	Energia de carga dos capacitores
E_o	Energia fornecida pelos capacitores
E_r	Energia residual dos capacitores
f	Fator de formato celular
f_p	Frequência dos pulsos
f_s	Frequência de chaveamento
I_{rms}	Corrente eficaz
I_{med}	Corrente média
I_p	Corrente de pulso
I_{pmax}	Máxima corrente de pulso
J_{max}	Máxima densidade de corrente
k	Quantidade de pulsos
K_f	Coefficiente de perdas por correntes parasitas

K_h	Coeficiente de perdas por histerese
k_w	Fator de ocupação da janela do carretel
k_p	Fator de ocupação dos enrolamentos
n	Número de células capacitivas carregadas
N_P	Número de espiras do enrolamento primário
N_S	Número de espiras do enrolamento secundário
P_{CAP}	Perdas no capacitor
P_{com}	Perdas por comutação
P_{cond}	Perdas por condução
P_{cond_C}	Perdas por condução no período de carga
P_{cond_P}	Perdas por condução no período de pulsos
P_{cu}	Perdas nos enrolamentos de cobre
P_D	Perdas totais no diodo
P_{IGBT}	Perdas totais no IGBT
P_{med}	Potência média
P_{MOSFET}	Perdas totais no MOSFET
P_n	Perdas no núcleo magnético
P_o	Potência de saída
P_p	Potência de pulso
$P_{P_{cond}}$	Perdas por condução no pico de operação
$P_{P_{MOSFET}}$	Perdas totais no MOSFET no pico de operação
P_{trafo}	Perdas totais do transformador
R	Raio da célula
R_C	Resistência para carga dos capacitores
R_D	Resistência de descarga dos capacitores
R_{DS}	Resistência entre <i>drain</i> e <i>source</i>

R_g	Resistência de <i>gate</i>
r_{max}	Máximo raio do condutor
R_O	Resistência da saída
R_{SE}	Resistência série equivalente
r_T	Resistência do diodo
R_t	Resistência térmica do núcleo magnético
$R_{th_{CD}}$	Resistência térmica entre cápsula e dissipador
$R_{th_{DA}}$	Resistência térmica entre dissipador e ambiente
$R_{th_{JA}}$	Resistência térmica entre junção e ambiente
$R_{th_{JC}}$	Resistência térmica entre junção e cápsula
S_A	Interruptor A da célula capacitiva
S_B	Interruptor B da célula capacitiva
S_C	Interruptor C da célula capacitiva
S_{ch}	Interruptor de carga
S_D	Interruptor D da célula capacitiva
S_{dch}	Interruptor de descarga
S_p	Seção do condutor do enrolamento primário
S_s	Seção do condutor do enrolamento secundário
t	Tempo
T_A	Temperatura ambiente
t_c	Tempo de carga
T_C	Temperatura da cápsula
t_{ep}	Intervalo entre pulsos
T_J	Temperatura de junção
$T_{J_{max}}$	Temperatura de junção máxima
t_{off}	Tempo de desativação do interruptor

t_{on}	Tempo de ativação do interruptor
t_p	Tempo de pulso
T_P	Período do protocolo de pulsos
V_{CE}	Tensão entre coletor e emissor
V_{CEsat}	Tensão de saturação entre coletor e emissor
V_{DS}	Tensão entre <i>drain</i> e <i>source</i>
V_g	Tensão de <i>gate</i>
V_i	Tensão de entrada
V_m	Potencial elétrico transmembrana
V_n	Volume do núcleo magnético
V_o	Tensão de saída
V_{omax}	Máxima tensão de saída
V_p	Tensão do primário dos transformadores
V_s	Tensão do secundário dos transformadores
V_{TO}	Tensão de <i>treshold</i> do diodo
Z_{thJC}	Impedância térmica entre junção e cápsula
Z_{min}	Impedância mínima de saída
Z_o	Impedância de saída
Z_0	Impedância inicial da carga
Z_1	Impedância da carga ao final do primeiro pulso
Z_2	Impedância final da carga
ΔB	Variação da densidade magnética
ΔT	Elevação de temperatura do núcleo magnético
ΔV_{max}	Máxima queda de tensão da célula capacitiva
ρ_{cu}	Resistividade do cobre
Θ	Ângulo polar entre as linhas de campo e a membrana

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	JUSTIFICATIVA	32
1.2	METODOLOGIA	32
1.3	OBJETIVOS	32
1.3.1	Objetivo geral	32
1.3.2	Objetivos específicos	32
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	33
2	REFERENCIAL TEÓRICO	35
2.1	ELETROPORAÇÃO	35
2.1.1	Causas e efeitos	35
2.1.2	Aplicações	37
2.2	PRINCIPAIS CIRCUITOS GERADORES DE PULSOS DE TENSÃO .	40
2.2.1	Circuitos com tensão de alimentação no nível da saída	40
2.2.2	Linhas de formação de pulsos de Blumlein	41
2.2.3	Inversores multiníveis	43
2.2.4	Conversores CC-CC elevadores	45
2.2.5	Geradores de Marx	47
2.2.6	Comparação entre os circuitos abordados	53
2.3	TOPOLOGIA ADOTADA	57
2.4	PARÂMETROS CONFIGURÁVEIS DO PROTÓTIPO	58
2.5	CARACTERÍSTICAS DAS CARGAS BIOLÓGICAS	60
3	ANÁLISE QUALITATIVA DO GERADOR	63
3.1	ETAPAS DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE MARX	63
3.1.1	Etapas de transferência de energia para os capacitores	63
3.1.2	Etapas de aplicação de pulsos na carga	64
3.1.3	Etapas de descarga dos capacitores	66
3.2	SISTEMA COMPLEMENTAR DO GERADOR	67
3.3	CIRCUITOS AUXILIARES	67
3.3.1	Oscilador	68
3.3.2	Fontes isoladas de comando	69
3.3.3	Microcontrolador	70
3.3.4	Drivers dos interruptores	71
3.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	71
4	ANÁLISE QUANTITATIVA DO GERADOR	73
4.1	DIMENSIONAMENTO DOS CAPACITORES DAS CÉLULAS	73
4.2	DIMENSIONAMENTO DOS SEMICONDUCTORES	74

4.2.1	Interruptores das células	74
4.2.1.1	Tensão nos interruptores das células no período de carga	74
4.2.1.2	Tensão nos interruptores das células no período de pulsos	75
4.2.1.3	Corrente nos interruptores das células no período de carga	75
4.2.1.4	Corrente nos interruptores das células no período de pulsos	77
4.2.2	Interruptores de carga	79
4.2.2.1	Tensão nos interruptores de carga no período de carga	79
4.2.2.2	Tensão nos interruptores de carga no período de pulsos	79
4.2.2.3	Corrente nos interruptores de carga no período de carga	80
4.2.3	Diodos de carga	81
4.2.3.1	Tensão nos diodos de carga no período de carga	81
4.2.3.2	Tensão nos diodos de carga no período de pulsos	81
4.2.3.3	Corrente nos diodos de carga no período de carga	81
4.3	DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES	81
4.4	PERDAS ESPERADAS NO GERADOR	82
4.4.1	Perdas nos semicondutores	82
4.4.1.1	Perdas nos interruptores de células	82
4.4.1.2	Perdas nos interruptores de carga	83
4.4.1.3	Perdas nos diodos	83
4.4.2	Perdas nos capacitores	84
4.5	ANÁLISE TÉRMICA DOS SEMICONDUCTORES	84
4.6	ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA	87
4.7	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	87
5	SIMULAÇÕES, PROJETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	89
5.1	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO GERADOR DE MARX	89
5.2	PROJETO DO GERADOR DE MARX	92
5.2.1	Capacitores das células	92
5.2.2	Interruptores das células	93
5.2.3	Interruptores de carga	94
5.2.4	Diodos	95
5.3	DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO	96
5.4	ANÁLISES DAS MEDIÇÕES	99
5.5	PERDAS DOS COMPONENTES	105
5.5.1	Perdas dos interruptores das células	105
5.5.1.1	Perdas por condução nos pulsos	105
5.5.1.2	Perdas por condução na carga	105
5.5.1.3	Perdas por comutação	106
5.5.2	Perdas dos interruptores de carga	106
5.5.3	Perdas dos diodos	107

5.5.4	Perdas dos capacitores	107
5.6	CÁLCULO TÉRMICO	107
5.6.1	Interruptores de células	108
5.6.2	Interruptores de carga	109
5.7	ENERGIA DOS CAPACITORES	109
5.8	TESTES EM UMA AMOSTRA VEGETAL	109
5.8.1	Análise visual dos testes	111
5.8.2	Análise da tensão e corrente da carga	113
5.8.3	Queda de tensão real do gerador	116
5.8.4	Variação da impedância da carga	117
5.9	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	118
6	CONCLUSÕES	121

REFERÊNCIAS	125
-----------------------	-----

APÊNDICES	131
---------------------	-----

.1	APÊNDICE A - CÓDIGO IMPLEMENTADO NO MICROCONTRO- LADOR	133
.2	APÊNDICE B - FLUXOGRAMA LÓGICO	141
.3	APÊNDICE C - LAYOUT DAS PLACAS	142
.4	APÊNDICE D - ESQUEMA ELÉTRICO DO GERADOR DE MARX SIMULADO	148
.5	APÊNDICE E - ESQUEMAS ELÉTRICOS DOS CIRCUITOS AUXI- LIARES	150
.6	APÊNDICE F - PROJETO E CÁLCULO DE PERDAS DOS TRANS- FORMADORES DAS FONTES	152

ANEXOS	159
------------------	-----

.1	ANEXO A - GRÁFICO DA IMPEDÂNCIA TÉRMICA DO MOSFET APT5010B2VR	161
.2	ANEXO B - DIAGRAMA DE PINOS DOS CIS UTILIZADOS	162

1 INTRODUÇÃO

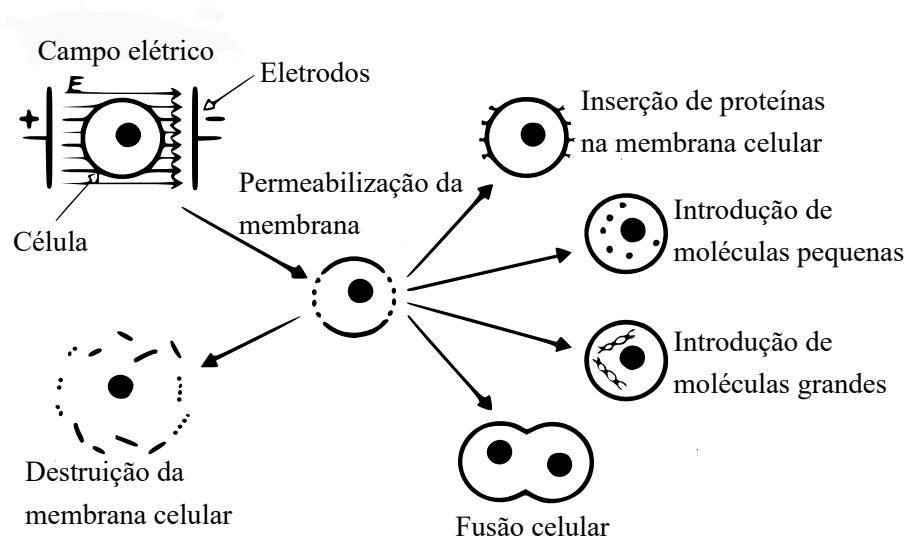
Eletroporação é um procedimento empregado em diversas áreas médicas e biológicas que consiste em aplicar campos elétricos, através de pulsos de tensão, em células, tecidos, órgãos, bactérias, entre outros, a fim de se gerar poros temporários ou permanentes em suas membranas (SILVA, 2011). Processos como inserção de material genético e moléculas, medicamentos, tratamentos não térmicos contra tumores, ou até mesmo aniquilamento de elementos celulares, são otimizados e possibilitados através dessa técnica.

A eletroquimioterapia é uma das tecnologias que faz uso da eletroporação. Nela, tecidos ou órgãos em tratamento neoplásico são submetidos aos campos elétricos, com a intenção de maximizar o percentual de entrada das micromoléculas que compõem os medicamentos. Trata-se costumeiramente de um método *in vivo*.

Procedimentos *in vitro* também podem ser auxiliados pela eletroporação, como em processos de transferência genética, fusão celular e até mesmo para acelerar o perecimento de culturas bacterianas.

A Figura 1 apresenta o esquema de aplicação de um campo elétrico em uma célula, e o resultado da interação com os compostos externos.

Figura 1 – Exposição de uma célula a um campo elétrico e possíveis efeitos

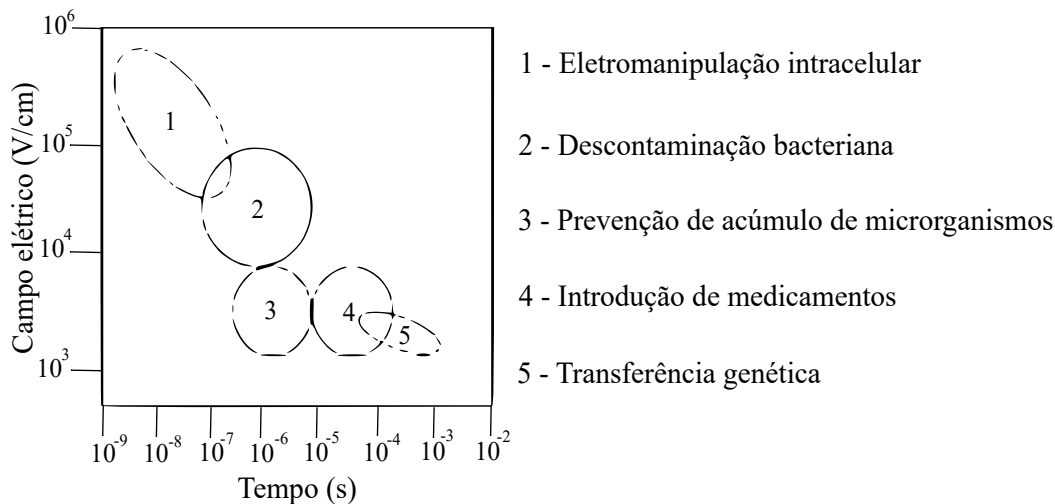


Fonte: Adaptado de (SILVA, 2011).

As variadas aplicações das ferramentas que criam os poros se diferenciam devido aos parâmetros elétricos configurados na geração dos pulsos de tensão. Amplitude, largura, frequência, quantidade, forma e polaridade das ondas são as principais características que definem o tipo de processo a ser efetuado. A amplitude, por exemplo, se superior a um determinado limiar, pode causar a eletroporação irreversível, fenômeno que impede a reconstituição da membrana celular, acelerando seu aniquilamento.

A Figura 2 mostra os intervalos de campo elétrico [V/cm] e largura dos pulsos [s] para os principais tratamentos relacionados à eletroporação.

Figura 2 – Largura de pulso e campo elétrico aplicáveis aos principais tratamentos relacionados à eletroporação



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2011).

Atualmente diversos fabricantes produzem eletroporadores comerciais, aplicáveis aos mais diferentes fins da medicina e biologia, com variadas configurações e características construtivas. Pelo fato de que cada um possui limitações nas faixas de operação, diferentes necessidades de tratamentos envolvendo eletroporação podem não ser atendidas pelo mesmo equipamento.

A Tabela 1 lista alguns dos modelos de eletroporadores comerciais atuais com suas características e configurações relevantes. As limitações de cada eletroporador podem ser verificadas, de acordo com suas especificações técnicas. Em alguns exemplares, as aplicações ficam restritas pelas faixas de operação e alcance e por não haver possibilidade de configuração dos parâmetros. Destaca-se também o alto custo de aquisição desses equipamentos.

Um detalhe que pode incorrer nos procedimentos de eletroporação são as correntes de saída elevadas. Como as impedâncias dos tecidos e células são consideradas baixas (na faixa de dezenas de Ω), a potência instantânea de aplicação de pulsos do equipamento chega à casa das dezenas de kW durante os pulsos. Isto posto, é interessante do ponto de vista elétrico que haja uma isolação ou desacoplamento entre a saída do eletroporador e a rede de alimentação.

Tabela 1 – Modelos comerciais de eletroporadores e especificações

Fabricante	Modelo	Especificações
Leroy Biotech	<i>Electrovet S13</i>	Dimensões: 320 x 250 x 410 mm Peso: 11,2 kg Tensão de saída: 1300 V (máx) Corrente de saída: 10 A (máx) Largura dos pulsos: 100 μ s Frequências dos pulsos: 500 Hz Número de pulsos: 8 Uso veterinário, parâmetros configuráveis Preço: R\$ 48.500,00 (US\$ 12.930,00)
	<i>Electrovet EZ</i>	Dimensões: 190 x 90 x 320 mm Peso: 3,1 kg Tensão de saída: 1300 V (máx) Corrente de saída: 20 A (máx) Largura dos pulsos: 100 μ s Frequências dos pulsos: 500 Hz Número de pulsos: 8 Uso veterinário, parâmetros fixos Preço: R\$ 18.100,00 (US\$ 4.830,00)
Eppendorf	<i>Eporator</i>	Dimensões: 190 x 125 x 275 mm Peso: 3,2 kg Tensão de saída: 200 a 2500 V Largura dos pulsos: 5 ms Pulsos exponenciais
BTX	<i>Agile Pulse MAX</i>	Tensão de saída: 50 a 1200 V Largura dos pulso: 0,05 a 10 ms Frequência dos pulsos: 1 a 5000 Hz Transferência genética
	<i>ECM 830</i>	Dimensões: 317 x 311 x 140 mm Peso: 6,8 kg Tensão de saída: 5 a 3000 V Largura dos pulsos: 10 μ s a 10 s Número de pulsos: 1 a 99 Observação: pulso retangular
	<i>Gemini X2</i>	Dimensões: 323 x 285 x 215 mm Peso: 6,8 kg Tensão de saída: 5 a 3000 V Largura dos pulsos: 10 μ s a 1 s Número de pulsos: 1 a 120 Pulsos exponenciais ou retangulares
Thermo Fischer	<i>Neon Transfection</i>	Dimensões: 233 x 299 x 219 mm Peso: 6 kg Tensão de saída: 500 a 2500 V Largura dos pulsos: 1 a 100 ms Número de pulsos: 1 a 10 Preço: R\$ 26.235,00 (US\$ 7.000,00)

1.1 JUSTIFICATIVA

A notável evolução de tratamentos e intervenções medicinais está diretamente relacionada ao aprimoramento das tecnologias e equipamentos empregados. A eletroporação não foge a essa regra. Tal procedimento vem sendo cada vez mais difundido em diferentes áreas, para isso novos eletroporadores comerciais são desenvolvidos e estão disponíveis no mercado.

Entender o funcionamento desses equipamentos geradores de pulsos de tensão e propor um novo sistema eletroeletrônico integrado, conectável à rede de distribuição, para contribuir com pesquisas futuras são os principais motivos para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2 METODOLOGIA

A primeira etapa deste trabalho consiste de tomar conhecimento a respeito das causas e efeitos da eletroporação e compreender com mais detalhes o funcionamento das técnicas modernas que empregam esse fenômeno.

Em seguida são apresentados os principais circuitos e sistemas eletroeletrônicos responsáveis por promoverem a geração de pulsos de tensão. Cada tipo de topologia é detalhada, apontando vantagens e desvantagens individualmente, de forma a selecionar um circuito para análise mais aprofundada, projeto e montagem para testes.

Na sequência foi desenvolvido um protótipo nos laboratórios do Núcleo de Processamento de Energia Elétrica (nPEE) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) para colocação em prática dos preceitos estudados, análise de resultados obtidos e redação desta dissertação.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Projetar e desenvolver um eletroporador programável com configuração variável de pulsos, aplicando melhorias em uma topologia já proposta.

1.3.2 Objetivos específicos

- Conhecer as propostas contemporâneas de topologias destinadas a geração de pulsos de tensão;
- Identificar vantagens e desvantagens de cada uma delas;
- Definir um circuito para projetar, montar e testar um protótipo de eletroporador;

- Coletar resultados e apontar conclusões, dificuldades e melhorias no trabalho realizado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em seis capítulos. O primeiro é composto pela introdução a respeito das principais questões relacionadas à eletroporação e indicados detalhes a respeito do desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 2 trata do referencial teórico, onde são detalhadas as causas e efeitos da eletroporação, apresentadas diferentes propostas de circuitos geradores de pulsos, aprofundados os conhecimentos a respeito da topologia adotada e definidos os parâmetros elétricos configuráveis do protótipo.

No Capítulo 3 são explicadas a forma de funcionamento do gerador, as etapas de operação e detalhados os circuitos auxiliares e demais componentes do sistema.

O Capítulo 4 consiste na análise quantitativa do circuito, onde é desenvolvido o equacionamento das etapas de operação do gerador, para cálculos de dimensionamento, levantamento de perdas, cálculo térmico e de transferência de potência da rede à carga.

No Capítulo 5 são apresentadas as simulações computacionais do gerador, realizado o projeto e seleção de componentes do protótipo e analisados os resultados experimentais dos circuitos em uma aplicação prática.

Ao final, são apontadas as conclusões, dificuldades e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ELETROPORAÇÃO

2.1.1 Causas e efeitos

Promover e otimizar o controle do fluxo de substâncias, íons, moléculas, entre outros, são os principais papéis dos eletroporadores nas aplicações modernas. Mas antes de estudar o uso dos mesmos, é preciso entender como se dá o processo de abertura de poros nas paredes celulares.

A membrana plasmática é a estrutura responsável por separar os ambientes interno e externo da célula. Composta por moléculas com dupla camada de fosfolipídios (SILVA, 2011), tem a função de proteger o componente celular através da seleção daquilo que ingressa e é eliminado de seu interior. Tendo uma espessura na faixa das unidades de nanômetros (ALBERTS, 2002), essas moléculas possuem uma "cabeça"hidrofílica (atraída por água) numa das extremidades e uma "cauda"hidrofóbica (repelida por água) na outra.

Como a constante dielétrica relativa da bicamada é inferior a 5, e a do meio externo superior a 70 (ALBERTS, 2002), é necessária a adição de uma relevante quantidade de energia para que haja fluxo de substâncias carregadas de um meio para outro.

Segundo (SHI et al., 2018), o potencial elétrico transmembrana (V_m) em repouso é de aproximadamente 75 *mV*. Quando aplicados campos elétricos nas estruturas, nota-se o fluxo de micropartículas eletricamente carregadas para as vizinhanças interna e externa da membrana, elevando assim seu potencial elétrico.

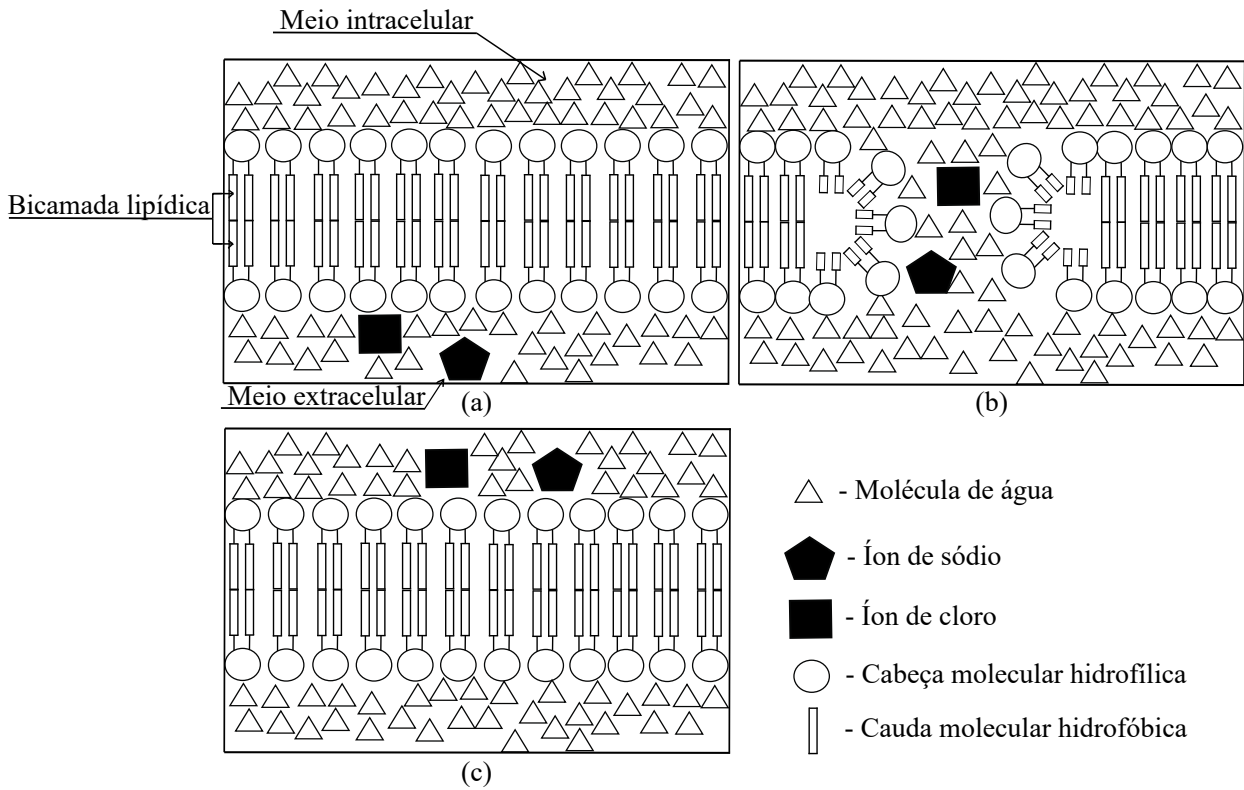
Se esse valor atinge um patamar mínimo de 200 *mV* (ou superior dependendo do tipo de célula em exposição) (WEINERT, 2017), ocorre o fenômeno da eletropermeabilização. Que é a quebra dessa barreira para substâncias que, em situações normais, não poderiam transitar livremente do meio externo para o interno.

Em (KOTNIK et al., 2012) são apresentados os resultados de um processo de eletroporação em meio aquoso. A Figura 3 apresenta um esquema do comportamento dos principais elementos químicos envolvidos no processo, enquanto a Figura 4 mostra os resultados reais da dinâmica das moléculas, sendo representados em laranja os lipídios hidrofílicos, em cinza os hidrofóbicos, em azul as moléculas de água, em verde íons de sódio e em rosa íons de cloro. Da esquerda para a direita, é possível verificar a bicamada intacta, o início da entrada das primeiras moléculas de água e por fim uma reorientação dos lipídios facilitando a entrada dos íons.

Dependendo do nível de tensão a que a membrana seja submetida, pode-se observar a eletroporação irreversível. Nessa situação os poros ficam permanentemente abertos e em um período de tempo isso causará a morte molecular.

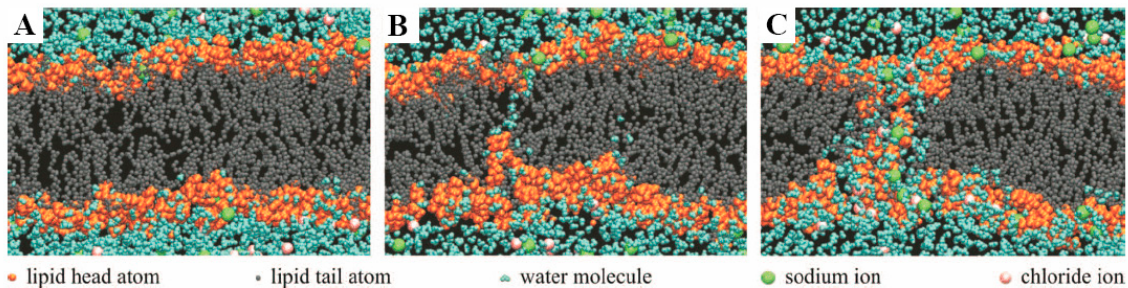
Em (SHI et al., 2015) é apresentada a fórmula matemática que estima o potencial

Figura 3 – Comportamento dos principais elementos químicos em um processo de eletroporação. (a) Repouso. (b) Período de aplicação dos pulsos. (c) Íons transferidos para o meio intracelular após reorientação da bicamada.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4 – Dinâmica molecular em um processo de eletroporação. (a) Repouso. (b) Início da transferência molecular entre os meios. (c) Poro estabelecido na membrana.



Fonte: (KOTNIK et al., 2012)

elétrico da membrana de acordo com algumas de suas características. Ela pode ser vista na Equação 2.1:

$$V_m(t) = -fE(t)R\cos(\theta)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.1)$$

Sendo f um fator que depende do formato da célula (1,5 se esférica), E a intensidade do campo elétrico, R o raio da célula e θ o ângulo polar entre as linhas de campo e o local específico da membrana, t o tempo de exposição do campo e τ a constante de tempo da membrana. Os autores destacam que em estado estacionário a relação pode ser reduzida para a vista na Equação 2.2:

$$V_m = 1,5ER\cos(\theta) \quad (2.2)$$

Por mais que se tenha conhecimento dos tópicos abordados acima, e a eletroporação seja alvo de estudos há quase quarenta anos (NEUMANN et al., 1982), com diferentes publicações apresentando teorias, revisões e explanações a respeito (GEHL, 2003) (TSONG, 1991) ainda hoje existem dúvidas sobre a relação entre o campo aplicado, tais como suas grandezas relacionadas, e o comportamento resultante na membrana.

Em (WEINERT, 2017) é citada a dificuldade para se obter medidores confiáveis na determinação da eficiência dos processos de eletroporação, enquanto (RAMOS; SUZUKI; MARQUES, 2006) destaca as mínimas dimensões das grandezas relacionadas, nano e microsegundos de tempo e nanômetros de comprimento.

A respeito da forma de detecção da ocorrência e eficiência da eletroporação, (NAPOTNIK; MIKLAVIC, 2018) publicou uma revisão a respeito dos diversos métodos possíveis para esse fim em suspensões *in vitro*.

A maneira mais corriqueira de analisar a entrada de substâncias nas células é através da injeção de tinturas. As fluorescentes absorvem a luz com um determinado comprimento de onda, e a refletem com um valor diferente. As vantagens são a necessidade de poucas moléculas necessárias e possibilidade de gerar forte contraste com um fundo escuro. As tinturas não fluorescentes requerem um microscópio com luz ou análise espectrofotométrica.

Outros métodos de detecção são a inserção de nanopartículas magnéticas, que podem ser rastreadas por ressonância magnética, inserção de compostos funcionais citotóxicos, que possuem testes químicos específicos para análise e também através da medição de grandezas físicas como condutividade e impedância da solução.

Em (SHI et al., 2015) é destacado como os parâmetros dos campos elétricos pulsados, *Pulsed Electric Field* (PEF), influenciam no processo de abertura dos poros. Segundo os autores, a intensidade deles está relacionada à área da membrana que será eletroporada, enquanto a largura é diretamente proporcional à dimensão do poro criado.

2.1.2 Aplicações

Diversas aplicações e tipos de procedimentos podem ser realizados com o uso da eletroporação, conforme visto na Figura 2. Esta subseção apresenta com mais detalhes

alguns exemplos desses tratamentos, especialmente os relatados nas últimas duas décadas.

Em (MAMMAN et al., 2015) foram analisados os resultados das aplicações de PEF em um procedimento de migração celular, durante a etapa curativa de um ferimento feito manualmente com auxílio de uma agulha cirúrgica, em um tecido intestinal.

A amostra que não passou pelo procedimento de eletroporação levou quatro horas para se fechar completamente e se apresentar como recuperado. Já a amostra que passou por eletroporação se curou em menos de duas horas, sob as mesmas condições.

Já em (CHEN et al., 2014) foram detalhados os efeitos benéficos da aplicação dos PEF na esterilização de amostras de suco de mirtilo. Segundo os autores esta fruta é uma das mais ricas fornecedoras naturais de antocianina, substância com alto poder antioxidante, antienvelhecimento e anticancerígeno. Se pasteurizada para incremento do período de consumo, parte de suas propriedades benéficas é perdida e apresenta elevada alteração no sabor, se em comparação com o suco fresco. Sendo assim a eletroporação foi utilizada por ser um método não térmico de beneficiamento.

Diferentes intensidade de campo elétrico (de 20 a 35 kV/cm) e largura de pulsos (de 27 a 82 μs) foram utilizadas nos testes. Verificou-se que ambos quanto maiores, melhor a eficiência na purificação do suco.

Quando comparados os resultados da pasteurização tradicional (aquecimento a 90 °C) com os pulsos, estes mostraram melhores resultados quanto aos níveis de glucose e manutenção dos índices de antocianina e vitamina C. Nos outros indicadores, verifica-se resultados similares, entre eles na quantidade de bactérias vivas. Sendo assim, (CHEN et al., 2014) conclui que para essa aplicação, os PEF apresentaram melhores resultados que a esterilização por aquecimento.

Em (ELSEROUGI et al., 2017) foi desenvolvido um sistema para geração de PEF a fim de desinfetar a água a ser consumida na alimentação. Segundo os autores existem dois métodos para purificação de água utilizando a eletroporação. Nos pulsos corona os eletrodos são posicionados na faixa das unidades de centímetros, e não se nota visualmente grandes efeitos de movimentação no fluxo de água.

Já nos pulsos a descarga de arco, nota-se um elevado fluxo de corrente (na faixa dos kA) se formar entre os eletrodos. Com isso percebe-se visualmente a água entrando em colapso.

Na publicação de (WU et al., 2014) é analisada a segurança e eficácia da eletroporação em tratamentos de câncer hepático e de pâncreas.

Os autores destacam inicialmente que menos de 30 % dos pacientes com neoplasia no fígado e 10 % dos que possuem a doença no pâncreas podem se submeter ao procedimento cirúrgico mais comum no tratamento contra tumores malignos, a ressecção. Combinado a isso, há também o fato de que ambos os tipos de câncer são os mais letais e

propensos a gerarem metástase no indivíduo. Sendo assim, outros tratamentos se mostram necessários para controle ou cura definitiva da doença.

Existem alguns procedimentos térmicos que usam o calor para tentar destruir o tumor, mas que não são aplicáveis a todas as partes do corpo, especialmente em regiões próximas aos principais vasos sanguíneos. Além disso, podem danificar os canais biliar e pancreático, resultando em vazamento da bile o que pode causar infecções e outras complicações médicas ao paciente.

Sendo assim, a eletroporação irreversível, *Irreversible Electroporation* (IRE) , aparece como uma nova alternativa aos tratamentos térmicos mencionados. Esse procedimento consiste de aplicar um PEF na região do tumor, com uma intensidade elevada, de forma que as membranas das células não voltem mais ao estado estacionário causando a morte das mesmas.

A metodologia do estudo consistiu de analisar publicações com grupos de pacientes que foram submetidos a IRE e analisar se o procedimento se mostrou eficaz e seguro.

Para o câncer de fígado, duas mortes foram registradas em um curto período após a aplicação da IRE. O primeiro faleceu um mês após o procedimento, vítima de uma trombose venosa. Não se sabe porém se o tratamento foi a principal causadora da morte. Já o segundo paciente faleceu dois meses e meio depois do uso da IRE por insuficiência hepática. Sendo assim, o percentual de mortalidade relacionada foi de 1,7 %, em um grupo de 116 pacientes.

Os autores destacam, entre outros resultados, que em um dos estudos foi verificada uma resposta completa ao tratamento em 100 % dos pacientes, sendo que 98 % daqueles que tinham tumores com diâmetro inferior a 3 centímetros continuaram vivos um ano após o tratamento. Em outra análise grupal, 10 de 14 pacientes ficaram totalmente curados após um ano de tratamento.

Já com relação ao tratamento de câncer de pâncreas, foram registradas 9 mortes após três meses da aplicação da IRE em 254 pacientes, resultando em uma taxa de morbidade de 3,5 %.

Dessas mortes, as de 8 pacientes ocorrerem após utilização apenas da IRE como tratamento. Em um dos estudos, é relatada uma alta taxa (20 %) de complicações após uso da ferramenta.

Por fim, em (WU et al., 2014) os autores destacam a que a IRE se mostra uma estratégia promissora e segura para tratamento desses tipos de câncer, em especial o hepático, em casos que a ressecção e os procedimentos de remoção térmica são contra indicados. Entretanto mais estudos e investigação é necessária para apontamento de conclusões definitivas.

Na publicação de (BULLMANN et al., 2015) é apresentado um experimento com

inserção de moléculas de DNA no cérebro de fetos de roedores (aplicação *in utero*). Os autores destacam que com pulsos de baixa tensão (45 V) foi obtida uma eficiência de eletroporação de 50 a 90 % nas células da área envolvida e que constatou-se que a área sujeita à eletroporação é proporcional à intensidade da tensão aplicada.

Em (NOVICKIJ et al., 2016) foi analisada a aplicação dos pulsos no aniquilamento de uma colônia de fungos *Candida Albicans*, responsável pela infecção comumente chamada de candidíase, que pode acometer indivíduos no aparelho reprodutor e vias orais. Após aplicado o PEF, mais de 80 % da cultura fúngica foi dizimada.

2.2 PRINCIPAIS CIRCUITOS GERADORES DE PULSOS DE TENSÃO

Após apresentação de algumas aplicações envolvendo PEF, são analisados os principais tipos de circuitos elétricos responsáveis por fazerem a geração dos pulsos. Cada grupo é dividido nas subseções a seguir.

2.2.1 Circuitos com tensão de alimentação no nível da saída

A forma mais simples de se obter pulsos de tensão é utilizar o próprio valor da fonte de alimentação, sem necessidade de elevar seu nível, e criar os pulsos de acordo com os parâmetros desejados.

O circuito proposto pelo já citado (BULLMANN et al., 2015) apresenta um eletroporador de funcionamento simples, portátil e com custo de materiais aproximado de 40,00 € (168,91 reais na cotação de 18/02/2019). O sistema conta com fonte de alimentação para a saída (variável de 0 a 50 V), os circuitos integrados (CI) NE555 para configuração dos pulsos e LM317 para limitação da corrente, um relé com baixo tempo de resposta e uma bateria portátil para alimentação da parte lógica.

O protótipo montado é bastante compacto, com dimensões de 208x190x69 mm, opera com pulsos de tensão entre 9 a 45 V e largura de 0 a 200 ms. Por fim fez-se a ressalva que o limite de tensão do equipamento é insuficiente para obter êxito em procedimentos *in vivo*.

O já citado tratamento proposto por (NOVICKIJ et al., 2016) foi possível graças ao desenvolvimento de um sistema capaz de atuar em faixas inferiores ao microssegundo, com nível de tensão de 3 kV, corrente máxima de 60 A, frequência de repetição de 1 a 3,5 MHz e duração de pulsos de 100 ns a 1 ms. O equipamento foi usado na destruição do fungo patógeno *Candida Albicans*.

Os principais elementos aplicados foram uma fonte comercial fixa com tensão de saída 3 kV (preço estimado de 1.200,00 reais em 23/08/2017), *drivers* isoladores de precisão

(modelo ADUM4223) e MOSFETs de Carbetto de Silício (SiC) combinados com tensão máxima de operação de 1,2 kV .

Os interruptores são arranjos de forma a aplicarem os pulsos de tensão na saída e também a fornecerem um segundo trajeto para o fluxo de corrente, forçando a forma de onda a possuir uma derivada de tensão bastante acentuada, viabilizando assim o funcionamento do eletroporador em períodos inferiores ao microsegundo e diminuindo a influência da carga nos parâmetros do equipamento.

Os mesmos autores, (GRAINYS; NOVICKIJ; NOVICKIJ, 2016), propuseram um segundo sistema de eletroporação com nível de tensão inferior (fonte de 1 kV), intervalo de largura de pulsos de 1 μs a 10 ms, corrente de 100 A e o diferencial de gerar sinais bipolares (positivos e negativos).

Os pulsos bipolares se caracterizam por reduzirem os espasmos musculares em aplicações *in vivo* (ARENA et al., 2011), apresentarem menor toxicidade (em usos referentes a IRE) (SANO et al., 2014), aumentarem a vida útil dos eletrodos e distribuírem um campo elétrico mais homogêneo na área eletroporada.

Foram utilizados IGBTs com capacidade de 1,2 kV e 105 A, duas fontes para geração de pulsos multiníveis (baseadas em conversores *flyback*), um modulador LTC6992 para configuração do *duty cycle*, um *driver* para comando dos interruptores e um microcontrolador.

Um sistema capaz de gerar pulsos retangulares ou com intensidades distintas (que pode simular uma curva exponencial, por exemplo) e largura variável foi apresentado em (ELGENEDY et al., 2017). Ele também emprega uma fonte de tensão com o nível da saída, possui quatro braços de interruptores, dois responsáveis apenas pelo chaveamento em caso de carga dos capacitores (inferiores) e dois compostos por células com um capacitor e dois interruptores cada, para armazenamento da energia (superiores). O estado de operação destes é que dita o formato dos pulsos de saída.

Para finalizar, como os pulsos em geral atingem a grandeza de kV , a necessidade de empregar uma fonte com essa amplitude pode se tornar um problema e dificultar ou até inviabilizar o projeto e execução de sistemas assim. Somado a isso, se não houver a possibilidade de alteração do valor de entrada, o eletroporador tem intensidade de saída fixa e perde funcionalidade de operações.

Sendo assim, outros tipos de circuitos são analisados a seguir.

2.2.2 Linhas de formação de pulsos de Blumlein

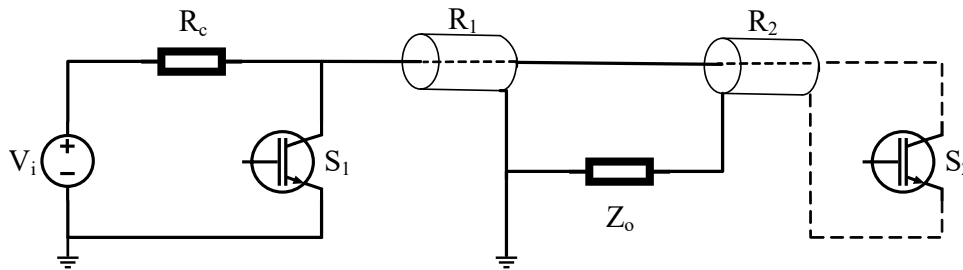
A possibilidade de gerar pulsos de tensão retangulares com elevada intensidade, larguras inferiores às centenas de nanosegundos e utilizar poucos componentes (ANGELIS et al., 2008) são as características mais marcantes das linhas de formação de pulsos, *Pulsed*

Forming Network (PFN), em que se destacam especialmente as redes de Blumlein.

Esses sistemas também necessitam de uma fonte com o mesmo valor da saída, pelo menos um interruptor de resposta rápida (MOSFET ou IGBT) e um par de redes de transmissão, geralmente formadas por cabos coaxiais com comprimento na faixa de unidades de metro, com características que se relacionem diretamente com a impedância da carga.

O método recebe essa alcunha em homenagem a seu criador, Alan Dower Blumlein. Engenheiro inglês que atuou fortemente com pesquisas nas áreas de telecomunicação, áudio e radares, na década de 1930. A Figura 5 apresenta um esquemático reduzido de uma PFN de Blumlein.

Figura 5 – Esquema de uma PFN de Blumlein



Fonte: Adaptado de (ANGELIS et al., 2008)

Sendo R_1 e R_2 as impedâncias das linhas e Z_o a da carga. A capacidade de gerar pulsos de pequena largura é inversamente proporcional ao comprimento das linhas, dessa forma a variação desse parâmetro pode não ser simples de se alcançar.

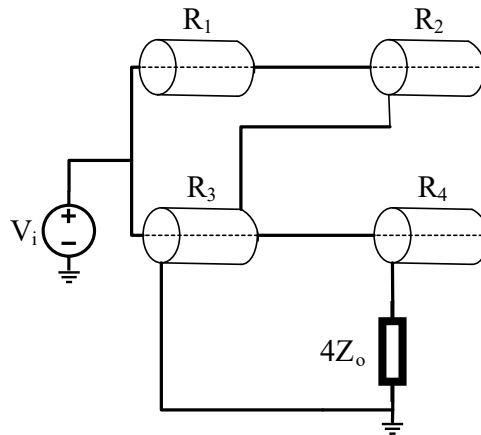
Os pulsos aplicados na carga possuem período correspondente ao dobro do tempo que uma onda eletromagnética leva para circular pelo comprimento total dos cabos coaxiais, considerando o meio dielétrico em que está inserido.

A utilização da segunda chave é que permite a variação na largura e polaridade dos pulsos, sem a necessidade de modificação dos elementos físicos das redes. Os parâmetros construtivos dos interruptores, como resistência entre *drain* e *source*, são muito importantes neste tipo de circuito. Sendo aqueles com melhor tempo de resposta e maior velocidade de atuação mais indicados para esta aplicação.

Em sistemas clássicos de PFN de Blumlein, a tensão de saída pulsa no mesmo nível da entrada. Porém, existem estudos como o apresentado em (MENDES et al., 2012) que visam multiplicar esse patamar através do arranjo ordenado de mais linhas. A Figura 6 apresenta um exemplo desses capaz de dobrar a tensão de entrada na carga.

Os elementos que compõem as linhas de transmissão das PFN costumam ser os cabos coaxiais, como o modelo RG 58, (ANGELIS et al., 2008), ou URM 43 (MENDES

Figura 6 – Arranjo duplo de PFN de Blumlein para obtenção de valor maior que da entrada



Fonte: Adaptado de (MENDES et al., 2012)

et al., 2012). Mas existem também estudos como o apresentado em (ROMEO et al., 2013) que utilizam micro trilhas em placas de circuito impresso. Segundo os autores, essa solução além de mais compacta e barata, permite um melhor controle da impedância das mesmas.

No sistema proposto por (ROMEO et al., 2013) o sinal de acionamento de *gate* dos interruptores vem diretamente de um microcomputador através de interface USB e um cordão de fibra ótica para isolar o sistema de controle dos sinais de tensão elevada.

Conforme verificado nesta subseção, as principais vantagens das PFN são o tempo de resposta diminuto, possibilitando a geração de pulsos de nanosegundos, e a pequena quantidade de componentes.

Entretanto alguns pontos negativos podem ser apontados nesse sistema, como a necessidade de utilização de uma fonte de tensão elevada, ou muitas linhas de transmissão de cabos coaxiais (de custo elevado), baixa flexibilidade quanto ao ajuste de parâmetros de intensidade e tempo e forte dependência entre impedância da carga e dos componentes do sistema. Além disso, destaca-se que a eletroporação atua em faixas superiores ao nanosegundo, não sendo assim uma aplicação com necessidade de resposta tão rápida.

2.2.3 Inversores multiníveis

Vistos como circuitos ideais para controle de velocidade de motores elétricos de indução, fontes ininterruptas de energia, acionamento de veículos elétricos, entre outras aplicações, os inversores multiníveis, *multilevel inverters* (MLI), também podem ser aplicados na geração de pulsos de tensão.

A possibilidade de trabalhar com diversas configurações e topologias conferem aos inversores vantagens para utilização dos mesmos como elemento central no processamento

da energia elétrica.

Os inversores costumam ser divididos em três grandes grupos: *Neutral Point Clamped* (NPC), *Flying Capacitor* (FC) e *H-Bridge Converter* (HBC).

O primeiro inversor multiníveis NPC foi inicialmente proposto em (NABAE; TAKAHASHI; AKAGI, 1981). Neste utiliza-se diodos de grampeamento e transistores em pares para se aplicar diferentes níveis na carga. Ele se caracteriza por reproduzir uma tensão de referência com grande qualidade (reduzindo ou até eliminando filtros de saída) e impor baixas derivadas de tensão (dv/dt) na carga. Todavia os níveis de tensão sobre os diodos são variáveis, o que pode aumentar a quantidade destes no sistema, e existe uma dificuldade em dividir os níveis de esforços sobre eles.

As topologias FC, apresentadas inicialmente em (LAI; PENG, 1995), realizam o grampeamento da tensão através de capacitores. As sobretensões nos interruptores costumam ser reduzidas, porém as dimensões dos circuitos sofrem acréscimo com o uso de capacitores. Além disso, os inversores FC demandam mais etapas de operação que os circuitos NPC, o que possibilita estratégias para balanceamento das tensões nos capacitores.

Já os circuitos de topologia HBC foram inicialmente propostos em (BAKER; BANNISTER, 1975) e realizam a conexão em série de células inversoras. Como vantagens eles se destacam por apresentarem baixa distorção da tensão de saída e dispensarem o uso de componentes para grampeamento. Entretanto há necessidade de grandes quantidades de fontes isoladas, e se restringem a aplicações unidirecionais.

Em (VENKATARAMANAIAH; SURESH; PANDA, 2017) é feita uma detalhada revisão a respeito dos MLI. Eles separam os circuitos em inversores simétricos (todas as fontes possuem mesmo valor), assimétricos (fontes com valores distintos), híbridos (que misturam diferentes características e valores de fontes) e com fonte única.

A questão do número de fontes empregadas no inversor é tema de abordagem na publicação, já que segundo os autores uma quantidade elevada gera aumento de custos, área e eficiência do sistema. Sendo assim, alternativas que fazem uso de divisão de tensão única com capacitores passam a ser melhor consideradas.

Com relação às aplicações, em (SAMADAEI et al., 2016) é apresentado um sistema *E-type* capaz de gerar 13 níveis de tensão (seis positivos, seis negativos e nulo) fazendo uso de 10 interruptores e quatro fontes (duas com valor V_i e duas $2V_i$). O patamar da tensão de saída é determinado com base nos estados de ativação dos interruptores.

Outro exemplo similar é o MLI assimétrico apresentado por (SAMADAEI et al., 2018), que utiliza quatro fontes de tensão com níveis diferentes (duas V_i e duas $3V_i$) para se obter em múltiplos interiores, positivos e negativos, até $8 V_i$.

Na publicação de (ABDELSALAM et al., 2017) é proposto um sistema para aplicações pulsadas, dividido em vários submódulos, empregando apenas uma fonte de tensão.

Um inversor principal na entrada alimenta um transformador por submódulo, que é composto por ponte retificadora, filtro capacitivo e inversor de topologia *full-bridge* (FB).

Por fim (CHOI; KANG, 2015) apresenta um sistema reduzido, capaz de gerar sete níveis de tensão (três positivos, três negativos e nulo) a partir de uma fonte, três capacitores em série e um conjunto de semicondutores com sete interruptores e dois diodos (formando uma ponte H). Os autores fizeram a montagem prática de um protótipo alimentando uma carga de 1 *kW* e apresentaram os resultados de perdas e análise harmônica.

Com essas explanações pode-se tirar algumas conclusões a respeito da aplicação dos MLI. Primeiramente ressalta-se que eles costumam ser destinados a aplicações que demandam a simulação de curvas senoidais e não tanto em geradores de pulsos.

Em sistemas como o proposto por (SAMADAEI et al., 2016) o inversor tem a capacidade de elevar os níveis de tensão da entrada. Já o circuito de (CHOI; KANG, 2015) não possui tal capacidade, por contar com uma única fonte.

Dessa forma, para a geração de pulsos de nível elevado, seriam necessárias várias entradas para se atingir o patamar desejado. E conforme mencionado por (VENKATARAMANAIAH; SURESH; PANDA, 2017), isso pode acarretar em relevantes aumentos de custo e volume.

Outras publicações recentes também destacam a topologia *Modular Multilevel Converter*, para aplicações com potência e tensão elevadas e que não demandam grande quantidade de fontes para alimentação do barramento CC.

2.2.4 Conversores CC-CC elevadores

Outro tipo de circuito possível de ser utilizado na geração de pulsos são os conversores CC-CC elevadores. Após transformar o nível reduzido da alimentação para um patamar desejado, a tensão deve ser transformada em pulsada com um circuito inversor.

Em (ELSEROUGI; MASSOUD; AHMED, 2017) é apresentado um circuito elevador, que consiste em dois conversores CC-CC bidirecionais, baseados em topologia *boost*, capaz de gerar pulsos bipolares. A carga é conectada de forma diferencial entre a saída de ambos.

Os autores destacam que com quatro interruptores, dois capacitores, dois indutores e dois diodos é possível multiplicar a tensão de entrada e gerar os pulsos na saída. Foram realizados experimentos práticos onde a tensão de alimentação de 15 V foi elevada a 700 V para pulsos.

Como pontos negativos, destaca-se que os dois interruptores devem suportar o nível elevado de tensão da saída e os valores fixos dos indutores impedem uma variação da largura dos pulsos. Além disso, ele não possuem formato retangular.

Os mesmos autores publicaram em (ELSEROUGI; MASSOUD; AHMED, 2017) outro conversor CC-CC utilizado para geração de pulsos, dessa vez com a topologia *buck-boost* operando no modo de operação descontínuo. O ganho do conversor montado em laboratório para testes era de 35.

A presença de cinco interruptores na saída permite ao circuito gerar pulsos monopolares ou bipolares.

Uma proposta similar à de (ELSEROUGI; MASSOUD; AHMED, 2017) é apresentada em (BONDADE; WANG; MA, 2014). Também é idealizado um duplo conversor *boost*, mas com posicionamento de componentes distinto. A aplicação desse circuito são os sistemas de imagem médicas por ultrassom.

Outro projeto de eletroporador foi apresentado por (SOARES, 2014), neste trabalho desenvolveu-se um gerador de pulsos monopolares baseado em um conversor CC-CC *half-bridge* (HB) com inversor na saída. A tensão CA da rede de distribuição é retificada e filtrada, depois elevada ao nível dos pulsos por meio do conversor.

O autor investigou qual topologia seria a mais adequada para essa aplicação, chegando a considerar inicialmente a utilização de um conversor *flyback*. Porém essa ideia foi descartada por inviabilidade de se atingir o nível mínimo de *duty cycle* devido ao tempo de comutação necessário dos interruptores.

Para sanar essa questão o conversor poderia operar no modo de condução descontínua, através de um ajuste na quantidade de espiras do indutor acoplado, incrementando assim a indutância de magnetização. Porém, isso acarretaria aumentos significativos dos níveis de tensão sobre os interruptores.

Em seguida foi apontado o conversor *forward* como outra possibilidade, mas este também apresenta desvantagens, se em comparação com o HB. Em especial tensões sobre semicondutores mais elevadas e maiores volumes dos elementos magnéticos. Dessa forma, foi confirmado conversor HB no projeto do eletroporador.

O circuito inversor, responsável por gerar os pulsos de tensão, é composto por apenas duas chaves em série que trabalham de maneira complementar.

Por fim, a publicação de (ILIC et al., 2002) emprega um conversor com topologia isolada *push-pull* e no secundário do transformador um conjunto com um tubo de descarga de gás em série com um indutor, para alimentação de um equipamento de raio-X. A fluoroscopia pulsada é necessária, para energizar o cátodo dos tubos de elétrons dos componentes. O nível de tensão pode atingir até 140 kV de pulsos com duração de micro ou milissegundos nesses casos.

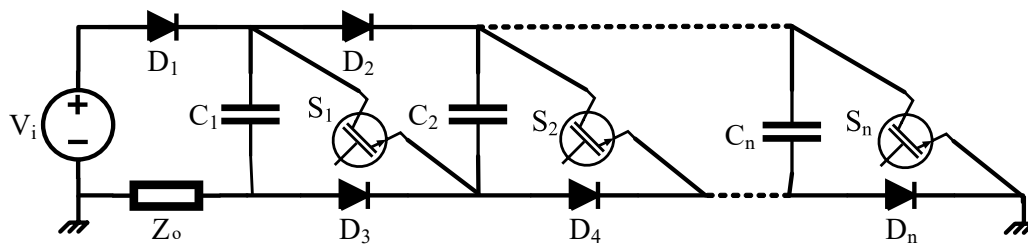
2.2.5 Geradores de Marx

Diversas aplicações apresentadas em especial nos últimos 20 anos, como em (ZABIHI; ZABIHI; ZARE, 2011) e (PETKOVSEK et al., 2002), propõem alternativas para corrigir parte dos problemas dos circuitos esmiuçados nas subseções anteriores. Ambos fazem uso do sistema conhecido como Gerador de Marx (GM). Trabalhando como elevador de tensão, este consiste de um arranjo de capacitores que são carregados em paralelo com o nível de alimentação e descarregados em série para obtenção desse valor multiplicado.

Erwin Otto Marx, idealizador do circuito que leva seu nome, foi um engenheiro eletricitista alemão, que atuou com pesquisas relativas à transmissão de energia de longas distâncias, na primeira metade do século XX.

Um exemplo de GM é apresentado na Figura 7. Cada célula do circuito é composta por um capacitor, diodos e um interruptor que conduz de acordo com a etapa de carga ou descarga dos armazenadores de energia.

Figura 7 – Exemplo de circuito Gerador de Marx



Fonte: Adaptado de (ZABIHI; ZABIHI; ZARE, 2011).

No período de carga, os interruptores ficam abertos dessa forma os capacitores são energizados em paralelo. Na etapa de pulsos, os interruptores são ativados para que ocorra a descarga em série dos mesmos.

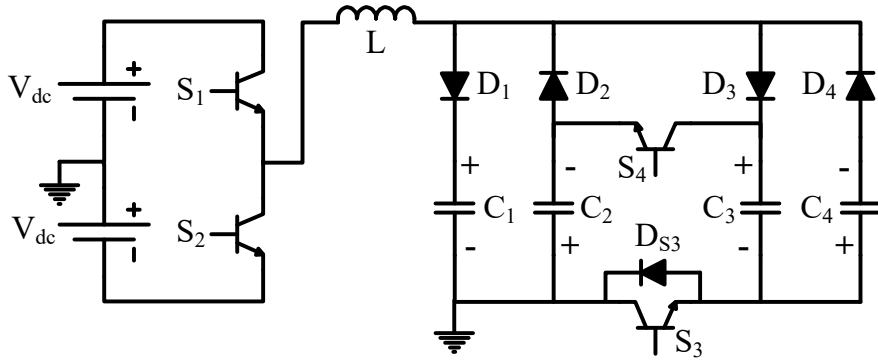
IGBTs e MOSFETs vêm sendo utilizados em recentes propostas de GM como interruptores do sistema por possuírem boa resposta ao chaveamento rápido (baixo tempo de subida e descida), trabalharem com alcances de largura de pulsos variando de nano até às unidades de segundos e possuírem elevada capacidade de tensão e corrente.

Pontos negativos também são apontados nesse tipo de circuito, como a necessidade de elevada quantidade de componentes, passivos e ativos, especialmente quanto maior for a tensão de saída e necessidade de isolamento elétrica para comando dos interruptores, que representa incremento de elementos, demandando mais espaço e investimento para confecção do circuito.

(ZABIHI; ZABIHI; ZARE, 2011) propõem uma nova topologia, que utiliza na entrada do circuito uma fonte inversora (representada por duas fontes de tensão CC invertidas entre si em relação ao potencial de terra) para alimentação dos capacitores. O

sistema funciona com distintas etapas de carga, uma positiva e uma negativa, seguida da descarga dos capacitores. Esse sistema é apresentado na Figura 8:

Figura 8 – Gerador de Marx com dois estágios proposto em (ZABIHI; ZABIHI; ZARE, 2011)



Fonte: (ZABIHI; ZABIHI; ZARE, 2011).

A saída é conectada entre as partes superiores dos capacitores C_1 e C_4 . Na etapa de carga positiva atuam os interruptores S_1 e S_3 , dessa forma os capacitores de índice ímpar são carregados. Na carga negativa, atuam novamente S_3 e agora S_2 , para realizar a carga dos capacitores de índice par.

No período de pulsos, atua o interruptor S_4 para que haja a descarga na saída.

A diminuição da quantidade de diodos, em comparação com o sistema convencional, é apontado como um dos pontos positivos da topologia. Entretanto o comportamento do sinal de saída pode não ser vantajoso já que há tensão de alimentação na carga durante as etapas de fornecimento de energia aos capacitores, o que limita a variação de tensão na saída no momento dos pulsos.

Outra proposta foi apresentada por (REZANEJAD; SHEIKHOESLAMI; ADABI, 2014). O circuito também faz uso de uma fonte de alimentação inversora, emprega em cada célula um capacitor, um diodo e dois interruptores.

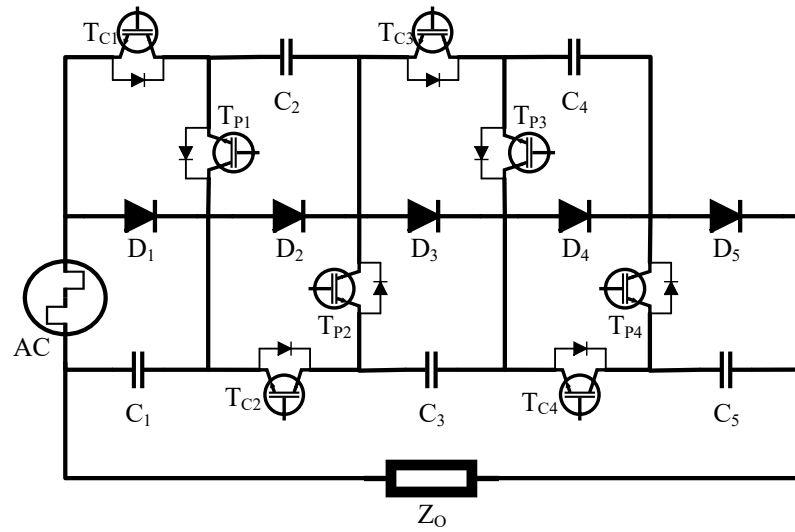
Esse sistema, visto na Figura 9 gera na saída uma tensão V_o , de ordem de grandeza vista pela Equação 2.3, sendo " n " o número de células capacitivas carregadas.

$$V_o = (2n - 1)V_i \quad (2.3)$$

No período de carga dos capacitores entram em atuação os interruptores T_C e nos pulsos os componentes T_P .

Os autores destacam que empregando um número elevado de estágios, o tempo de carga dos últimos capacitores fica elevado, comprometendo a taxa de repetição de

Figura 9 – Gerador de Marx com cinco estágios proposto em (REZANEJAD; SHEIKHOLESAMI; ADABI, 2014)



Fonte: Adaptado de (REZANEJAD; SHEIKHOLESAMI; ADABI, 2014).

pulsos do gerador. A sugestão apontada para sanar esse problema, é elevar a frequência de chaveamento do inversor.

Além disso, essa topologia não permite variação da intensidade dos pulsos pela inexistência de caminhos alternativos no circuito para não realizar a carga de determinados capacitores.

Em publicação mais recente (DELSHAD; REZANEJAD; SHEIKHOLESAMI, 2017), os mesmos autores apresentaram a topologia de um sistema similar, dessa vez capaz de gerar pulsos bipolares (positivos e negativos). Esse circuito emprega a quantidade dobrada de interruptores e capacitores se comparada com a versão unipolar, e obtém o mesmo nível de tensão na saída. Não são empregados diodos, a não ser aqueles em antiparalelo com os elementos de chaveamento. O circuito é visto na Figura 10.

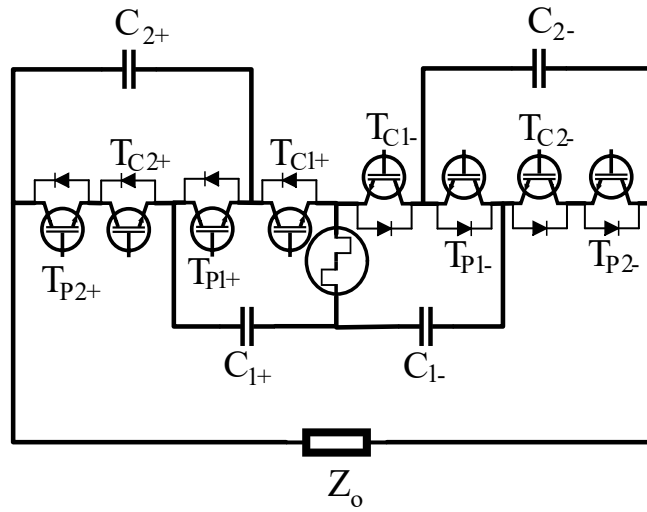
O comportamento dos interruptores é idêntico ao do circuito unipolar.

Em (REDONDO; CANACSIH; SILVA, 2009) é apresentado um gerador bipolar que emprega seis interruptores e dois diodos por estágio, visto na Figura 11.

Nele, os interruptores T_e e T_g atuam no período de carga dos capacitores. Nos pulsos positivos T_a e T_d entram em condução, enquanto nos negativos isso ocorre com T_b e T_c .

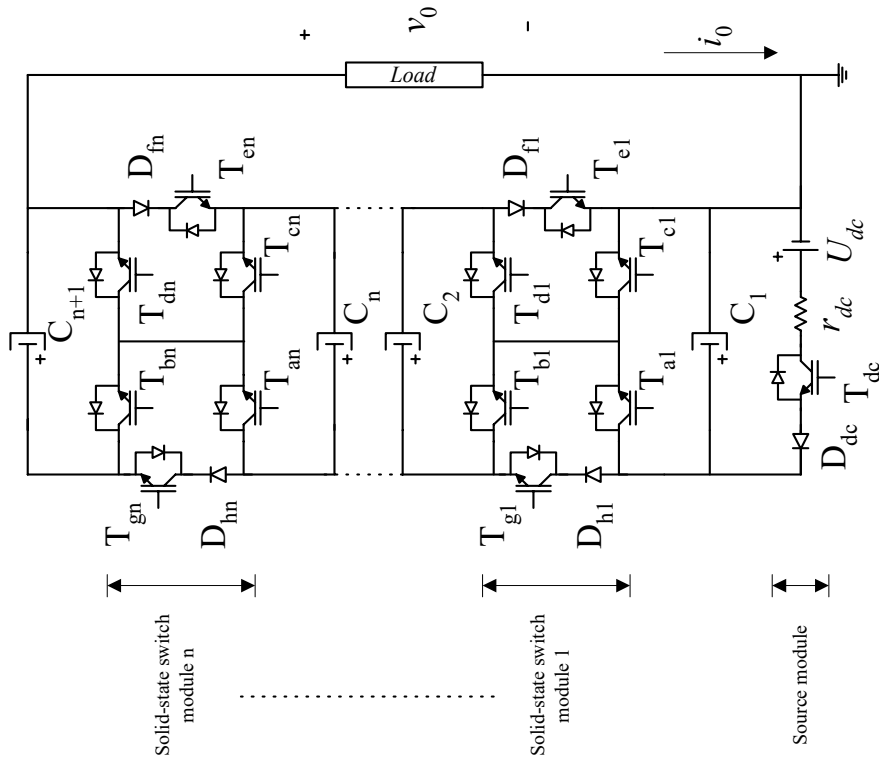
Posteriormente os autores fizeram otimizações e sugeriram em (CANACSIH; REDONDO; SILVA, 2012) um novo circuito também bipolar, com redução de dois interruptores em cada estágio, conforme Figura 12. Nesta topologia T_e e T_f atuam na carga dos capacitores, nos pulsos positivos T_b e T_e e nos negativos T_a e T_f .

Figura 10 – Gerador de Marx bipolar com dois estágios proposto em (DELSHAD; REZANEJAD; SHEIKHOESLAMI, 2017)



Fonte: Adaptado de (DELSHAD; REZANEJAD; SHEIKHOESLAMI, 2017).

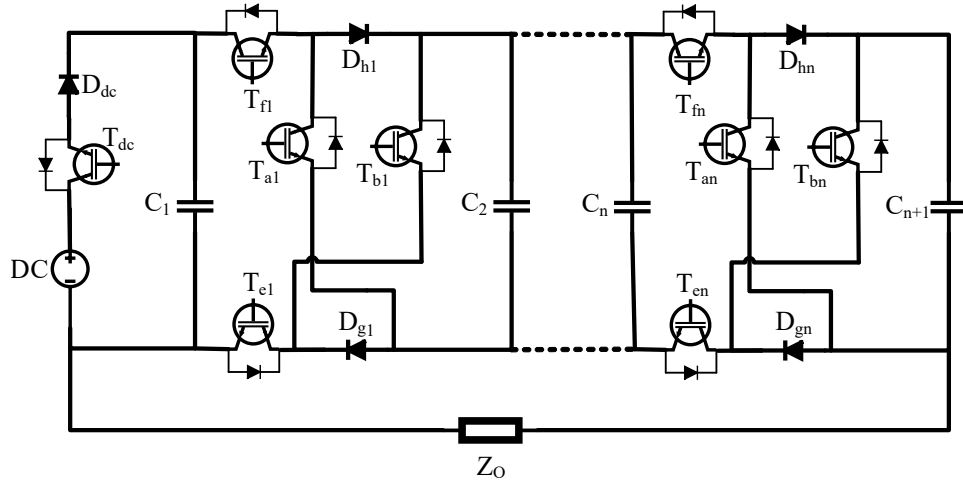
Figura 11 – Gerador de Marx bipolar proposto em (REDONDO; CANACSIH; SILVA, 2009)



Fonte: (REDONDO; CANACSIH; SILVA, 2009).

Em (YAO et al., 2016) é relatado o desenvolvimento de outro gerador bipolar que emprega duas fontes CC invertidas, com dois interruptores e um diodo por célula, conforme a Figura 13. A topologia permite que determinados capacitores não sejam carregados, alterando o valor de saída do mesmo. Entretanto, um ponto negativo é que os interruptores

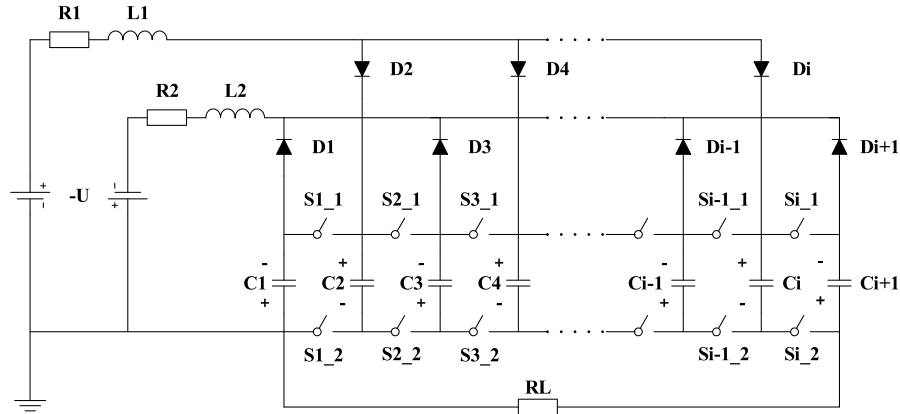
Figura 12 – Gerador de Marx bipolar com redução de componentes proposto em (CANACSIH; REDONDO; SILVA, 2012)



Fonte: Adaptado de (CANACSIH; REDONDO; SILVA, 2012).

devem ser aptos a suportar o dobro da tensão de entrada.

Figura 13 – Gerador de Marx bipolar proposto em (YAO et al., 2016)



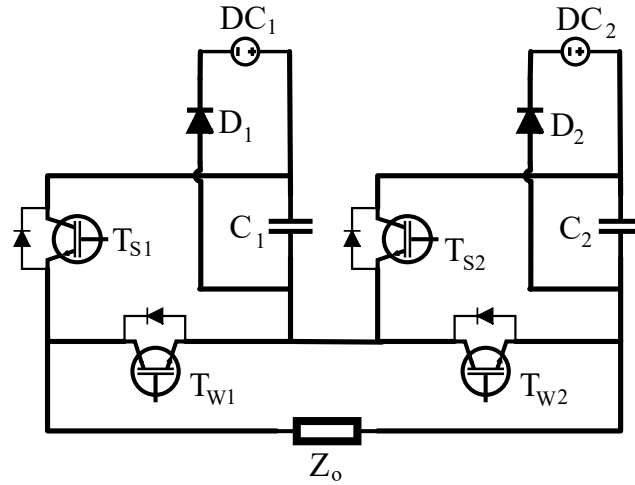
Fonte: (YAO et al., 2016).

Na etapa de carga dos capacitores, se fecham todos os interruptores com índice final 2, e nas aplicações de pulsos, os interruptores atuam de forma cruzada, dependendo da polaridade. A relação de transformação da tensão de saída é apresentada na Equação 2.4:

$$V_o = (n - 1)V_i \quad (2.4)$$

Na publicação de (SHI et al., 2015) um gerador unipolar foi projetado visando a aplicação de pulsos com formato trapezoidal (pico com período reduzido em relação à base). Através da adição de um interruptor T_W por célula, cria-se um *bypass* que modifica o tempo de sinal "alto" do pulso, enquanto T_S atua na aplicação "normal" (retangular) dos pulsos. A topologia pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – Gerador de Marx unipolar com dois estágios proposto em (SHI et al., 2015)

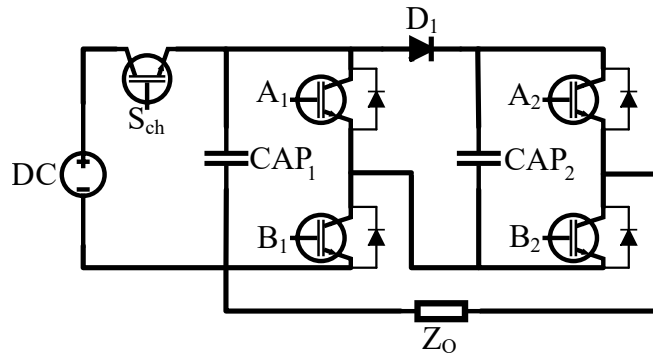


Fonte: Adaptado de (SHI et al., 2015).

Nesta proposta dois fortes inconvenientes são o fato de que cada célula emprega uma fonte isolada própria e não há controle da quantidade de capacitores envolvidos nos pulsos.

Por fim, (SAKAMOTO et al., 2012) apresenta dois sistemas. Um GM unipolar baseado em topologia HB e visto na Figura 15.

Figura 15 – Gerador de Marx unipolar com dois estágios de topologia HB proposto em (SAKAMOTO et al., 2012)

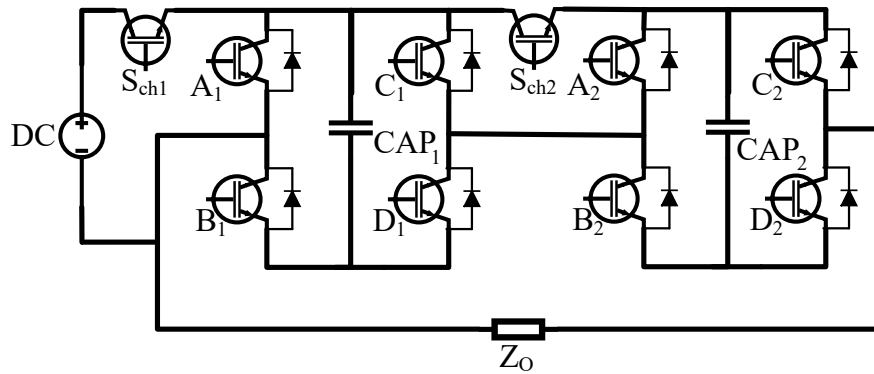


Fonte: (SAKAMOTO et al., 2012).

Nesse sistema, a etapa de carga dos capacitores ocorre fechando-se os interruptores S_{ch} e B . Na etapa de pulsos atuam os interruptores A das células envolvidas no processo.

E outro sistema, capaz de gerar pulsos bipolares, possui topologia FB e é visto na Figura 16. Cada célula emprega quatro interruptores e um diodo (se utilizado interruptor com diodo em antiparalelo). O sistema se caracteriza por possuir redundância de sinais de acionamento de *gate*, permitir diferentes níveis de tensão de saída e interruptores sujeitos ao nível de entrada.

Figura 16 – Gerador de Marx bipolar com dois estágios de topologia FB proposto em (SAKAMOTO et al., 2012)



Fonte: (SAKAMOTO et al., 2012).

Na etapa de carga se fecham os interruptores S_{ch} , B e D . Nos pulsos positivos atuam B e C enquanto nos negativos, A e D .

É neste último circuito que se baseia a proposta deste trabalho. As próximas seções especificam as alterações realizadas e detalham os parâmetros reguláveis de funcionamento do gerador.

A Tabela 2 apresenta algumas das principais características das propostas de GM citadas na subseção, de forma a facilitar a comparação entre elas.

2.2.6 Comparação entre os circuitos abordados

Uma vez apresentadas as configurações e topologias de alguns dos principais circuitos geradores de pulsos de tensão, é possível traçar comparações de vantagens e desvantagens entre si, conforme visto na Tabela 3.

Percebe-se que diversas vantagens e desvantagens são concomitantes a mais de um tipo de circuito. Dessa forma, afirma-se que não existe uma topologia mais correta ou indicada para a geração dos pulsos. Deve-se analisar quais características são interessantes e quais devem ser evitadas na elaboração do projeto e desenvolvimento do sistema.

Por fim, as topologias básicas dos cinco tipos de circuitos são apresentadas na Figura 17.

Tabela 2 – Comparação entre as propostas acadêmicas de GM

Circuito	Fontes de alimentação	Polaridade dos pulsos	Ganho de tensão	Componentes por célula	Controle individual dos capacitores
(ZABIHI et al 2011)	2 x CC	Unipolar	4n	2 x Capacitores 2 x Diodos 1 x Interruptor	Inexistente
(REZANEJAD et al, 2014)	1 x CA	Unipolar	2n-1	1 x Capacitor 1 x Diodo 2 x Interruptores	Médio
(DELSHAD et al, 2017)	1 x CA	Bipolar	n-1	2 x Capacitores 0 x Diodo 4 x Interruptores	Médio
(REDONDO et al, 2009)	1 x CC	Bipolar	n	1 x Capacitor 2 x Diodos 6 x Interruptores	Médio
(CANACSIINH et al, 2012)	1 x CC	Bipolar	n	1 x Capacitor 2 x Diodos 4 x Interruptores	Médio
(YAO et al, 2016)	2 x CC	Bipolar	n-1	1 x Capacitor 1 x Diodo 2 x Interruptores	Médio
(SHI et al, 2015)	n x CC	Unipolar	n	1 x Capacitor 1 x Diodo 2 x Interruptores	Inexistente
(SAKAMOTO et al, 2012)	1 x CC	Bipolar	n	1 x Capacitor 1 x Diodo 5 x Interruptores	Médio

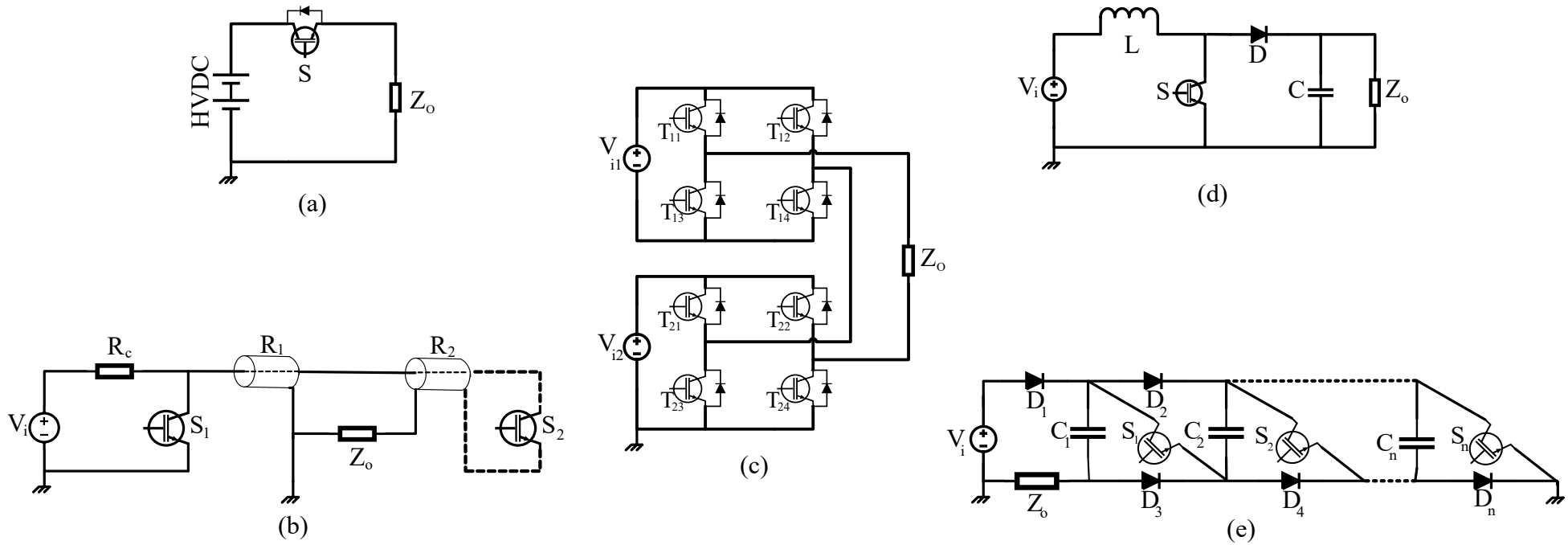
Fonte: Produção do autor.

Tabela 3 – Comparação entre os principais circuitos geradores de pulsos de tensão

Tipo de circuito	Vantagens	Desvantagens
Alimentação com nível da tensão de pulso	- Baixa quantidade de componentes; - Comando simplificado.	- Fonte volumosa, pesada e cara dependendo do patamar de tensão; - Se a fonte for fixa, não há possibilidade de alteração da intensidade de pulsos; - Isolação no comando dos interruptores; - Nível de tensão de pulso aplicado nos interruptores.
<i>Pulse Forming Network</i> de Blumlein	- Baixa quantidade de componentes; - Comando simplificado; - Dependendo da topologia não necessita isolamento no comando dos interruptores.	- Cabos coaxiais incrementam os custos e volume do circuito; - Larguras de pulsos elevadas demandam grandes comprimentos dos cabos; - Nível de tensão de pulso aplicado nos interruptores.
Inversores multiníveis	- Modularidade no nível da tensão de pulso; - Interruptores sujeitos a tensões inferiores à de pulso; - Nível elevado de pulso com fontes de baixas intensidades.	- Quantidade elevada de fontes incrementa o volume do circuito; - Elevada quantidade de componentes; - Isolação no comando dos interruptores.
Conversores CC-CC	- Baixa quantidade de componentes; - Dependendo da topologia possui comando simplificado; - Nível elevado de pulso com fontes de baixas intensidades.	- Valores fixos dos componentes dificultam a variação dos parâmetros de pulso; - Dependendo da topologia demanda isolamento no comando dos interruptores.
Geradores de Marx	- Modularidade no nível da tensão de pulso; - Nível elevado de pulso com fontes de baixas intensidades. - Energia aplicada na carga é proveniente dos capacitores e não diretamente da rede.	- Elevada quantidade de componentes; - Isolação no comando dos interruptores; - Dependendo da topologia o nível de tensão de pulso é aplicado nos interruptores.

Fonte: Produção do autor.

Figura 17 – Topologias básicas dos principais circuitos geradores de pulsos de tensão. (a) Circuito com fonte tensão no nível do pulso de saída (b) *Pulse Forming Network* de Blumlein (c) Inversor multinível (d) Conversor CC-CC elevador (e) Gerador de Marx.

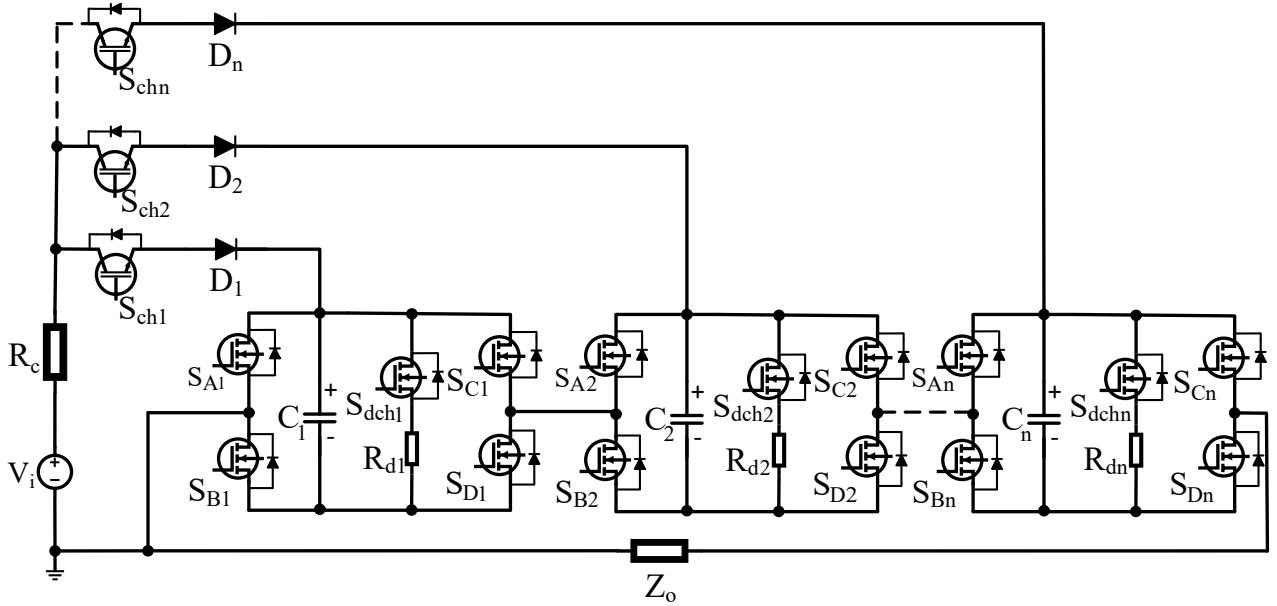


Fonte: Produção do autor.

2.3 TOPOLOGIA ADOTADA

Com base nos conceitos e revisões apresentados na seção anterior, optou-se em adotar o Gerador de Marx como circuito responsável pela geração dos pulsos de tensão. A topologia escolhida para ser analisada e projetada neste trabalho é uma variação daquela apresentada por (SAKAMOTO et al., 2012) e pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 – Gerador de Marx proposto



Fonte: Produção do autor.

A escolha desse circuito se deu por empregar apenas uma fonte CC de baixa tensão, possuir sinais de comando de *gate* redundantes (repetidos, independente da quantidade de células utilizadas) e possibilitar a geração de pulsos com bons ajustes dos parâmetros quantidade, largura, frequência e intensidade. A topologia FB das células capacitivas possibilita a geração de pulsos bipolares.

A principal diferença do circuito proposto em relação ao apresentado por (SAKAMOTO et al., 2012) é quanto à posição dos interruptores responsáveis pela carga dos capacitores S_{ch} . Dispostos em paralelo e não em série, essa nova configuração permite uma alternância dos capacitores a serem carregados durante os protocolos de eletroporação. Caso apenas duas células capacitivas fossem utilizadas em um determinado procedimento de eletroporação, pela topologia original, necessariamente os dois primeiros capacitores atuariam na geração dos pulsos.

Com a disposição em paralelo, é possível dividir de forma mais equilibrada a entrada em atuação de cada capacitor, não ficando uma célula sobrecarregada em detrimento às outras. Além disso, essa topologia evita picos de corrente quando dois protocolos seguidos empregam quantidades de células capacitivas distintas, fato que acarreta perdas

relevantes ao sistema (LEI; PILAWA-PODGURSKI, 2015).

Por exemplo, se realizado um procedimento com dois capacitores, e na sequência se deseje fazer outro, desta vez com três capacitores. Pela topologia original um capacitor ficaria diretamente em paralelo com os outros dois, com tensões distintas e sem uma resistência para limitação da corrente entre eles, já que o capacitor não se descarrega totalmente ao final do protocolo de pulsos. Dessa forma, picos de correntes indesejados ocorreriam, podendo danificar componentes do circuito e até gerando riscos à operador e carga.

Seguindo a proposta deste trabalho após o protocolo com dois capacitores, é possível fazer a carga individual do terceiro capacitor, e em seguida a recarga dos dois primeiros, sem que haja sobrecorrentes indesejadas.

São utilizados diodos em série com os interruptores de carga, pois estes contêm diodo em antiparalelo intrínsecos. Sendo assim evita-se tensões reversas negativas sobre esses semicondutores.

2.4 PARÂMETROS CONFIGURÁVEIS DO PROTÓTIPO

O eletroporador desenvolvido neste trabalho tem suas funcionalidades projetadas para processos de eletroquimioterapia, tratamento que consiste na aplicação de medicamentos em células neoplásicas em conjunto com a eletropermeabilização celular causada pelos pulsos.

A escolha dos parâmetros foi baseada de acordo com as relações entre aplicações, larguras e intensidades de pulsos propostas por (SILVA, 2011) e com as informações técnicas dos fornecedores de eletroporadores que têm esse fim. A Tabela 4 apresenta as especificações do gerador proposto neste trabalho.

Tabela 4 – Parâmetros elétricos dos pulsos do protótipo

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
Quantidade	2	20
Largura	50 μs	500 μs
Amplitude	100 V	1200 V
Frequência	80 Hz	8000 Hz
Corrente	-	15 A
Queda de tensão	-	12 %

Fonte: Produção do autor.

O ganho de tensão do gerador (relação entre os níveis de saída e entrada) é diretamente determinado pela quantidade de células capacitivas carregadas no procedimento, sendo que quanto mais unidades dessas, maior o nível aplicado na carga. Além disso para

se obter um leque ainda mais variado de opções de intensidade de pulsos, é necessário também utilizar um sistema capaz de variar o patamar da tensão de entrada. Neste trabalho é empregado um autotransformador para obtenção dessa variação de tensão. Ressalta-se entretanto, que esse segmento não é foco de estudo e detalhamento aprofundado.

Com base nas considerações feitas no parágrafo anterior, pode-se apontar a possibilidade de variar o nível dos pulsos de saída como um ponto bastante favorável da topologia empregada no protótipo. Ainda mais sabendo que alguns equipamentos comerciais e propostas de circuitos com essa aplicação não possuem tal característica.

Foi estabelecido que as intensidade de pulsos disponíveis no protótipo são intervaladas em 100 V até se atingir o valor máximo, com uma fonte de tensão máxima de 300 V e quatro células capacitivas. A Tabela 5 apresenta a relação entre as tensões de entrada e saída e quantidade de células capacitivas carregadas.

Tabela 5 – Relação entre tensões de entrada e saída e quantidade de células carregadas

Tensão de saída [V]	Tensão de entrada [V]	Quantidade de células carregadas (n)
100	100	1
200	200	1
300	300	1
400	200	2
500	250	2
600	300	2
700	233,33	3
800	266,67	3
900	300	3
1000	250	4
1100	275	4
1200	300	4

Fonte: Produção do autor.

É importante ressaltar que valores intermediários, não múltiplos de 100 V, também podem ser obtidos na saída do gerador, bastando estabelecer valores distintos na entrada. Se utilizada uma fonte de alimentação com tensão fixa a intensidade dos pulsos pode ser a mesma, dobrada, triplicada ou quadruplicada.

A respeito de outros parâmetros configuráveis do eletroporador, a Tabela 6 apresenta todos os valores de largura e frequências de pulsos disponíveis no protótipo. Os intervalos entre dois pulsos distintos também são informados, para melhor compreensão do período total dos protocolos.

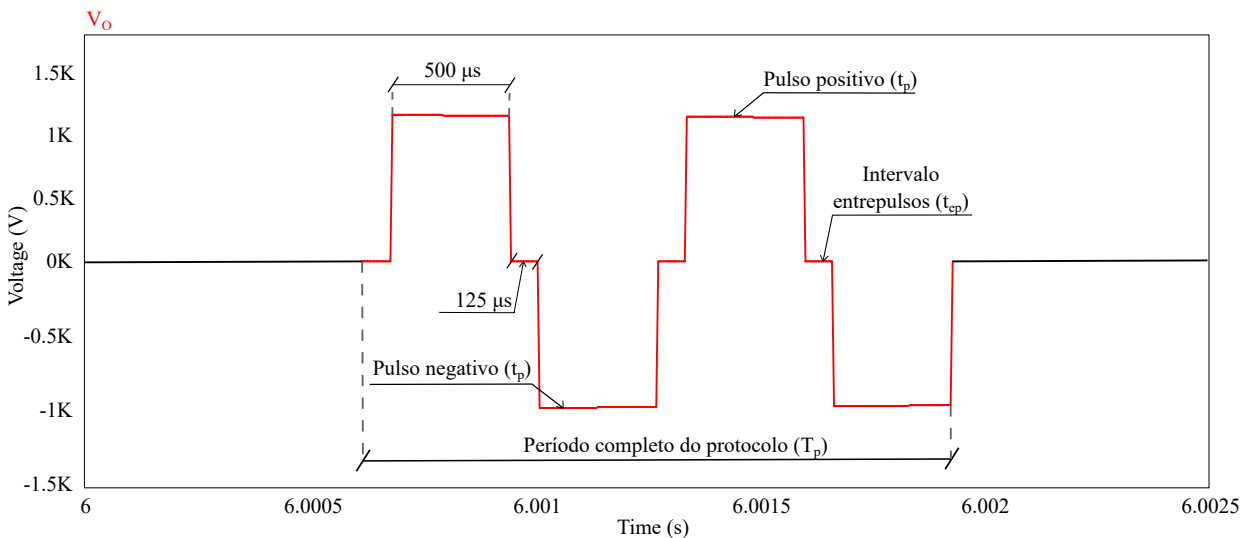
Tabela 6 – Relação entre larguras de pulsos, frequências e tempos entre pulsos disponíveis no protótipo

Largura de pulsos [μs]	Frequência [Hz]/Tempo entre pulsos [μs]				
50	800/575	2600/142	4400/63,6	6200/30,6	8000/12,5
100	400/1150	1300/285	2200/127	3100/61,3	4000/25
200	200/2300	650/569	1100/255	1550/123	2000/50
300	133/3450	433/854	733/382	1033/184	1333/75
400	100/4600	325/1140	550/509	775/245	1000/100
500	80/5750	260/1420	440/636	620/306	800/125

Fonte: Produção do autor.

Um exemplo de protocolo de eletroporação pode ser visto na Figura 19 para facilitar o entendimento das grandezas envolvidas. Nela é mostrada uma sequência de quatro pulsos, com largura 500 μs e frequência 800 Hz .

Figura 19 – Período completo de um protocolo de eletroporação



Fonte: Produção do autor.

2.5 CARACTERÍSTICAS DAS CARGAS BIOLÓGICAS

Após detalhamento das características do circuito proposto para desenvolvimento do eletroporador, é necessário apresentar o comportamento esperado da carga biológica quando aplicados os pulsos de tensão.

O trabalho apresentado por (WEINERT, 2017) expõe relevantes considerações sobre a resposta das principais grandezas elétricas dos tecidos biológicos (fígado de roedor)

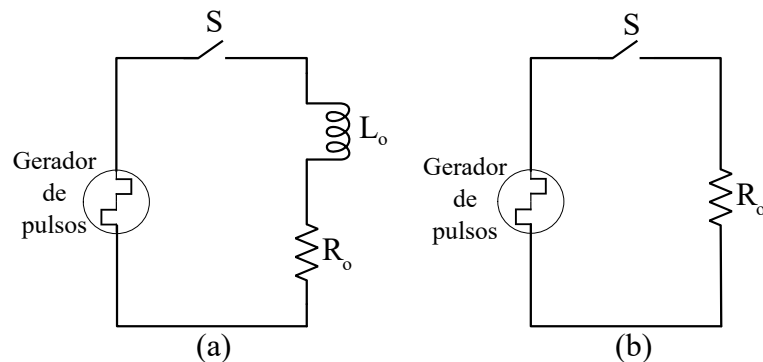
submetidos à eletroporação. O autor destaca que a corrente resultante dos pulsos tem comportamento crescente similar a uma curva exponencial.

O aumento da condutância do tecido, verificado de forma mais significativa no início do protocolo, confirma a ocorrência da eletropermeabilização. Quando uma tensão nula ou de um nível abaixo do limiar de abertura de poros é aplicada, a condutância do tecido também apresenta alteração de valor, porém dessa vez decrescente. Entretanto, na ocorrência de um novo pulso, o nível da grandeza é maior ao visto na aplicação anterior, o que mostra que os poros continuam abertos, não retornando ao estado estacionário com a mesma velocidade de suas criações.

Apesar disso, o acréscimo da condutância não é ilimitado e vai tendendo a diminuir com o passar dos pulsos. Isso se deve pois a membrana atinge um ponto de saturação, devido ao seu elevado número de poros, em que a diferença de potencial transmembrana não se eleva mais na mesma taxa de notada anteriormente.

As informações supracitadas corroboram com o proposto por (SOARES, 2014), que sugere a aproximação da carga biológica a um circuito RL série nos pulsos iniciais, devido ao comportamento exponencial crescente da corrente verificado em ambas as situações. Quando o protocolo estiver em execução, e a condutância apresentar menor taxa de crescimento, a característica resistiva do conjunto tende a ser predominante. A Figura 20 apresenta uma aproximação do circuito do eletroporador conectado à carga biológica.

Figura 20 – Circuito análogo do eletroporador conectado à uma carga biológica. Sendo (a) referente aos pulsos iniciais e (b) após a minimização de sua taxa de aumento da condutância



Fonte: Produção do autor.

3 ANÁLISE QUALITATIVA DO GERADOR

Este capítulo da dissertação explica o funcionamento do circuito utilizado para geração dos pulsos, especifica as etapas de operação desde a alimentação a partir da rede de distribuição de energia elétrica até a carga;

Além do funcionamento do GM em si, também são detalhados os circuitos auxiliares necessários para o funcionamento do mesmo.

3.1 ETAPAS DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE MARX

A topologia do circuito apresentado no capítulo 2 tem seu comportamento e etapas de operação detalhados nesta seção, de acordo com cada etapa de funcionamento.

3.1.1 Etapa de transferência de energia para os capacitores

O funcionamento do protocolo de eletroporação inicia-se realizando a carga dos capacitores das células envolvidas na aplicação de energia à saída com a tensão de entrada.

Para isso entram em condução todos os interruptores S_B e S_D , além dos S_{ch} relacionados no protocolo. Dessa forma, cria-se um ramo comum na parte inferior dos capacitores, conectado diretamente no polo negativo da fonte, enquanto o terminal positivo da fonte é ligado à parte superior (positiva) do capacitor.

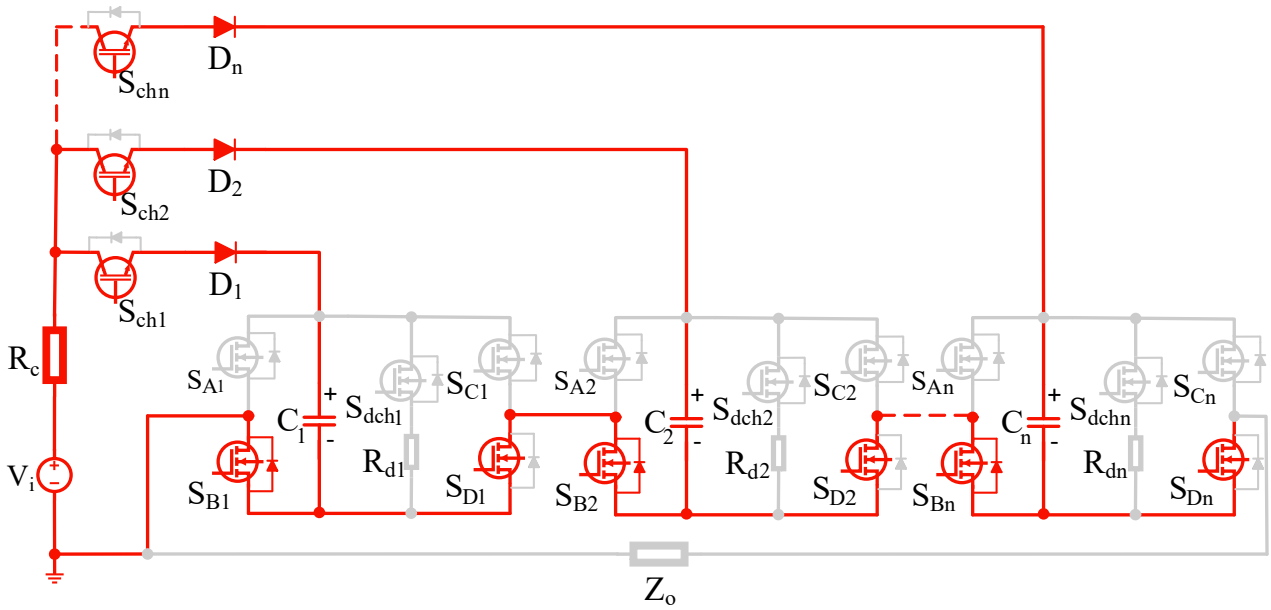
Utiliza-se um resistor R_C em série com a fonte de alimentação para limitar o pico de corrente no período de carga dos capacitores. A Figura 21 apresenta o caminho da corrente percorrida nessa etapa.

O posicionamento diferenciado dos interruptores S_{ch} permite que em caso de alteração da amplitude dos pulsos, entre dois protocolos distintos, os capacitores parcialmente carregados não fiquem dispostos em paralelo com aqueles descarregados.

Por exemplo, caso seja aplicado um protocolo de eletroporação envolvendo apenas os capacitores C_1 e C_2 , e em seguida deseje-se realizar um novo procedimento, com uma intensidade maior. A topologia permite carregar C_3 e C_4 de forma independente, sem colocá-los diretamente em paralelo com os dois primeiros capacitores (não havendo uma resistência suficiente para evitar picos de corrente transitando pelas células), que já possuem tensão residual armazenada.

Na etapa de carga a corrente flui apenas pelos interruptores inferiores das células, S_B e S_D , no caso dos primeiros também pelos seus diodos em antiparalelo. O valor da corrente em cada um deles é distinto, dependendo do posicionamento da célula capacitiva em relação à fonte, e é detalhado no Capítulo 4. O comportamento da corrente nesses interruptores é exponencial decrescente, tendo em vista que se trata de um processo de carga de capacitores.

Figura 21 – Etapa de carga dos capacitores



Fonte: Produção do autor.

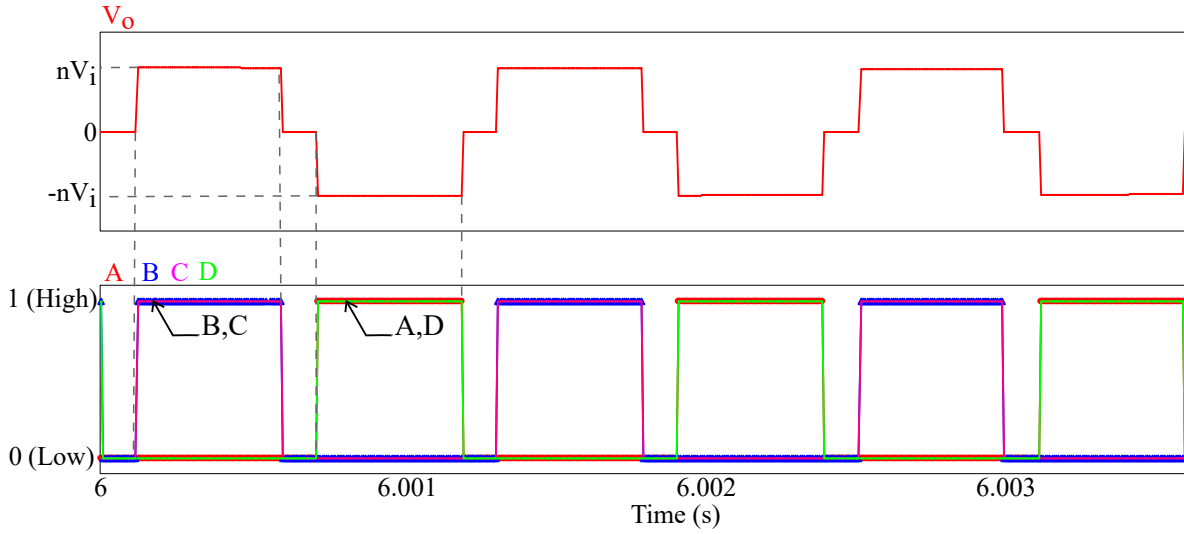
3.1.2 Etapa de aplicação de pulsos na carga

Uma vez carregados os capacitores, pode-se aplicar energia na saída. Cada par de pulsos consiste de um positivo, um intervalo entre pulsos, um negativo e outro intervalo. O período completo do protocolo de eletroporação (T_P) depende dos parâmetros largura, frequência e quantidade, conforme já apresentado na Figura 19.

Durante os pulsos positivos (convencionou-se que eles ocorrem quando a corrente entra pelo lado direito da carga) todos os interruptores S_B e S_C atuam, mesmo das células não envolvidas no fornecimento de energia à carga, criando assim um caminho para que os capacitores fiquem em série e descarreguem a tensão somada na saída. A Figura 22 detalha essa etapa de operação.

No intervalo entre pulsos todos os interruptores permanecem abertos. Em seguida são aplicados os pulsos negativos, que demandam atuação dos interruptores S_A e S_D . Essa etapa de operação é vista na Figura 23.

Figura 24 – Estado dos interruptores e tensão de saída durante aplicação dos pulsos

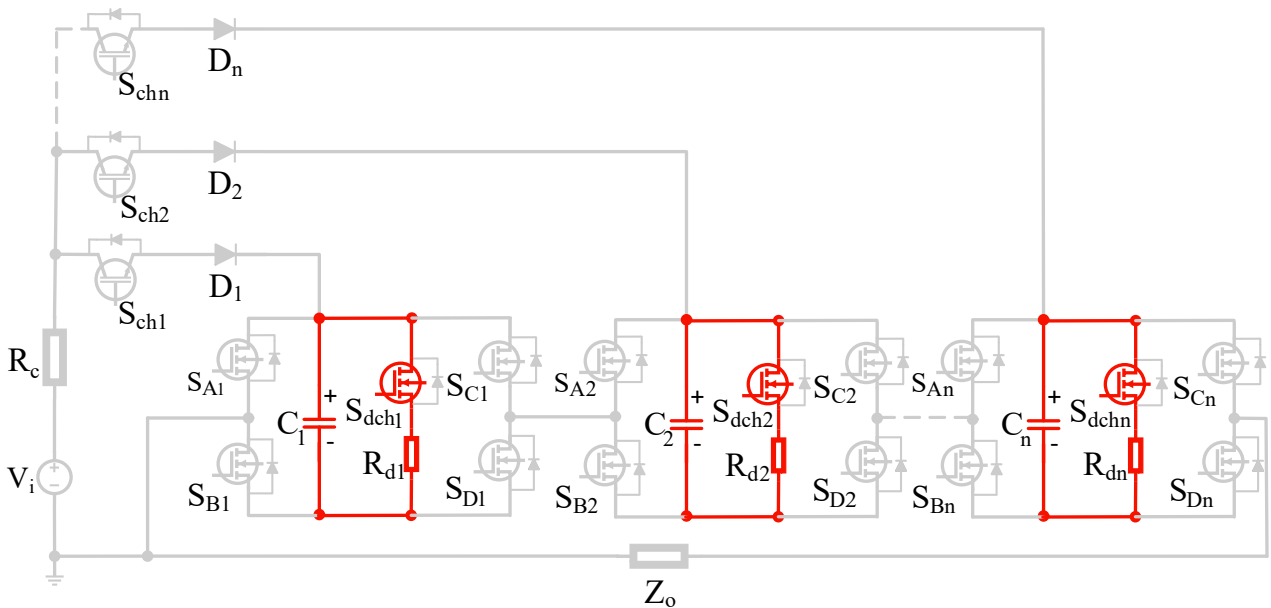


Fonte: Produção do autor.

3.1.3 Etapa de descarga dos capacitores

Após o término dos protocolos de aplicação de pulsos, os capacitores devem ser descarregados para garantir segurança aos operadores, estruturas e equipamentos localizados próximos ao protótipo. Para isso, basta acionar os interruptores S_{dch} . Assim, a energia armazenada é descarregada em resistores específicos para esse fim. A Figura 25 detalha essa etapa de funcionamento.

Figura 25 – Etapa descarga dos capacitores



Fonte: Produção do autor.

Ressalta-se a existência desses interruptores e resistores no sistema, porém eles não

são detalhados e analisados com maior ênfase, como se procede com os demais.

3.2 SISTEMA COMPLEMENTAR DO GERADOR

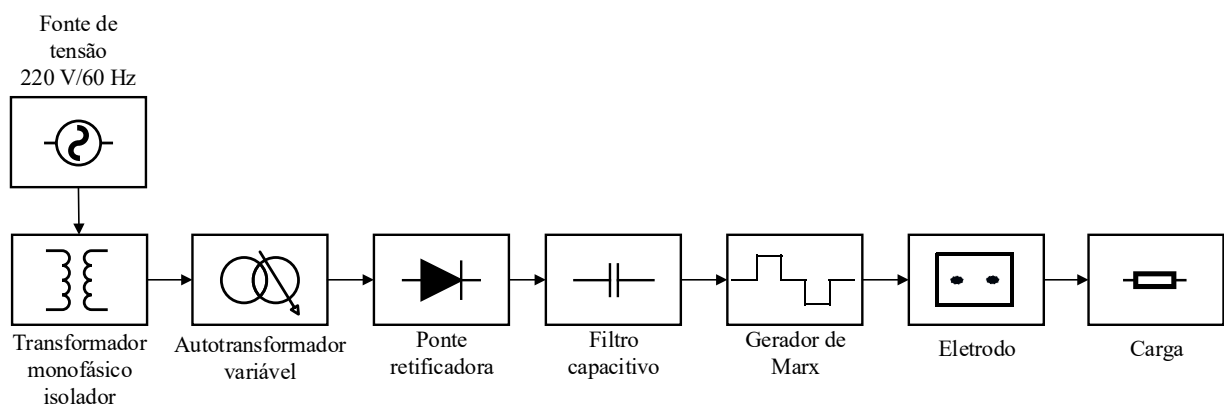
O GM é o elemento central e profundamente analisado neste trabalho, mas é importante destacar que faz parte de um sistema, composto por outros integrantes para formação do eletroporador. Nesta seção é realizado um detalhamento geral desses outros componentes, para que se possa entender suas funções no processo da transformação dos sinais elétricos em tensões pulsadas.

Para a constituição dos trens de pulsos a partir da rede de distribuição (senoidal de baixa tensão) primeiramente se conecta um transformador monofásico para isolamento galvânica do referencial de saída do gerador, em seguida um autotransformador variável para regulação do nível de entrada. Ressalta-se que poderia ser utilizado um retificador caso se demandasse um nível fixo de alimentação ou um conversor CC-CC se fosse necessário um ajuste de tensão controlado.

Em seguida, a tensão alternada com a magnitude desejada passa por uma ponte de diodos e um capacitor com função de filtro, a retificando e mantendo em nível com baixa variação. Esse sinal é que alimenta o GM, e que terá seu valor multiplicado através da associação entre interruptores e capacitores das células.

Na saída do gerador é conectado o eletrodo responsável por levar à carga (tecido biológico) os trens de pulsos constituídos. A Figura 26 apresenta o sistema interligado ao GM em forma de diagrama de blocos.

Figura 26 – Diagrama de blocos do sistema de potência do protótipo



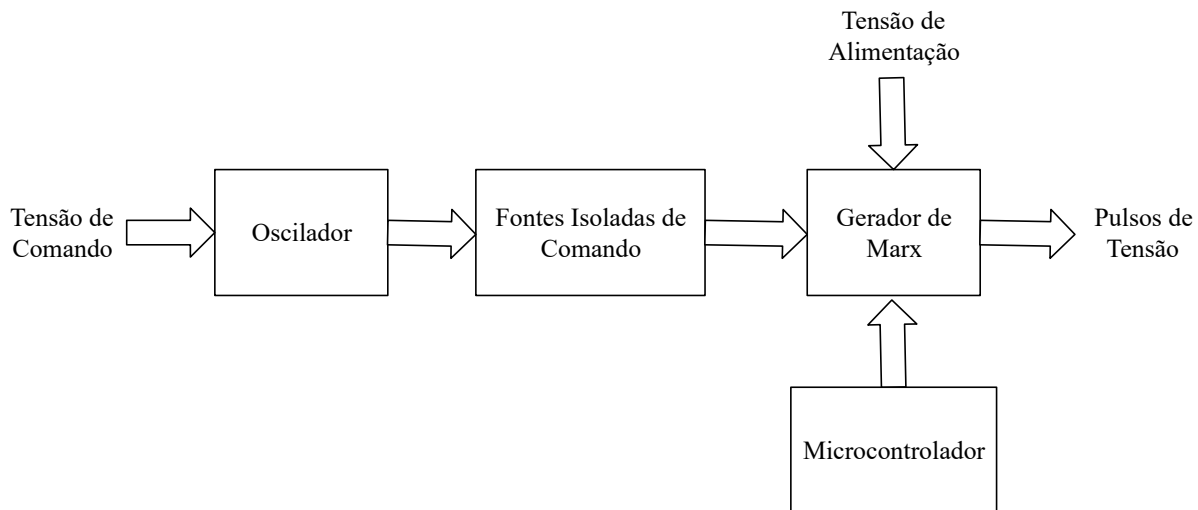
Fonte: Produção do autor.

3.3 CIRCUITOS AUXILIARES

Além do GM, já detalhado na seção anterior, o protótipo do eletroporador conta com outros circuitos responsáveis por comandarem e alimentarem os MOSFETs e IGBTs.

A Figura 27 apresenta o esquema geral de ligação entre todos eles. As subseções seguintes detalham o funcionamento de cada um deles. De uma forma geral, uma tensão de comando de 16 VCC energiza o circuito oscilador, que fornece sinais CA em frequência pré-estabelecida aos primários dos transformadores isoladores de comando (sendo um por interruptor) das fontes de alimentação dos circuitos de *driver* com optoacopladores, localizados juntos ao GM.

Figura 27 – Arranjo dos circuitos auxiliares do protótipo



Fonte: Produção do autor.

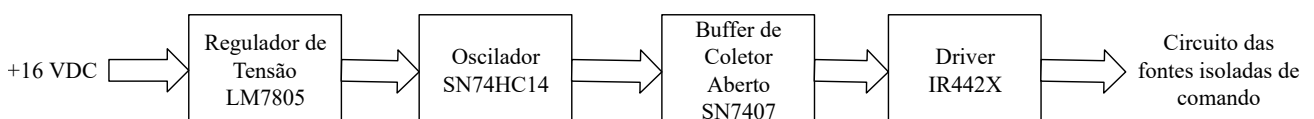
Cada placa física corresponde a uma célula de multiplicação do nível de entrada e recebe além da tensão de comando dos interruptores, os sinais vindos do microcontrolador com os parâmetros desejados de pulsos e a tensão de alimentação retificada da rede de distribuição para, por fim, se estabelecer os pulsos de saída do sistema.

3.3.1 Oscilador

A função principal do circuito oscilador, conforme destacado na seção anterior, é fornecer um sinal CA de frequência pré determinada para os transformadores, de acordo com o dimensionamento destes, do circuito de fontes isoladas de comando.

A alimentação do circuito de comando do protótipo é fornecida por uma fonte controlada e isolada. O diagrama de blocos desse circuito é visto na Figura 28.

Figura 28 – Diagrama de blocos do circuito do oscilador



Fonte: Produção do autor.

Esse sinal CC com baixo *ripple* passa inicialmente por um regulador de tensão LM7805 com saída em 5 V para alimentar o circuito integrado SN74HC14, um inversor com entrada *Schmitt-Trigger* de seis canais.

O componente pode desempenhar diversas funções dentro de um circuito, especialmente diminuir os ruídos de um sinal de entrada ou, como no caso deste trabalho, servir como inversor de alta frequência. Os níveis de resistência e capacitância conectados a um canal determinam a frequência do sinal pulsado de saída. O diagrama elétrico dos pinos desse CI é apresentado no Anexo B, sendo *A* as entradas dos inversores e *Y* as saídas.

A seguir, é necessário converter esse sinal CC pulsado em CA. Para isso, são utilizados dois *drivers* de capacidade elevada de corrente. Um deles com saída em fase com a entrada (IR4427), e outro com a saída invertida (IR4426). Dessa forma, utilizando as duas saídas dos *drivers*, é possível obter o sinal CA com a frequência estabelecida. Cada CI possui dois canais, com capacidade total de 3 A. Novamente, a relação de pinos consta no Anexo B.

A fim de condicionar o sinal de entrada dos *drivers* ao mesmo nível da tensão de comando é necessário elevar a intensidade do sinal vindo do oscilador (5 VCC). Para isso, faz-se uso de um *buffer* com coletor aberto, no caso o CI SN7407, que possui seis canais com saídas até 30 VCC. Com isso, a tensão do oscilador passa a ter o mesmo patamar do comando.

A configuração de pinos desse CI é idêntica à do SN74HC14, em relação à alimentação, entradas e saídas. O esquema elétrico de ligação desse circuito é apresentado no Apêndice E, desconsiderando os capacitores de desacoplamento (presentes entre os pinos de alimentação e nas saídas em relação ao *GND* dos CIs).

3.3.2 Fontes isoladas de comando

Sabendo que os interruptores do gerador não estão conectados a um mesmo referencial, é preciso fazer uso de sinais isolados para seus comandos. Dessa forma é necessário propor um método para gerar essa condição.

Considerando que cada interruptor terá fonte própria, são empregadas vinte e quatro unidades no sistema. O sinal CA gerado pelo oscilador alimenta os transformadores isoladores e elevadores. Esse sinal em seguida é retificado por uma ponte de diodos e filtro capacitivo.

As fontes fornecem um sinal de 21 VCC para alimentação dos optoacopladores e também uma queda de 6 VCC, diretamente nos emissores em caso de IGBT e *source* para os MOSFETs, a fim de prevenir que os interruptores não entrem em condução em situações não intencionais.

Para se obter esse patamar intermediário, é utilizado um regulador de tensão e

um diodo Zener para provocar a divisão necessária. O esquema elétrico das fontes é apresentado no Apêndice E.

3.3.3 Microcontrolador

A possibilidade de gerar pulsos de tensão com diversas grandezas parametrizáveis deve-se à utilização de um microcontrolador como elemento central do comando. Tendo em vista que a complexidade das tarefas e as frequências de chaveamento não são tão elevadas (operam abaixo das dezenas de kHz), é possível utilizar um microcontrolador de 8 bits PIC18F4550.

Foi desenvolvido um programa em linguagem *C* no *software MPLAB IDE v5.00*, da *Microchip*, para comando do protótipo. Ele é apresentado no Apêndice A, enquanto a sua lógica é mostrada em forma de fluxograma no Apêndice B.

A programação dos parâmetros e ordens de início de tarefas são realizadas com auxílio de quatro *push-buttons* e um *display* de LCD conectados ao microcontrolador, que serve de interface com o operador.

Cada sinal de acionamento distinto do GM corresponde a uma saída digital do CI. Assim, são necessários quatro saídas referentes aos interruptores das células (independente da quantidade destas no gerador), quatro sinais de carga e outros quatro de descarga. O esquema elétrico das saídas do microcontrolador consta no Apêndice E.

Primeiramente foram designadas as saídas digitais do microcontrolador de acordo com os sinais necessários de acionamento do gerador. Em seguida são estabelecidas as variáveis relacionadas às funções dos botões e os tempos de carga e descarga dos capacitores.

Os parâmetros dos pulsos são configurados em forma de vetores na programação. Cada um deles carrega consigo as informações de número de capacitores carregados, quantidade, largura e frequência de pulsos. Como estes dois últimos são co-dependentes entre si, é necessário trabalhar com matrizes em que a partir de uma largura especificada, apenas alguns valores de frequência possam ser selecionados.

Na sequência é desenvolvida a lógica de funcionamento dos botões em relação às entradas do microcontrolador, o *display* é configurado e são designados os estados das saídas digitais.

Um dos botões tem função específica de servir de "emergência". Quando acionado o microcontrolador reseta sua operação, os capacitores são descarregados e inicia-se novamente o processo de configuração dos pulsos.

Ao final de um protocolo são disponibilizadas opções de reaplicação dos pulsos ou descarga dos capacitores.

3.3.4 Drivers dos interruptores

Para o acionamento dos IGBTs e MOSFETs são utilizados optoacopladores HCPL3120 da *Avago*, que além de fornecerem sinais de *gate* isolados para cada interruptor, possuem *drivers* embutidos com capacidade de corrente até 2,5 A.

Esses CIs são alimentados pelas fontes de comando e têm seus *LEDs* excitados pelos sinais de acionamento do microcontrolador. A relação de pinos do componente é apresentada no Anexo B.

O diagrama de conexão dos *drivers* ao interruptores é apresentado no Apêndice E. Esses componentes são instalados na mesma placa, de forma a reduzir suas distâncias no sistema. Como as fontes se localizam em outra estrutura, são utilizados capacitores de desacoplamento devido às indutâncias dos fios que interligam ambas.

3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O conteúdo apresentado neste capítulo permitiu compreender as fases de operação do GM a ser desenvolvido para análise. Através dessas etapas foi possível verificar que a energia aplicada sobre a carga biológica na saída do circuito é totalmente proveniente dos capacitores e não diretamente da rede de distribuição.

Esse fato é altamente positivo pois o processo de carga dos capacitores é realizado com uma potência consideravelmente baixa para o sistema de distribuição, dessa forma a rede não sofre com altos picos de demanda para aplicação dos pulsos de tensão. Isso se deve pois é possível realizar a transferência de energia aos capacitores com uma baixo valor de potência e tempo moderado. Diferente do que ocorre na aplicação dos pulsos, em que a potência é bastante elevada, ocorrendo em um curto período de tempo.

Outro ponto levantado na análise qualitativa do sistema é a característica positiva do arranjo dos interruptores de células capacitivas, que permite a utilização de apenas quatro sinais de acionamento, independente da quantidade das mesmas no circuito. Isso gera uma menor demanda de portas lógicas no dispositivo de comando e programação mais simplificada.

Ainda a respeito do comando dos interruptores, é possível notar que alguns deles são referenciados a um potencial comum, como os componentes S_B e S_D de uma mesma célula e S_C e S_A da unidade conseguinte. Com isso, foi possível optar entre desenvolver um transformador isolador para cada dupla de interruptores (com demanda dobrada de potência) ou um elemento magnético individual. Foi optada pela segunda opção, para se manter um padrão construtivo para todos os MOSFETs e IGBTs e também porque cada conjunto de saídas dos CIs de *drivers* do circuito oscilador alimenta os seis transformadores de uma mesma célula capacitiva, os quatro interruptores de célula, o de carga e o de descarga.

A presença dos diodos em série com os interruptores S_{ch} se deve por conta dos diodos em antiparalelo neles embutidos. A seleção dos componentes é descrita de forma mais detalhada na sequência, mas adianta-se que comercialmente eles são encontrados com maior facilidade.

Os diodos poderiam ser removidos, caso empregados interruptores sem diodo em antiparalelo e com elevada capacidade de bloqueio de tensão reversa.

4 ANÁLISE QUANTITATIVA DO GERADOR

Uma vez conhecidas as etapas de operação, estados de acionamento dos interruptores e função dos componentes no sistema proposto, pode-se fazer a análise quantitativa do circuito. Analisando em especial as intensidades das principais grandezas elétricas refletidas nos componentes do gerador em cada um de seus regimes.

Com base nessa análise é possível fazer na sequência o projeto para dimensionamento e seleção dos componentes empregados no GM e circuitos auxiliares. Para que funcionem de forma adequada e eficiente e que garantam segurança ao operador e à carga.

Cada componente é analisado em uma seção própria e na sequência são apresentadas as principais considerações sobre perdas neles registradas.

4.1 DIMENSIONAMENTO DOS CAPACITORES DAS CÉLULAS

O capacitor, elemento que armazena energia no gerador, é selecionado com base na tensão de operação do sistema e máxima queda de tensão estabelecida. Esses valores foram apresentados na Tabela 4.

Conforme verificado no Capítulo 3, a fase inicial de operação do gerador consiste em carregar os capacitores das células envolvidas nos pulsos. A tensão de carga dos mesmos é apresentada na Equação 4.1:

$$V_C = V_i(1 - e^{-t_c/nR_cC}) \quad (4.1)$$

O período de carga t_c dos capacitores depende da magnitude do resistor de entrada R_c que limita a corrente inicial. Ele deve ser selecionado de forma a proporcionar um tempo adequado para os procedimentos de aplicação de pulsos (não muito elevado), mas que limite a intensidade da corrente a patamares aceitáveis.

Uma vez que o valor do resistor é fixo e a capacitância varia de acordo com a quantidade de células carregadas (por estarem em paralelo, o valor total é a soma da quantidade de capacitores envolvidos), o tempo de carga depende desse parâmetro estabelecido no protocolo. Dessa forma, para efeitos de dimensionamento, é escolhido o cenário com todos os capacitores envolvidos.

Como os pulsos são retangulares, os capacitores são dimensionados de forma que eles mantenham a tensão dentro da máxima queda (ΔV_{max}) estipulada na Tabela 4. É tomada como base a situação mais crítica, em que há maior quantidade de células carregadas (n), tempo ou largura de pulso (t_p) e número de pulsos (k), e menor impedância de carga (Z_{min}), conforme equações a seguir:

$$V_C = V_i e^{-t_p n k / Z_{min} C} \quad (4.2)$$

$$\frac{V_C}{V_i} = e^{-t_p nk / Z_{min} C} \quad (4.3)$$

$$\ln(1 - \Delta V_{max}) = \frac{-t_p nk}{Z_{min} C} \quad (4.4)$$

$$C_{min} = \frac{-t_p nk}{\ln(1 - \Delta V_{max}) Z_{min}} \quad (4.5)$$

O comportamento elétrico esperado da carga para os tecidos biológicos submetidos à eletroporação foi apresentado no Capítulo 2. A Equação 4.6 mostra a forma de obtenção da citada mínima impedância de carga, simplesmente pela relação entre os máximos valores de tensão e corrente de saída, ambos vistos na Tabela 4.

$$Z_{min} = \frac{V_{o_{max}}}{I_{p_{max}}} \quad (4.6)$$

Destaca-se que esse valor mínimo da carga é aquele que mantém a queda de tensão dentro dos valores estabelecidos na Tabela 4. O gerador tem condições de fornecer uma corrente superior, desde que seus elementos de chaveamento suportem essa intensidade. Para um valor genérico (Z_o) maior que (Z_{min}) a queda de tensão do pulso final do protocolo será necessariamente menor que a proposta.

4.2 DIMENSIONAMENTO DOS SEMICONDUTORES

Para seleção dos elementos semicondutores, interruptores ou diodos, é necessário conhecer suas tensões e correntes máximas e eficazes. É possível fazer o levantamento dessas grandezas de forma matemática e através da análise do circuito, e validá-las com as simulações computacionais. Estas serão apresentadas no Capítulo 5.

4.2.1 Interruptores das células

4.2.1.1 Tensão nos interruptores das células no período de carga

Como mencionado no Capítulo 3, na etapa de carga dos capacitores os interruptores inferiores das células, S_B e S_D , são ativados para que se possa estabelecer um potencial negativo no terminal inferior dos capacitores. Sendo assim, não existe tensão sobre eles, enquanto S_A e S_C ficam sujeitos à mesma tensão dos capacitores, exponencial crescente até que se atinja o nível de entrada. Sendo assim, valem as equações de esforços de tensão abaixo para essa etapa:

$$V_{S_A} = V_{S_C} = V_i \quad (4.7)$$

$$V_{S_B} = V_{S_D} = 0 \quad (4.8)$$

4.2.1.2 Tensão nos interruptores das células no período de pulsos

Já na aplicação de energia à carga, a tensão sobre os interruptores depende se a etapa é a de pulsos positivos, negativos ou intervalo entre pulsos. Nos positivos, como S_B e S_C estão fechados, a tensão do capacitor é vista diretamente sobre S_A e S_D , dessa forma, valem as equações a seguir:

$$V_{S_B} = V_{S_C} = 0 \quad (4.9)$$

$$V_{S_A} = V_{S_D} = V_i \quad (4.10)$$

Logo, na etapa de pulsos negativos, vale o inverso:

$$V_{S_B} = V_{S_C} = V_i \quad (4.11)$$

$$V_{S_A} = V_{S_D} = 0 \quad (4.12)$$

No intervalo entre os pulsos, em que todos os interruptores estão abertos, existe a tendência de que os dois semicondutores do braço dividam igualmente a tensão do capacitor. Assim, nesse período vale a equação Equação 4.13:

$$V_{S_A} = V_{S_B} = V_{S_C} = V_{S_D} = \frac{V_i}{2} \quad (4.13)$$

É importante ressaltar que esses valores são os máximos registrados pelos interruptores, já que as tensões vão decrescendo graças à descarga dos capacitores. Essa diminuição é exponencial, porém, analisando apenas os períodos de pulsos, ela parece quase constante devido à alta capacitância envolvida.

4.2.1.3 Corrente nos interruptores das células no período de carga

As correntes dos interruptores das células possuem comportamentos bem distintos na fase de carga dos capacitores e na aplicação de pulsos. Durante a carga, a característica da corrente é de exponencial decrescente muito definida, pois reflete a corrente de carga dos capacitores.

Já durante a aplicação dos pulsos, trata-se também de um comportamento exponencial, porém com característica muito mais retangular devido à elevada capacitância e baixo tempo envolvidos no processo, conforme mencionado na subseção anterior.

A Equação 4.14 determina o valor eficaz de corrente em um período genérico T :

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (4.14)$$

Sabendo que a corrente fornecida pela fonte de alimentação para carga dos capacitores é calculada conforme a Equação 4.15:

$$i(t) = \frac{V_i}{R_c} e^{-t_c/nR_cC} \quad (4.15)$$

Pode-se calcular seu valor eficaz conforme as equações abaixo, sendo I_{P_c} o valor de pico dessa corrente:

$$I_{P_c} = \frac{V_i}{R_c} \quad (4.16)$$

$$I_{c_{rms}} = \sqrt{\frac{I_{P_c}^2}{t_c} \int_0^{t_c} e^{-2t/nR_cC} dt} \quad (4.17)$$

$$I_{c_{rms}} = \sqrt{\frac{-nR_cC I_{P_c}^2}{2t_c} e^{-2t/nR_cC} \Big|_0^{t_c}} \quad (4.18)$$

$$I_{c_{rms}} = \sqrt{\frac{-nR_cC I_{P_c}^2}{2t_c} (e^{-2t_c/nR_cC} - 1)} \quad (4.19)$$

É importante ressaltar que essa corrente é a total fornecida pela fonte. O nível que irá fluir por cada interruptor ativo depende de seu posicionamento no gerador, tendo em vista que todos os capacitores demandam o mesmo nível de corrente para carga e que elas buscam o referencial negativo da alimentação, pode-se afirmar que quanto mais próxima a célula da fonte, maiores serão as correntes que transitam por seus interruptores. A Figura 29 apresenta o circuito do gerador com essa consideração das correntes.

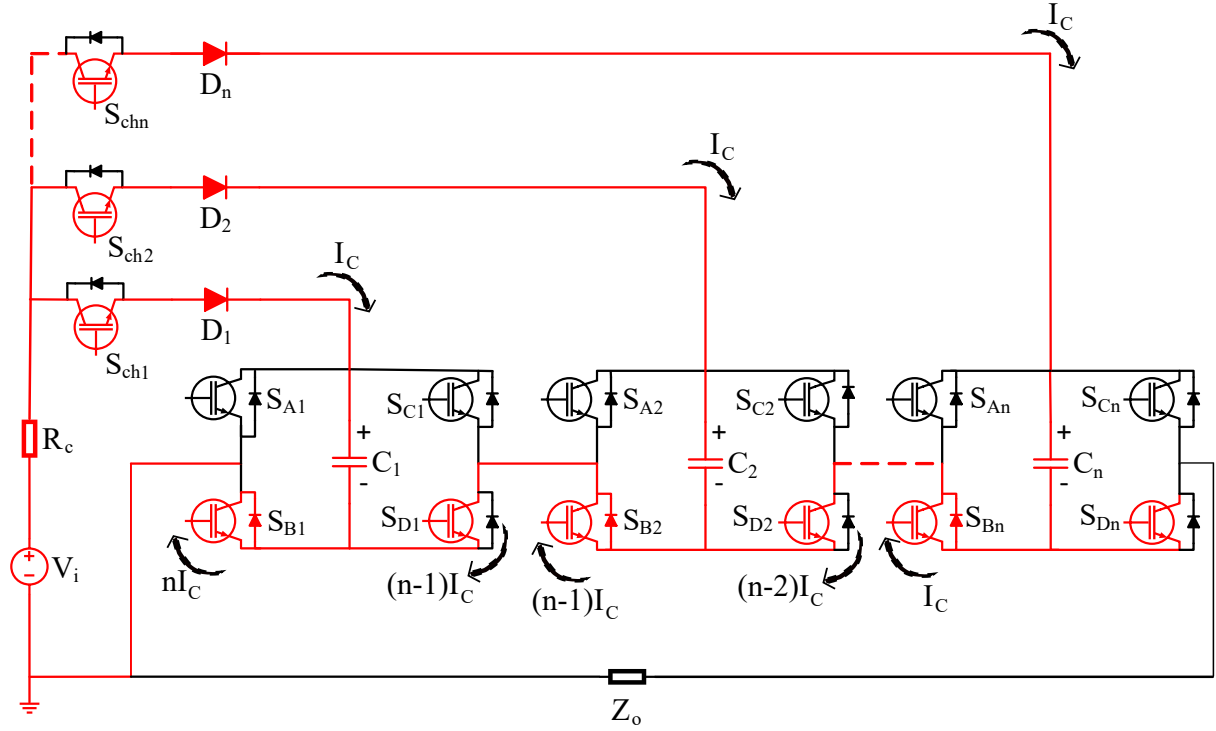
Como todos os interruptores do protótipo são de mesmo modelo, deve-se basear seus dimensionamentos na corrente vista pelo semiconductor sujeito à maior intensidade, no caso a de S_{B1} , que é o próprio valor fornecido pela fonte.

Isto posto, as correntes médias também podem ser calculadas, sabendo que a obtenção desse valor vem da definição vista na Equação 4.20:

$$I_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (4.20)$$

$$I_{c_{med}} = \frac{I_{P_c}}{t_c} \int_0^{t_c} e^{-t/nR_cC} dt \quad (4.21)$$

Figura 29 – Intensidades das correntes que fluem pelos interruptores de célula na etapa de carga



Fonte: Produção do autor.

$$I_{c_{med}} = \frac{-nI_{P_c}R_cC}{t_c} e^{-t/nR_cC} \Big|_0^{t_c} \quad (4.22)$$

$$I_{c_{med}} = \frac{-nI_{P_c}R_cC}{t_c} (e^{-t_c/nR_cC} - 1) \quad (4.23)$$

4.2.1.4 Corrente nos interruptores das células no período de pulsos

O comportamento da corrente que flui nos interruptores das células na etapa de pulsos é exponencial, mas quase retangular se considerado esse período, e tem comportamento ditado pelas equações a seguir:

$$i(t) = \frac{V_o}{Z_o} e^{-t_p n/Z_o C} \quad (4.24)$$

$$I_p = \frac{V_o}{Z_o} \quad (4.25)$$

Nota-se que a magnitude da capacitância é inversamente proporcional à quantidade de células, tendo em vista que os capacitores ficam em série nessa etapa. Contrário ao que ocorre na etapa de carga, em que ficam dispostos em paralelo.

Na fase de pulsos, os interruptores S_B e S_C atuam nos positivos e S_A e S_D nos negativos. Sendo assim, o comportamento da corrente é distinto nesses pares. Como foi padronizado que os pulsos positivos ocorrem primeiro, eles possuem índice ímpar no protocolo. Assim, os negativos são os de índice par.

Dessa forma, as correntes nos interruptores S_B e S_C podem ser calculadas conforme segue:

$$I_{S_{B_{rms}}} = \sqrt{\frac{I_p^2}{T_P} \sum_{i=1,3,5\dots}^{k-1} \int_{(i-1)t_p}^{it_p} e^{-2tn/Z_oC} dt} \quad (4.26)$$

$$I_{S_{B_{rms}}} = \sqrt{\frac{-I_p^2 Z_o C}{2nT_P} \sum_{i=1,3,5\dots}^{k-1} e^{-2tn/Z_oC} \Big|_{(i-1)t_p}^{it_p}} \quad (4.27)$$

Sendo T_P o período total do protocolo, contemplando tanto as larguras de pulsos quanto os intervalo entre eles:

$$T_P = kt_p + kt_{ep} \quad (4.28)$$

Com base na Equação 4.27 pode-se determinar a corrente nos interruptores S_A e S_D :

$$I_{S_{A_{rms}}} = \sqrt{\frac{-I_p^2 Z_o C}{2nT_P} \sum_{i=2,4,6\dots}^k e^{-2tn/Z_oC} \Big|_{(i-1)t_p}^{it_p}} \quad (4.29)$$

Já as correntes médias dos interruptores S_B e S_C são calculadas conforme segue:

$$I_{S_{B_{med}}} = \frac{I_p}{T_P} \sum_{i=1,3,5\dots}^{k-1} \int_{(i-1)t_p}^{it_p} e^{-tn/Z_oC} dt \quad (4.30)$$

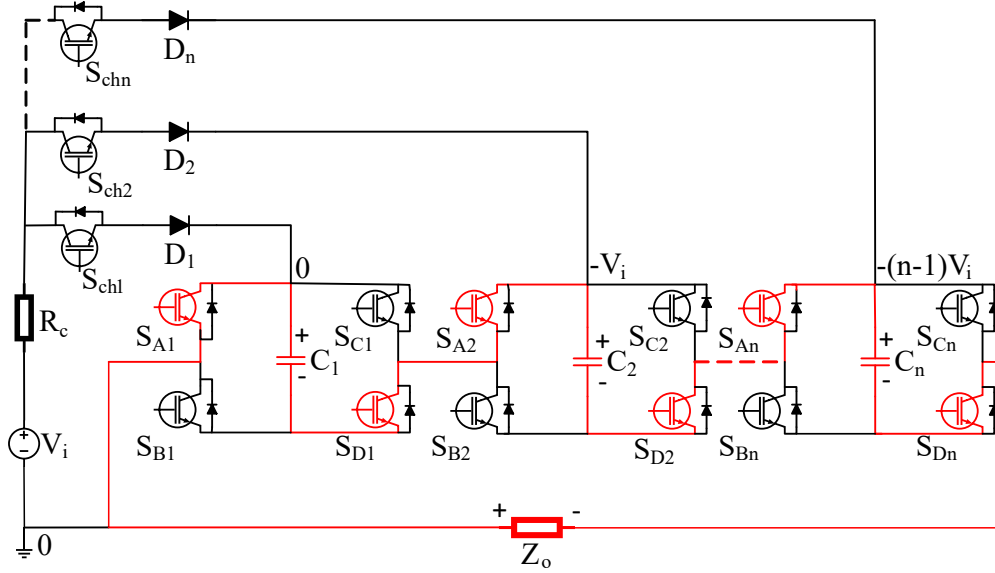
$$I_{S_{B_{med}}} = \frac{-I_p Z_o C}{nT_P} \sum_{i=1,3,5\dots}^{k-1} e^{-tn/Z_oC} \Big|_{(i-1)t_p}^{it_p} \quad (4.31)$$

Para os interruptores S_A e S_D vale a Equação 4.32:

$$I_{S_{A_{med}}} = \frac{-I_p Z_o C}{nT_P} \sum_{i=2,4,6\dots}^k e^{-tn/Z_oC} \Big|_{(i-1)t_p}^{it_p} \quad (4.32)$$

atuam S_A e S_D , a Figura 31 apresenta o potencial nos mesmos nós citados.

Figura 31 – Potencial dos nós conectados aos polos superiores dos capacitores nos pulsos negativos



Fonte: Produção do autor.

Neste caso sim os interruptores S_{ch} ficam submetidos à tensões de bloqueio elevadas, que correspondem aos valores vistos na Equação 4.35, sendo "n"o índice da célula:

$$V_{S_{ch_n}} = nV_i \quad (4.35)$$

Sendo assim, o interruptor sujeito à maior tensão deve suportar o nível máximo de pulso. Enquanto aquele com menor esforço deve suportar a tensão de entrada.

4.2.2.3 Corrente nos interruptores de carga no período de carga

A Equação 4.19 apresenta o valor eficaz de corrente fornecido pela fonte no período de carga dos capacitores. Logo a corrente que flui individualmente por cada interruptor S_{ch} ativo é dado segundo a Equação 4.36:

$$I_{S_{ch_{rms}}} = \frac{I_{c_{rms}}}{n} \quad (4.36)$$

O mesmo pensamento se aplica às correntes média, de acordo com a Equação 4.21 e de pico, seguindo a Equação 4.16.

4.2.3 Diodos de carga

4.2.3.1 Tensão nos diodos de carga no período de carga

Os diodos das células não ficam sujeitos a tensão de bloqueio no período de carga, estejam participando do processo de energização dos capacitores ou não. Dessa forma, para essa etapa vale a Equação 4.37:

$$V_D = 0 \quad (4.37)$$

4.2.3.2 Tensão nos diodos de carga no período de pulsos

O comportamento esperado da tensão sobre os diodos na etapa de pulsos foi adiantado na Figura 30. Assim como os interruptores de carga ficam sujeitos a uma tensão de bloqueio elevada apenas nos pulsos negativos, o mesmo acontece com os diodos, porém na etapa positiva.

O diodo da primeira célula carregada fica sujeito à uma tensão nula, pois tanto ânodo quanto cátodo possuem o mesmo referencial. Já os demais diodos devem bloquear tensões superiores, múltiplas da tensão de entrada na relação vista na Equação 4.38:

$$V_{D_n} = (n - 1)V_i \quad (4.38)$$

4.2.3.3 Corrente nos diodos de carga no período de carga

A corrente nos diodos na etapa de energização dos capacitores é idêntica à dos interruptores S_{ch} e foi detalhada nas subseções anteriores.

4.3 DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES

Outros importantes elementos do eletroporador são os transformadores das fontes isoladas. Eles foram projetados para atenderem os níveis de tensão e corrente necessários para chaveamento dos interruptores, e em seguida montados para instalação no circuito.

Como esses elementos trabalham em frequência na faixa dos kHz é utilizada a ferrite como material dos núcleos magnéticos. Estes que são compostos cada um por duas peças em forma de "E". Primeiro determina-se as dimensões mínimas do núcleo, e em seguida a seção dos fios utilizados nos enrolamentos primário e secundário.

A metodologia de projeto e cálculo de perdas dos mesmos constam no Apêndice F.

4.4 PERDAS ESPERADAS NO GERADOR

Assim como em qualquer sistema eletroeletrônico, o circuito proposto apresenta perdas em seus componentes. Os principais elementos a serem analisados nesta questão são os semicondutores de potência e capacitores do gerador e os transformadores das fontes para verificação de seus acréscimos de temperatura.

4.4.1 Perdas nos semicondutores

4.4.1.1 Perdas nos interruptores de células

As perdas nos interruptores, de acordo com (LIRIO, 2013) podem divididas em duas, as de condução (P_{cond}) e as de comutação (P_{com}). A primeira se caracteriza por ser a potência dissipada pela passagem de corrente na resistência intrínseca do interruptor, enquanto a segunda trata da potência referente aos processos de ativação e desativação dos interruptores.

Como esses semicondutores comutam em frequência na faixa dos kHz e ficam sujeitos à tensões não muito elevadas, assume-se a utilização de MOSFETs para esse fim. Dessa forma, a perda total do MOSFET (P_{MOSFET}) é obtida conforme a Equação 4.39:

$$P_{MOSFET} = P_{cond_P} + P_{com} \quad (4.39)$$

As perdas por condução são apresentadas na Equação 4.40, sendo R_{DS} a resistência intrínseca do interruptor. Dado fornecido em seu *datasheet*.

$$P_{cond_P} = I_{S_{rms}}^2 R_{DS} \quad (4.40)$$

Já as por comutação são calculadas conforme a Equação 4.41:

$$P_{com} = P_{com(on)} + P_{com(off)} \quad (4.41)$$

Sendo $P_{COM(ON)}$ a perda durante a etapa de ativação da chave e $P_{COM(OFF)}$ referente à desativação. O valor total é determinado conforme a Equação 4.42:

$$P_{com} = \frac{V_{DS} I_D f_p (t_{on} + t_{off})}{4} \quad (4.42)$$

Sendo V_{DS} a tensão entre *drain* e *source* um valor intermediário entre zero e a tensão de alimentação, já que os interruptores não chaveiam diretamente do nível máximo para zero. Nesse caso, é considerada metade da tensão de entrada nessa análise, valendo assim

a Equação 4.43. Quanto aos outros elementos, I_D é a corrente *drain* e f_p a frequência dos pulsos.

$$V_{DS} = \frac{V_i}{2} \quad (4.43)$$

É importante ressaltar que as perdas por comutação apresentam valores relevantes apenas quando os interruptores trabalham em regime de chaveamento em alta frequência. Dessa forma, esse tipo de perda só é considerada para os interruptores de células no período de pulsos. Quando eles atuam na etapa de energização dos capacitores essa potência dissipada não é considerada. Os interruptores de carga e os diodos por não trabalharem em alta frequência também são excluídos nesse tipo de análise.

Sendo assim, as perdas por condução no período de carga seguem a P_{cond_C} o estabelecido na Equação 4.40, só alterando a corrente para o nível referente ao regime de operação. Essa análise foi apresentada na Equação 4.19 e Figura 29.

4.4.1.2 Perdas nos interruptores de carga

Conforme mencionado na subseção anterior, os interruptores de carga ficam sujeitos apenas à análise das perdas por condução, já que não atuam com chaveamento em alta frequência. Por esse motivo e também por ficarem sujeitos à uma maior tensão relativamente alta, são empregados IGBTs para desempenharem a função desses interruptores. Sendo assim, o estudo de perdas demanda uma análise distinta.

A potência de dissipação nos IGBTs, P_{IGBT} , é obtida através da curva de tensão de saturação entre coletor e emissor $V_{CE_{SAT}}$, fornecida de maneira gráfica no *datasheet* do componente, pela corrente de coletor I_C , já conhecida nas análises anteriores.

$$P_{IGBT} = V_{CE_{SAT}} I_C \quad (4.44)$$

4.4.1.3 Perdas nos diodos

As perdas nos diodos P_D também são simplificadas apenas à condução no período de carga dos capacitores, calculadas conforme Equação 4.45. Sendo V_{TO} a queda de tensão de *threshold* do diodo e r_T sua resistência. Ambas são obtidas no *datasheet* do componente através de análise das curvas de tensão e corrente instantânea.

$$P_D = V_{TO} I_{D_{med}} + r_T I_{D_{rms}}^2 \quad (4.45)$$

As intensidades de correntes médias e eficazes se assemelham aos valores vistos pelos interruptores de carga.

4.4.2 Perdas nos capacitores

As perdas nos capacitores ocorrem majoritariamente devido às suas resistências série equivalentes (R_{SE}). Essas não idealidades são variáveis de acordo com a frequência de operação e temperatura do componente passivo. O *datasheet* fornecido pelo fabricante apresenta curvas normalizadas que relacionam essas três grandezas.

As resistências representam um elemento parasita que causa a descarga de parte da energia acumulada pelos capacitores, gerando decréscimos indesejados nos níveis das tensões em seus terminais. A perda de potência em cada capacitor P_{CAP} é definida conforme Equação 4.46:

$$P_{CAP} = R_{SE} I_{rms}^2 \quad (4.46)$$

4.5 ANÁLISE TÉRMICA DOS SEMICONDUTORES

Uma vez determinadas as potências dissipadas pelos semicondutores, é possível investigar suas contribuições na elevação da temperatura dos mesmos durante suas operações.

A análise térmica permite determinar as temperaturas atingidas pelos componentes, e caso necessário, selecionar dissipadores de calor que tornem possível suas utilizações no sistema proposto sem que haja danos aos mesmos.

Tendo em vista que os interruptores de células atuam nos dois regimes de operação, a análise térmica é feita para aquele com maior dissipação de potência, a fase de aplicação de pulsos. O mesmo não ocorre com os interruptores de carga e diodos, que atuam em um único regime.

Na etapa de pulsos, a potência total dissipada pelos MOSFETs foi apresentada na Equação 4.39. A temperatura de junção T_J , grandeza a ser monitorada, não deve ultrapassar o máximo valor informado pelo fabricante. Esse valor é obtido a partir da Equação 4.47, sendo T_A a temperatura ambiente e R_{thJA} a resistência térmica entre junção e o ambiente:

$$T_J = T_A + P_{MOSFET} R_{thJA} \quad (4.47)$$

Sendo aplicado um dissipador de calor no interruptor para aprimorar o fluxo de calor do mesmo para o ambiente, R_{thJA} é calculada conforme a Equação 4.48. Sendo as resistências térmicas R_{thJC} o valor referente entre junção e cápsula, R_{thCD} entre cápsula e dissipador e R_{thDA} entre dissipador e ambiente.

$$R_{thJA} = R_{thJC} + R_{thCD} + R_{thDA} \quad (4.48)$$

Os dados de resistências térmicas entre junção e cápsula e esta com os dissipadores são fornecidos no *datasheet* do fabricante. Já o valor $R_{th_{DA}}$ é referente à capacidade do dissipador. Deve ser estabelecido um valor inferior ao que atinja a máxima temperatura de junção.

Dessa forma, as equações acima podem ser reescritas conforme a Equação 4.49.

$$R_{th_{DA}} = \frac{(T_{J_{max}} - T_A)}{P_{MOSFET}} - R_{th_{JC}} - R_{th_{CD}} \quad (4.49)$$

Ressalta-se que as considerações acima são válidas para o regime permanente de operação dos interruptores, em que se dissipa seus valores médios de potência, já apresentados. Entretanto, devido à característica pulsada da energia entregue à carga, é preciso investigar também a elevação instantânea de temperatura causada pelos picos de potência dissipados nos interruptores.

Assim, é preciso levar em consideração a grandeza conhecida como impedância térmica ($Z_{th_{JC}}$) entre junção e cápsula. Seu valor também é obtido no *datasheet* do componente, através de gráfico exponencial que relaciona o *duty cycle* e a largura dos pulsos.

Em (WANG et al., 2015) é proposto um sistema de monitoramento da impedância térmica de um módulo IGBT também empregado em uma aplicação pulsada. Os autores destacam a influência da temperatura ambiente e potência de pico na contribuição para determinação do valor real de impedância. Além disso, propõem que dados como densidade, condutividade e capacidade térmica dos materiais condutores devem ser conhecidos na modelagem de difusão térmica do componente.

Os autores apresentam dois possíveis comportamentos da temperatura de junção dos interruptores nessa aplicação, vistos na Figura 32.

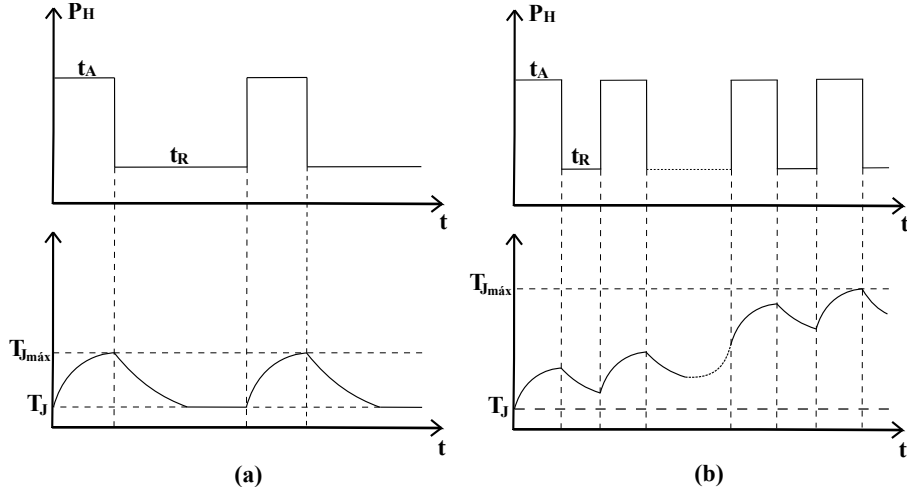
Na situação (a) a temperatura de junção atinge seu valor máximo ao fim do pulso, período de aquecimento (t_A), e em seguida retorna ao patamar relativo à dissipação da potência média, no período de resfriamento (t_R).

Já na situação (b) a temperatura de junção não retorna ao nível considerado estacionário, pois o interruptor volta a atuar na pulsação antes que isso ocorra. Para esse caso, nota-se um aumento de temperatura gradativo e ilimitado até o fim da aplicação desses pulsos.

Para simplificação da análise, a impedância térmica neste trabalho foi obtida através da multiplicação da maior largura de pulsos possível pela máxima quantidade dos mesmos a que um interruptor fica sujeito (metade da quantidade total do protocolo). No gráfico disponibilizado pelo fabricante é contemplada uma curva referente a um pulso único, sendo esta a adotada na metodologia empregada.

Para verificação da temperatura de junção nos pulsos, é preciso primeiramente

Figura 32 – Comportamentos possíveis da temperatura de junção de um interruptor em aplicação pulsada



Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2015).

determinar a potência de pico dissipada $P_{P_{cond}}$ por condução em que se utiliza a máxima corrente de pulso do gerador I_p , conforme a Equação 4.50:

$$P_{P_{cond}} = I_p^2 R_{DS} \quad (4.50)$$

Para determinação da potência total dissipada no pico P_P , soma-se a esse valor as perdas por comutação.

Primeiramente é necessário verificar a temperatura da cápsula do interruptor. Para isso, utiliza-se a Equação 4.51:

$$T_C = (R_{th_{CD}} + R_{th_{DA}}) P_{MOSFET} + T_A \quad (4.51)$$

Com base nesse valor, é possível determinar a temperatura da junção no pico de potência T_{JP} , conforme a Equação 4.52:

$$T_{JP} = T_C + P_P Z_{th_{JC}} \quad (4.52)$$

A análise térmica para os interruptores de carga e os diodos ocorre sendo considerada unicamente as perdas por condução. A temperatura de junção desses componentes é idêntica à apresentada na Equação 4.47.

4.6 ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Nesta seção é apresentada a energia transferida da rede de distribuição para os capacitores (E_c) e destes para a saída (E_o). A energia de carga é definida conforme as equações abaixo.

$$E_c = \int_0^{t_c} V_i (1 - e^{-t/nR_cC}) \frac{V_i}{R_c} e^{-t/nR_cC} dt \quad (4.53)$$

$$E_c = \frac{V_i^2}{R_c} \left(\int_0^{t_c} e^{-t/nR_cC} dt - \int_0^{t_c} e^{-2t/nR_cC} dt \right) \quad (4.54)$$

$$E_c = nV_i^2C \left(-e^{-t/nR_cC} \Big|_0^{t_c} + \frac{e^{-2t/nR_cC}}{2} \Big|_0^{t_c} \right) \quad (4.55)$$

Já o fluxo de energia fornecido pelos capacitores é determinado conforme as equações abaixo.

$$E_o = \int_0^{kt_p} V_o e^{-nt/Z_oC} I_p e^{-nt/Z_oC} dt \quad (4.56)$$

$$E_o = V_o I_p \left(\int_0^{kt_p} e^{-2nt/Z_oC} dt \right) \quad (4.57)$$

$$E_o = V_o I_p \left(\frac{-Z_oC e^{-2nt/Z_oC}}{2n} \Big|_0^{kt_p} \right) \quad (4.58)$$

O nível E_c é necessariamente bem superior a E_o , tendo em vista que os capacitores mantêm grande parte da carga, para estarem aptos a fornecer pulsos retangulares (com baixo decréscimo de tensão). Na aplicação de um segundo protocolo em sequência, é realizada uma nova recarga de energia nos capacitores, referente àquela quantidade que foi transferida para a saída.

Ao final da utilização do eletroporador, a energia residual dos capacitores E_r é aplicada nos resistores de descarga, e corresponde à relação vista na Equação 4.59.

$$E_r = E_c - E_o \quad (4.59)$$

4.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O desenvolvimento da análise quantitativa do gerador permitiu realizar alguns relevantes apontamentos a respeito da topologia. Por exemplo, na explicação dos motivos da escolha dessa proposta de GM, foi destacado o ponto positivo de se ter pleno controle dos capacitores a serem carregados para contribuir em um protocolo de pulsos. Porém,

essa alteração em relação ao circuito apresentado em (SAKAMOTO et al., 2012) fez com que os interruptores de carga ficassem sujeitos a níveis bem mais elevados de tensão de bloqueio, chegando até ao patamar de pulso. Na proposta original, esses interruptores ficariam sujeitos a no máximo a tensão de alimentação.

Outro detalhe é que o dimensionamento dos capacitores foi realizado se considerando que no período entre pulsos não há nenhum tipo de fluxo de energia no gerador, todos os interruptores permanecem abertos e os capacitores simplesmente armazenam o nível de carga do final do último pulso. Porém, seria possível realizar novos procedimentos de cargas dos capacitores, para manter suas tensões nos níveis mais elevados possível, especialmente tendo em vista que não há aplicação de tensão na saída durante o período de carga.

Entretanto, chegou-se à conclusão que essa recarga parcial não compensaria. Além de pouco relevante quanto à elevação de tensão nos capacitores, devido ao valor relativamente elevado do resistor de carga R_c e o curto intervalo entre pulsos, a complexidade das instruções de comando sofreria um acréscimo considerável. Dessa forma, foi decidido manter apenas uma carga, antes da aplicação do protocolo.

5 SIMULAÇÕES, PROJETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO GERADOR DE MARX

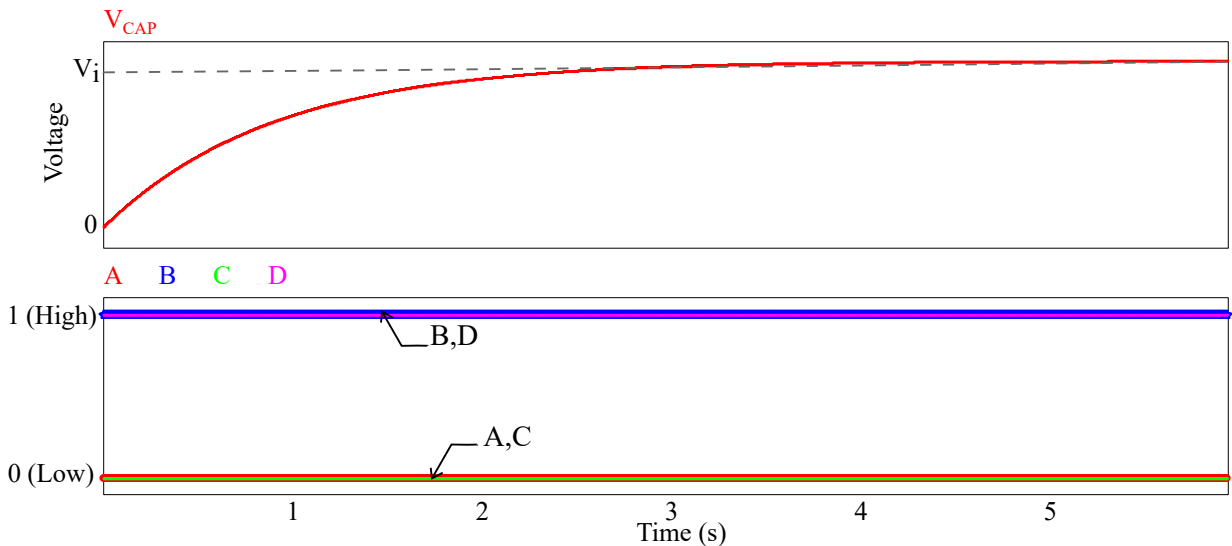
Antes da montagem do protótipo para realização dos experimentos práticos, foram realizadas simulações computacionais, utilizando o programa *PSIM v9.0*. O diagrama testado do gerador é apresentado no Apêndice D. Os pulsos foram gerados utilizando a ferramenta *gate block*, que cria os sinais de acionamento dos interruptores com os parâmetros desejados para análise.

O objetivo da apresentação dos resultados de simulação é comprovar de maneira gráfica, com auxílio de uma ferramenta computacional, as deduções e preceitos vistos nos capítulos 3 e principalmente 4.

Algumas das grandezas de interesse a serem monitoradas são apresentadas em conjunto com os pulsos de tensão de saída, para facilitar a compreensão do funcionamento do gerador. As simulações acontecem com máxima tensão de alimentação e todas as células carregadas.

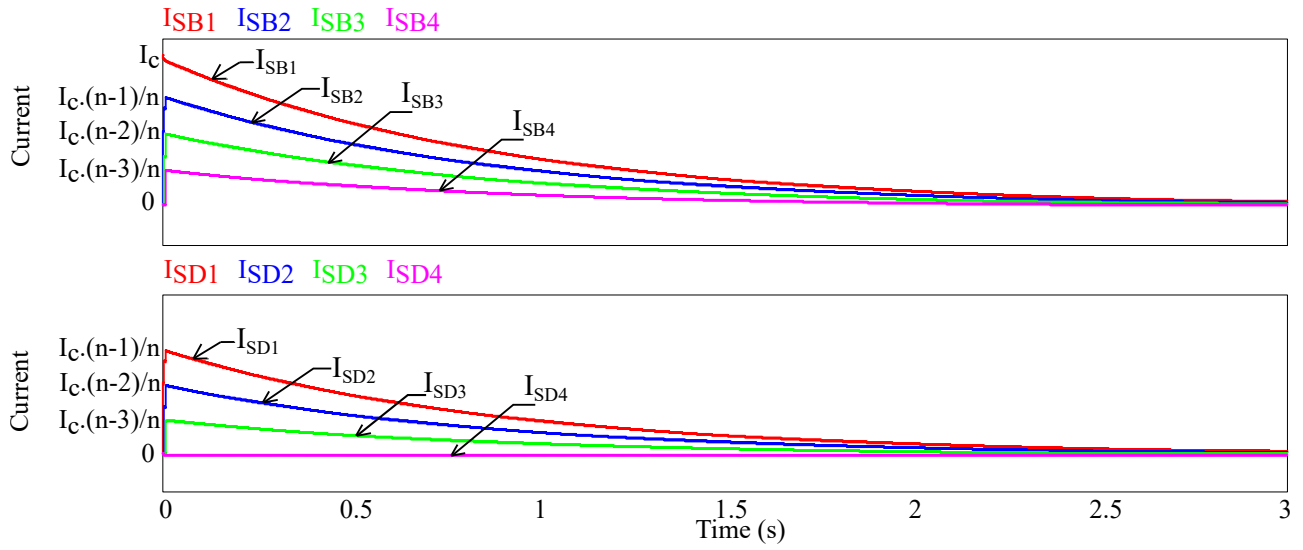
Inicialmente verifica-se a tensão no procedimento de carga de um capacitor V_{CAP} , de acordo com os estados de operação dos interruptores das células. A Figura 33 apresenta o resultado da simulação nessa etapa.

Figura 33 – Tensão de carga de um capacitor e estado dos interruptores de célula



Fonte: Produção do autor.

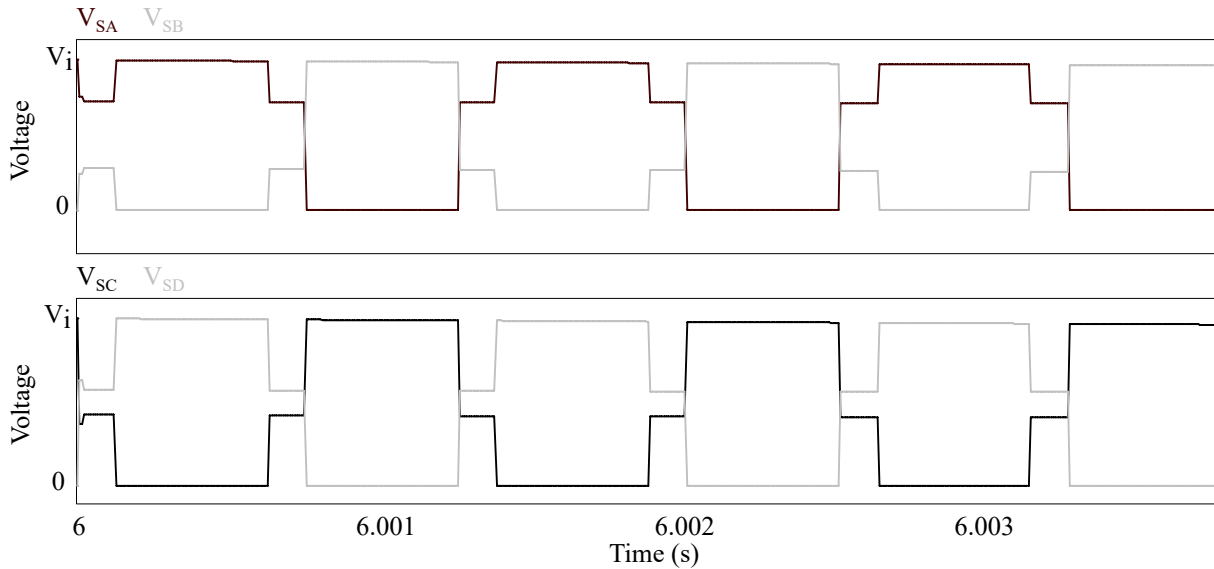
A Figura 34 confirma as diferenças das correntes nos interruptores S_B e S_D das quatro células no período de carga dos capacitores. Conforme mencionado no Capítulo 4, o interruptor S_{B1} é aquele que conduz maior intensidade de corrente, o nível total fornecido pela fonte.

Figura 34 – Correntes de carga nos interruptores S_B e S_D 

Fonte: Produção do autor.

A respeito dos sinais de acionamento dos interruptores das células S_A , S_B , S_C e S_D a Figura 35 apresenta o comportamento da tensão sobre os mesmos no período de pulsos.

Figura 35 – Tensão sobre os interruptores das células na etapa de pulsos

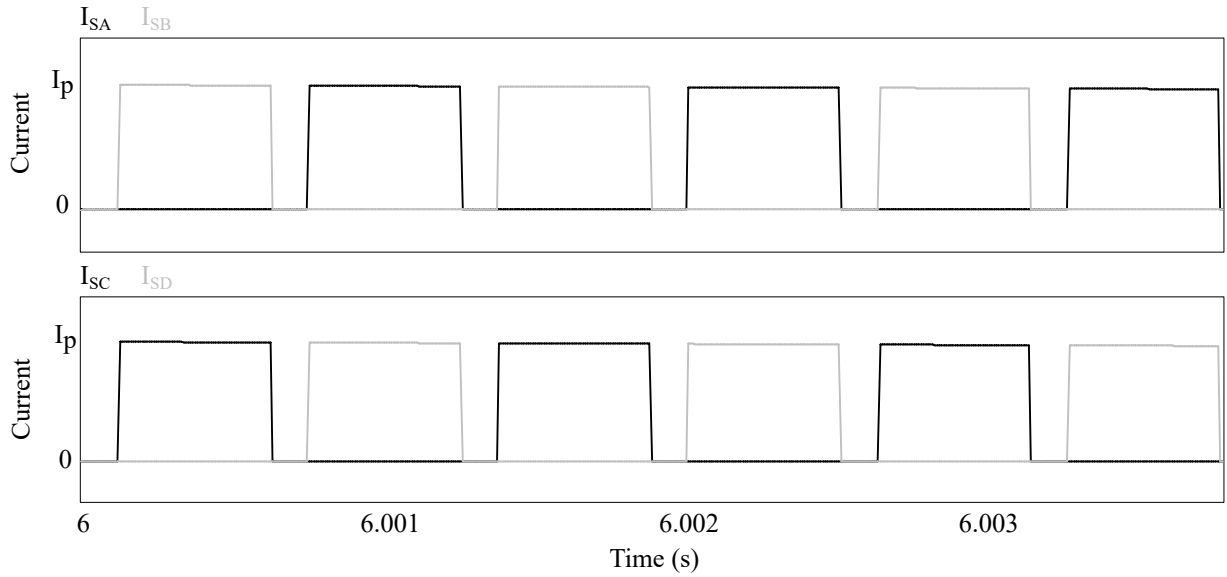


Fonte: Produção do autor.

Nota-se que de fato o máximo valor de bloqueio do interruptor é o mesmo nível da alimentação, durante o pulso contrário àquele que demanda seu estado de condução.

Já o comportamento da corrente nos mesmos interruptores é visto na Figura 36.

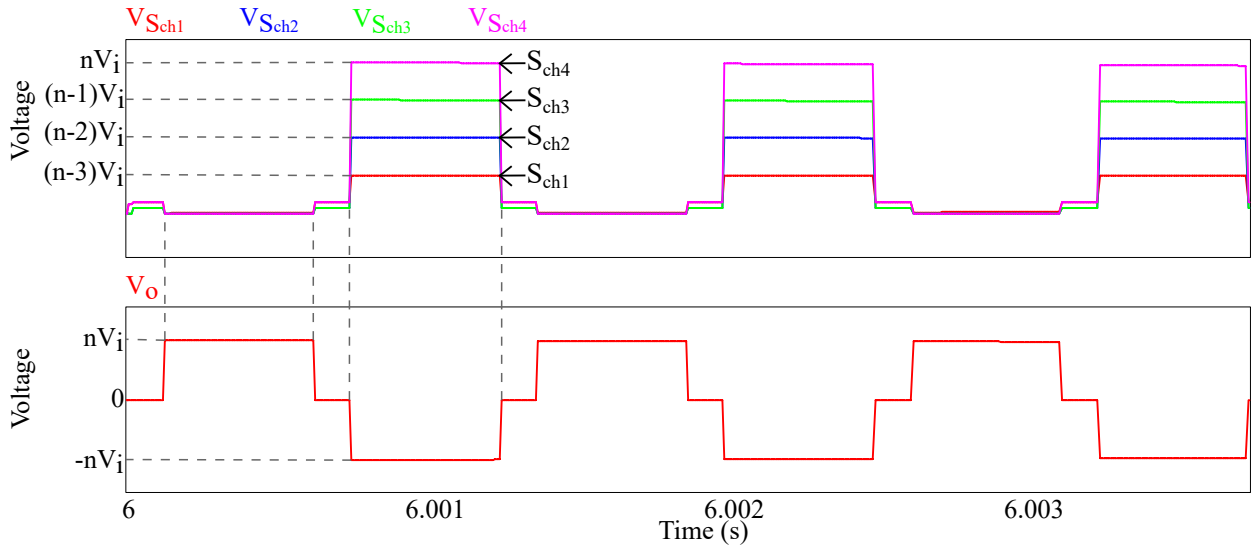
Figura 36 – Correntes nos interruptores das células na etapa de pulsos



Fonte: Produção do autor.

A respeito dos esforços sobre os semicondutores de carga, a Figura 37 mostra a tensão nos interruptores enquanto a Figura 38 apresenta a dos diodos.

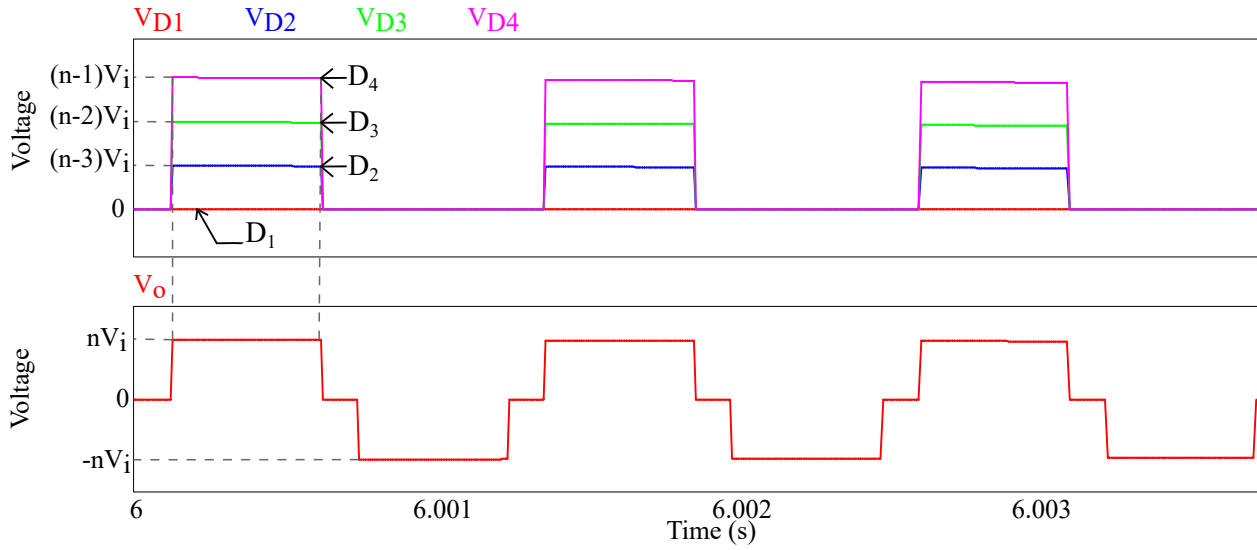
Figura 37 – Esforços de tensão sobre os interruptores de carga na etapa de pulsos



Fonte: Produção do autor.

Percebe-se que os resultados condizem com as equações de valores máximos mostrados na Equação 4.35 e Equação 4.38.

Figura 38 – Esforços de tensão sobre os diodos na etapa de pulsos



Fonte: Produção do autor.

5.2 PROJETO DO GERADOR DE MARX

Após realizar a abordagem das características qualitativas e análise quantitativa do gerador, é possível fazer seu projeto de dimensionamento, realizar a montagem do protótipo, proceder com os testes e medições e concluir os resultados obtidos.

O dimensionamento e análise dos componentes são realizados sempre para o regime mais crítico de operação do gerador.

5.2.1 Capacitores das células

A etapa de projeto do gerador se inicia com a escolha dos capacitores responsáveis pelo armazenamento de energia do sistema.

A mínima capacitância em cada célula pode ser obtida de acordo com a Equação 4.5:

$$C_{min} = \frac{-t_p \cdot n \cdot k}{\ln(1 - \Delta V_{max}) \cdot Z_{min}} = \frac{-500 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 20}{\ln(1 - 0,12) \cdot 80} = 3,91mF \quad (5.1)$$

Por disponibilidade comercial e de materiais, foram utilizados seis capacitores 680 μF /400 V, modelo B43545A9687M0 da *EPCOS*, em paralelo. Somando 4,08 mF em cada célula e 16,32 mF no total.

O valor teórico de queda de tensão de pulsos obtido na simulação, para o cenário com maiores largura e quantidade de pulsos e menor impedância, com essa capacitância foi de 11,48 %.

Conhecendo a capacitância do sistema, foi possível determinar o valor do resistor de entrada. O tempo máximo de carga, t_c , foi fixado em 6 segundos. Com isso uma resistência de $61,27 \Omega$ limitaria o pico da corrente de entrada a $4,89 A$ e carregaria os capacitores a mais de 99,99 % da tensão de entrada.

Foram utilizados quatro resistores tubulares cerâmicos de $220 \Omega/25 W$ em paralelo, para fornecer uma resistência equivalente de 55Ω . Dessa forma, a corrente máxima de entrada é $5,45 A$.

5.2.2 Interruptores das células

Os interruptores devem possuir capacidade para suportar a máxima tensão de alimentação, 300 V, tanto no período de carga quanto nos pulsos.

A máxima corrente de pulso, conforme Tabela 4, é $15 A$. Já a corrente eficaz nessa etapa é calculada conforme a Equação 4.27 e vista abaixo:

$$I_{S_{rms}} = \sqrt{\frac{-15^2 \cdot 80 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4 \cdot 125 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{\frac{-8 \cdot t}{80 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}} \Big|_0^{50 \cdot 10^{-6}}} = 9,48 A \quad (5.2)$$

Foi considerado um cenário com dois pulsos, de $50 \mu s$ e frequência $8 kHz$, já que os capacitores se mantêm com máxima carga nesse caso, o que resulta também em correntes mais elevadas.

Já a corrente média desses interruptores na etapa de pulsos é calculada conforme a Equação 4.31 e vista abaixo:

$$I_{S_{med}} = \frac{-15 \cdot 80 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 125 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{\frac{-4 \cdot t}{80 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}} \Big|_0^{50 \cdot 10^{-6}} = 5,99 A \quad (5.3)$$

Já no período de carga dos capacitores o valor eficaz de corrente da fonte, que flui no interruptor S_{B1} é determinado conforme a Equação 4.18 e pode ser visto abaixo:

$$I_{S_{rms}} = \sqrt{\frac{-4 \cdot 55 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3} \cdot 5,45^2}{2 \cdot 6} \cdot e^{\frac{-2t}{4 \cdot 55 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}} \Big|_0^6} = 1,49 A \quad (5.4)$$

Já a corrente média é determinada conforme a Equação 4.22 e é vista abaixo:

$$I_{S_{med}} = \frac{-4 \cdot 5,45 \cdot 55 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}{6} \cdot e^{\frac{-t}{4 \cdot 55 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}} \Big|_0^6 = 0,81 A \quad (5.5)$$

A Tabela 7 apresenta os máximos valores de corrente dos interruptores de células de acordo com o tipo de regime, tanto com análise matemática calculada (Calc.) quanto de simulação (Sim.) e a variação (Var.) de uma para outra.

Tabela 7 – Máximas correntes dos interruptores de células

Regime	Pico de corrente [A]			Corrente eficaz [A]			Corrente média [A]		
Carga dos capacitores	Calc.	Sim.	Var.	Calc.	Sim.	Var.	Calc.	Sim.	Var.
	5,45	5,41	0,7 %	1,49	1,42	4,7 %	0,81	0,75	7,4 %
Pulsos	Calc.	Sim.	Var.	Calc.	Sim.	Var.	Calc.	Sim.	Var.
	15	14,59	2,7 %	9,48	9,13	3,7 %	5,99	5,73	4,3 %

Fonte: Produção do autor.

Com base nesses valores, foram utilizados MOSFETs de modelo APT5010B2VR, da *Advanced Power Technology* como interruptores das células. As principais informações técnicas desses componentes constam na Tabela 8.

Tabela 8 – Informações técnicas do MOSFET APT5010B2VR

Símbolo	Parâmetro	Valor
V_{DS}	Máxima tensão <i>drain-source</i>	500 V
I_D	Máxima corrente de dreno @25 °C	47 A
I_{DP}	Máxima corrente pulsada de dreno	188 A
V_{GS}	Máxima tensão de <i>gate</i>	± 30 V
$T_{J_{max}}$	Máxima temperatura de junção	150 °C
R_{DS}	Resistência entre <i>drain</i> e <i>source</i>	0,1 Ω
R_{thJC}	Resistência térmica entre junção e cápsula	0,24 °C/W
R_{thJA}	Resistência térmica entre junção e ambiente	40 °C/W

Fonte: Adaptado de (TECHNOLOGY, 2008).

O componente apresenta boa margem de operação tanto em termos de tensão, já que deve suportar 300 V e tem capacidade para 500 V, quanto de corrente.

5.2.3 Interruptores de carga

Conforme destacado no Capítulo 4 e confirmado na simulação vista na Figura 37, os interruptores de carga ficam sujeitos a níveis de tensão distintos entre si. Sendo S_{ch4} aquele que deve suportar o valor crítico da própria intensidade de pulso, 1200 V. Para os demais, há um decréscimo de 300 V de um para outro.

A respeito da corrente, seguindo o proposto pela Equação 4.36 e os dados apresentados na Tabela 7, as correntes que fluem pelos interruptores de carga e diodos são vistas na Tabela 9.

Tabela 9 – Máximas correntes dos interruptores de carga e diodos

Regime	Pico de corrente [A]		Corrente eficaz [A]		Corrente média [A]	
	Calc.	Sim.	Calc.	Sim.	Calc.	Sim.
Carga dos capacitores	1,36	1,35	0,37	0,35	0,20	0,18

Fonte: Produção do autor.

Para os dois interruptores que ficam sujeitos às maiores tensões de bloqueio, S_{ch3} e S_{ch4} , foram utilizados IGBTs modelo G4PH40UD da *International Rectifier*, com os limites de operação conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Informações técnicas do IGBT G4PH40UD

Símbolo	Parâmetro	Valor
V_{CE}	Máxima tensão coletor-emissor	1200 V
I_C	Máxima corrente de coletor @25 °C	41 A
I_{CM}	Máxima corrente pulsada de coletor	82 A
V_{GE}	Máxima tensão de <i>gate</i>	± 20 V
$T_{J_{max}}$	Máxima temperatura de junção	150 °C
R_{thJA}	Resistência térmica entre junção e ambiente	40 °C/W

Fonte: Adaptado de (RECTIFIER, 2006a).

Nota-se que a máxima tensão entre coletor e emissor é justamente o valor limite teórico do interruptor. Ressalta-se que mesmo tendo uma capacidade elevada de bloqueio de tensão, o componente é montado em encapsulamento TO-247, que permite manter o gerador em dimensões reduzidas.

Já para os interruptores S_{ch1} e S_{ch2} são utilizados componentes modelo GP50B60PD, também da *International Rectifier*, com especificações vistas na Tabela 11.

O componente aplicado como S_{ch2} também fica sujeito ao limite, se aplicada tensão de entrada máxima.

5.2.4 Diodos

As correntes que devem ser conduzidas pelos diodos foram apresentadas na Tabela 9. Já as tensões de bloqueio são obtidas com base na Equação 4.38 e confirmadas via

Tabela 11 – Informações técnicas do IGBT GP50B60PD

Símbolo	Parâmetro	Valor
V_{CE}	Máxima tensão coletor-emissor	600 V
I_C	Máxima corrente de coletor @25 °C	75 A
I_{CM}	Máxima corrente pulsada de coletor	150 A
V_{GE}	Máxima tensão de <i>gate</i>	± 20 V
$T_{J_{max}}$	Máxima temperatura de junção	150 °C
R_{thJA}	Resistência térmica entre junção e ambiente	40 °C/W

Fonte: Adaptado (RECTIFIER, 2006b).

simulação, apresentada na Figura 38. Conclui-se que as tensões de bloqueio dos diodos também variam de um para outro em intervalos de 300 V, sendo D_4 aquele que deve suporta o valor crítico de 900 V. Dessa forma, foram utilizados os diodos FR307, da *Diodes Incorporated* para essa função. Seus limites de operação constam na Tabela 12.

Tabela 12 – Informações técnicas do diodo FR307

Símbolo	Parâmetro	Valor
V_{RRM}	Tensão de pico reversa	1000 V
V_{RMS}	Máxima tensão RMS	700 V
I_{med}	Máxima corrente média	3 A
I_{pk}	Corrente de pico por 8,3 ms	150 A

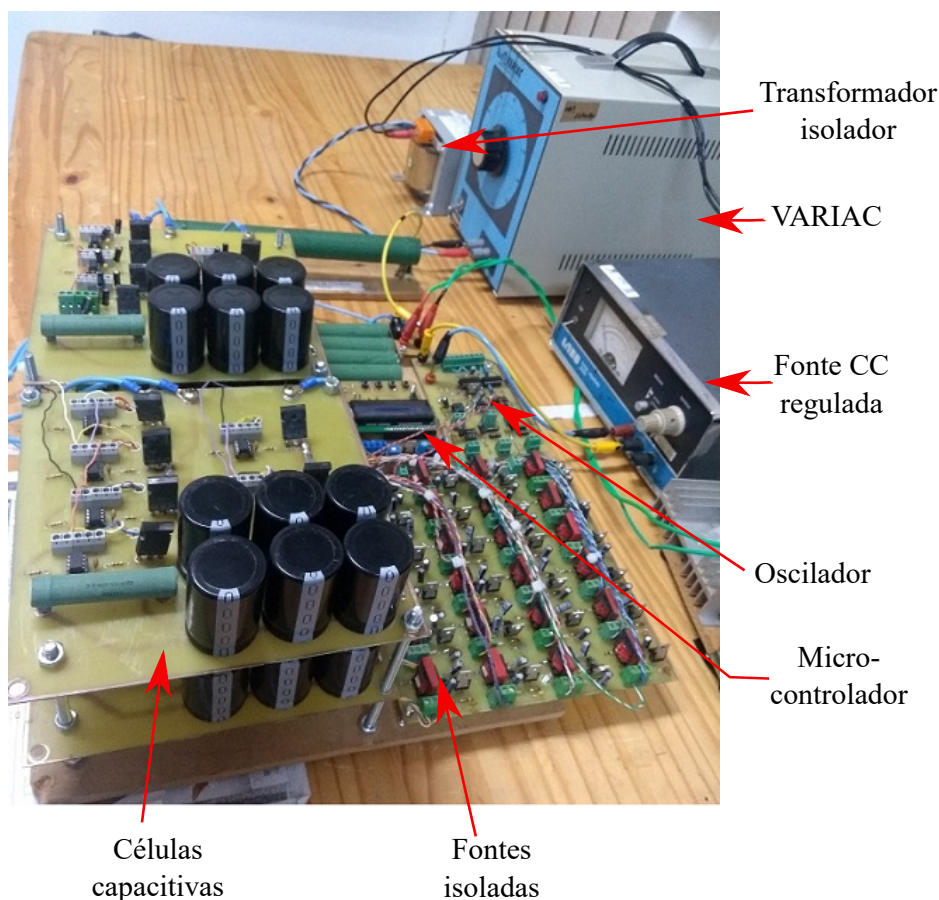
Fonte: Adaptado de (INCORPORATED, 2012)

Percebe-se que assim como no caso dos interruptores de carga, a grandeza preponderante no dimensionamento desse semicondutor é a tensão reversa. Se atuando com todas as células carregadas e aplicada tensão máxima de entrada, o valor de bloqueio chega a 90 % do máximo suportado nominalmente.

5.3 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Conforme mencionado na Introdução deste trabalho, o protótipo contendo o GM e seus circuitos auxiliares foi totalmente montado em laboratório. O conjunto pode ser visto na Figura 39, com indicações dos circuitos de cada placa.

Figura 39 – Vista geral do protótipo



Fonte: Produção do autor.

As placas de células capacitivas e a de fontes isoladas medem aproximadamente 20x20x7,5 cm. Sendo assim, o protótipo completo possui dimensão aproximada de 40x40x15 cm. Permitindo sua utilização em bancada e sendo de fácil transporte e instalação. Os layouts de todas as placas podem ser vistas no Apêndice C.

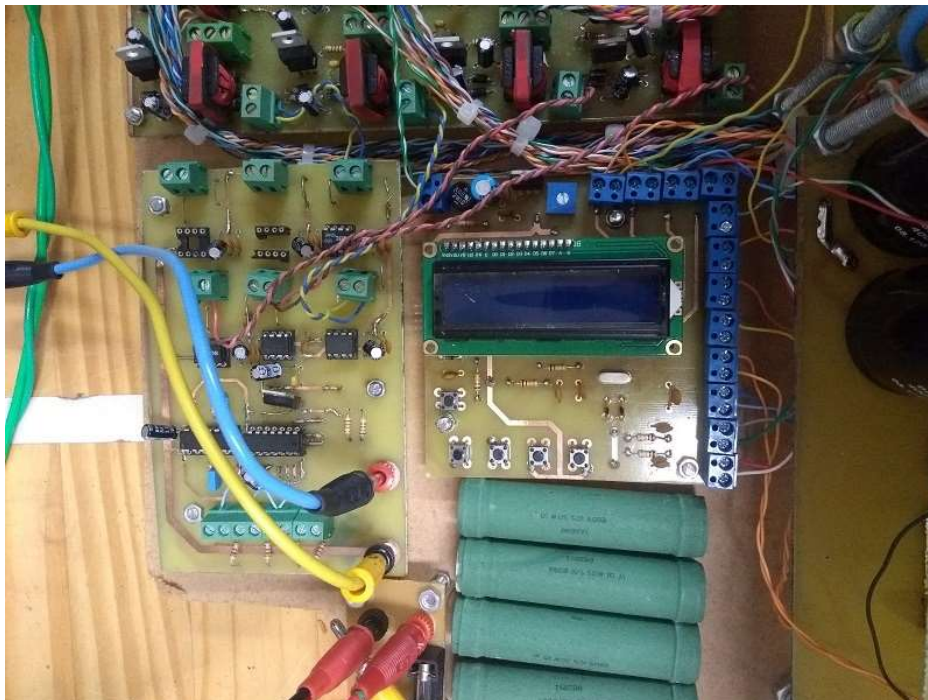
Conforme detalhado no Capítulo 3, a tensão na saída do gerador deve ser isolada galvanicamente da rede de distribuição, para maior segurança em sua operação. Assim, se faz uso de um transformador de comando com relação de transformação unitária.

O autotransformador variável é o elemento responsável por fazer a alteração do nível de entrada do gerador, indo de 0 a 212 VAC para alimentação do retificador que fornece tensão CC na entrada do GM.

A tensão de comando de 16 VCC que alimenta o circuito oscilador é obtida com uso de uma fonte regulada comercial LABO 2025.

A Figura 40 detalha a placa do microcontrolador, com os botões de comando e *display* para interface com o operador.

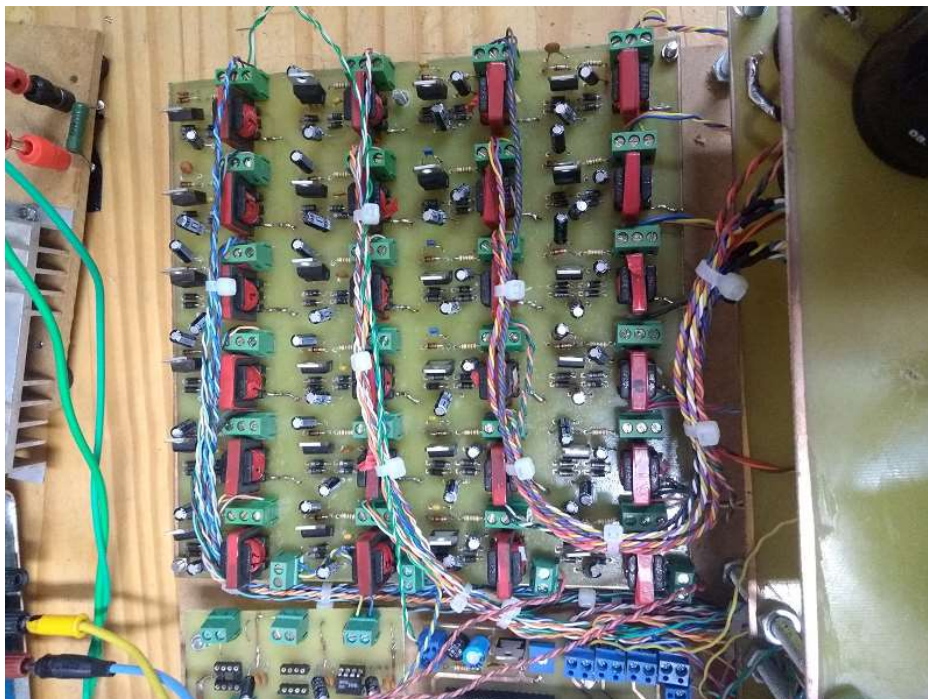
Figura 40 – Detalhe da placa do microcontrolador



Fonte: Produção do autor.

Já a placa contendo as vinte e quatro fontes isoladas de comando dos interruptores é mostrada na Figura 41.

Figura 41 – Detalhe da placa com as fontes isoladas



Fonte: Produção do autor.

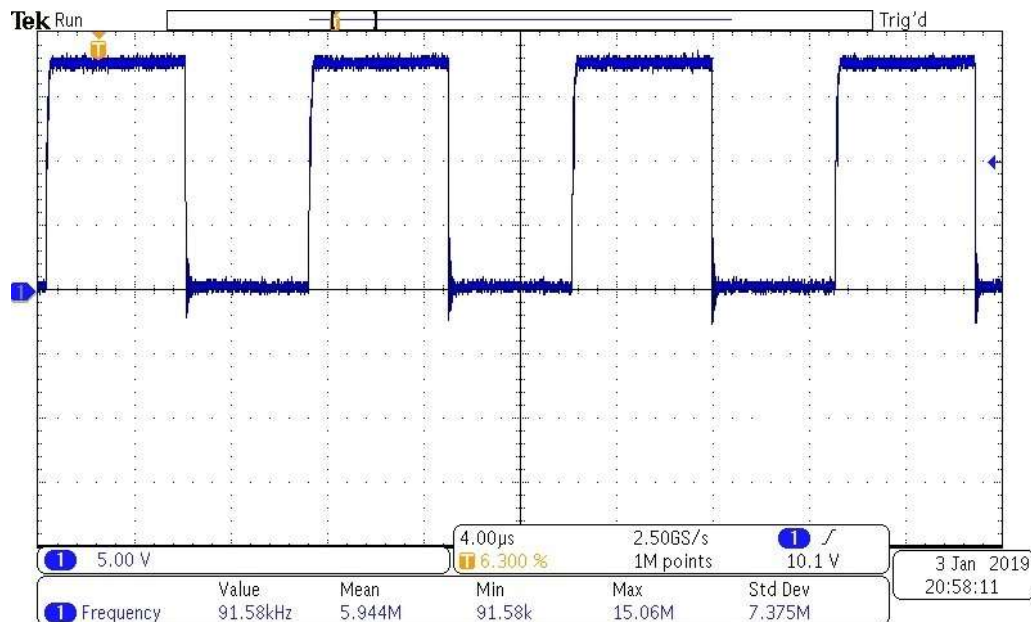
5.4 ANÁLISES DAS MEDIÇÕES

As medições das grandezas elétricas do protótipo foram realizadas utilizando um osciloscópio MDO3014, quatro ponteiras de tensão THDP0100 e uma de corrente TCP0030A, todas da *Tektronix*. As ponteiras de tensão têm limite de operação de 2300 V CAT I e 6000 V de pico. Já a de corrente opera com segurança até 30 A.

Foram realizadas medições dos pulsos de saída, tensões sobre interruptores e diodos, sinais de comando de gate, entre outros para validar os conceitos apresentados nas seções anteriores.

O sinal pulsado da saída do CI de *buffer* coletor aberto SN7407 é apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Sinal pulsado de saída do CI SN7407



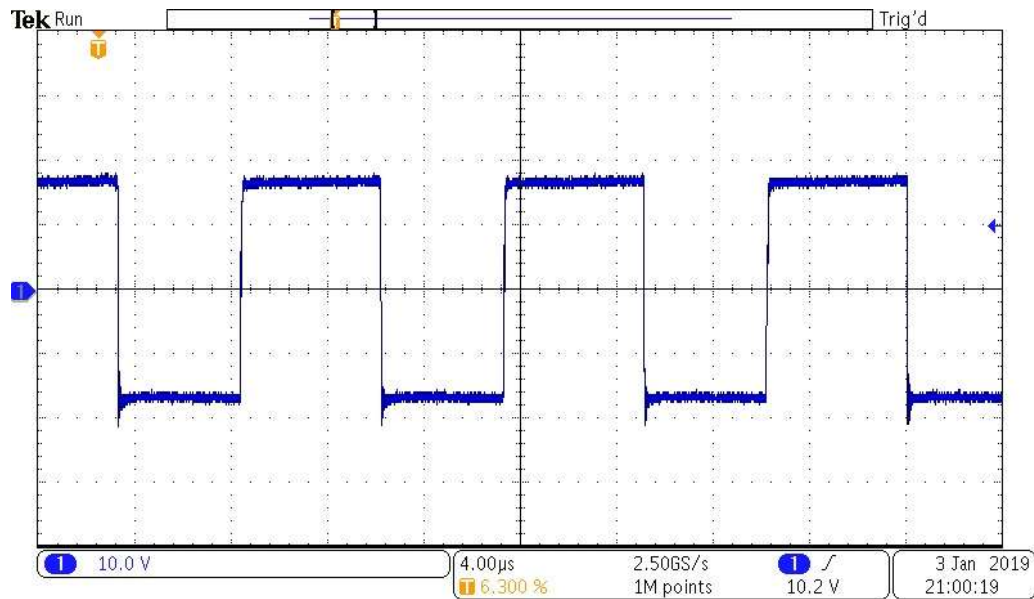
Fonte: Produção do autor.

Observa-se a característica oscilatória de acordo com a frequência desejada. Esse sinal é aplicado nos pinos de entrada dos *drivers*. A medição entre as saídas, que alimentam os transformadores de comando, é vista na Figura 43.

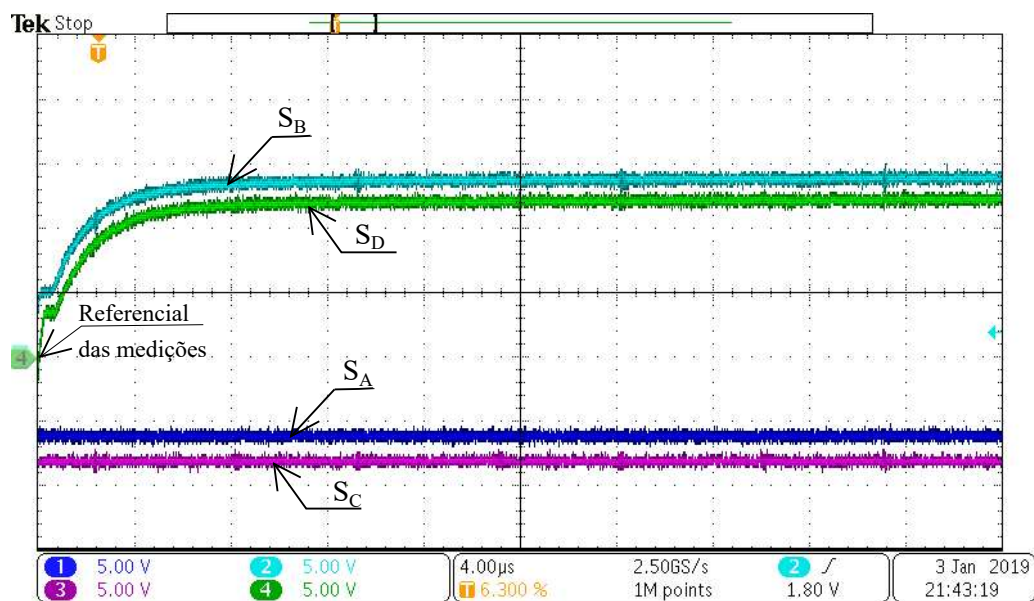
Após ser elevada pelos transformadores a tensão é retificada e dividida para fornecer os sinais de acionamento dos *gates* dos interruptores. Foi padronizado que os sinais referentes aos componentes S_A , S_B , S_C e S_D foram medidos utilizando respectivamente as ponteiras 1, 2, 3 e 4.

Sendo assim, o comportamento das tensões de *gate* de uma determinada célula foram monitoradas durante o período de carga. A Figura 44 apresenta a respostas desses sinais.

Figura 43 – Sinal de alimentação dos transformadores de comando



Fonte: Produção do autor.

Figura 44 – Tensões de *gate* dos interruptores de célula durante período de carga

Fonte: Produção do autor.

Conforme detalhado no Capítulo 3, os interruptores S_B e S_D se fecham nesse período, enquanto os outros dois permanecem abertos.

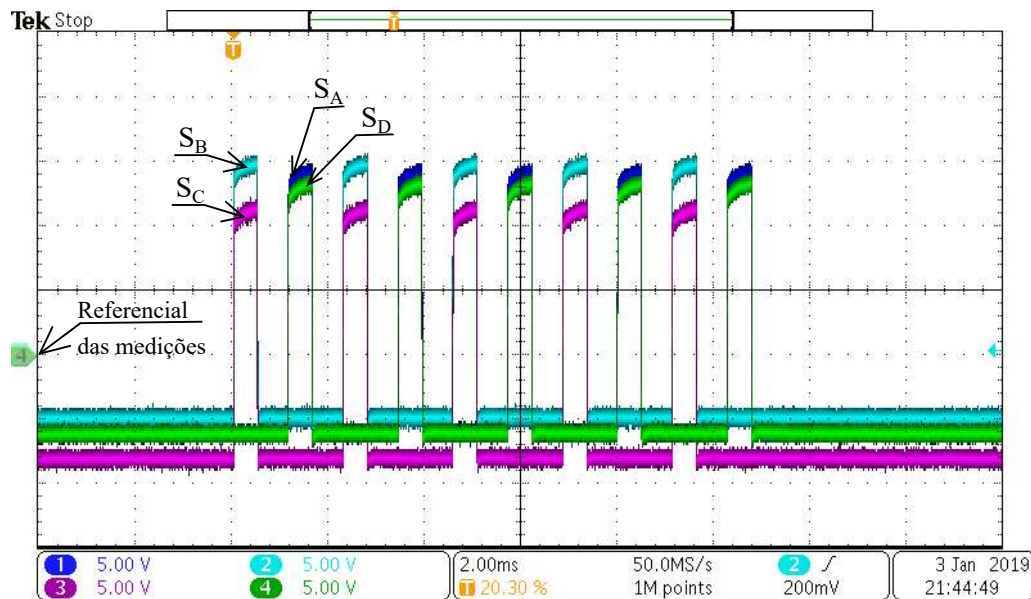
Nota-se uma diferença entre os valores de tensão de *gate* de interruptores com comportamento análogo. As principais causas para ocorrência desse fenômeno podem ser diferenças construtivas dos transformadores, onde as relações de transformação não são

idênticas e quedas de tensão de valores distintos nos diodos zener.

Percebe-se também que não há elevação de tensão indesejada nos *gates* dos interruptores que devem permanecer abertos. Mesmo assim, a tensão negativa é uma importante medida de segurança para que esse tipo de topologia, que possui chaves em braço, não registre curto circuito.

Em sequência, a Figura 45 registra o comportamento dos sinais de *gate* de um protocolo composto por dez pulsos de $500 \mu s$ e frequência $440 Hz$.

Figura 45 – Tensões de *gate* dos interruptores de célula durante período de pulsos



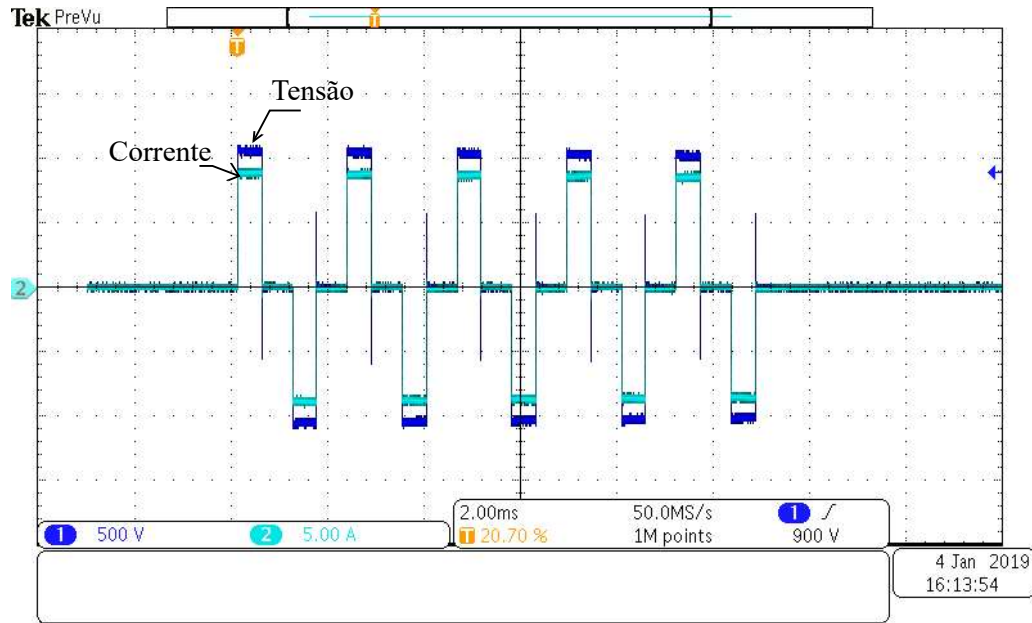
Fonte: Produção do autor.

Nota-se a operação "cruzada" entre os interruptores, com S_B e S_C atuando nos pulsos positivos e S_A e S_D nos negativos.

As quatro células do protótipo foram testadas carregadas a 290 V, para os mesmos parâmetros citados. Aplicou-se os pulsos em uma carga (resistor de fio enrolado) de 120Ω . A Figura 46 apresenta a resposta de tensão e corrente para esse caso.

Como mencionado na etapa de seleção dos semicondutores, a tensão é a grandeza crítica no dimensionamento desses componentes. Sendo assim, o gerador apresentando uma boa resposta e sem avarias ou falhas quando aplicada uma tensão de alimentação de 96,67 % da máxima, pode-se dizer que a operação do mesmo ocorreu de forma exitosa.

É importante ressaltar que a medição dessa tensão ocorreu diretamente nos terminais da carga, e não na saída do gerador. Assim, a ponte de medição do osciloscópio ficou posicionada entre dois componentes com características altamente indutivas, os cabos de cobre de conexão e o resistor a fio. Dessa forma, foi possível notar picos de tensão com polaridade inversa aos pulsos no momento da abertura das chaves, já que houve in-

Figura 46 – Pulsos de tensão de 1160 V, 500 μs e 440 Hz e corrente sobre a carga

Fonte: Produção do autor.

terrupção repentina da passagem de corrente por essas indutâncias parasitas. Isso gerou a inversão da polaridade de tensão nas mesmas e os valores de pico.

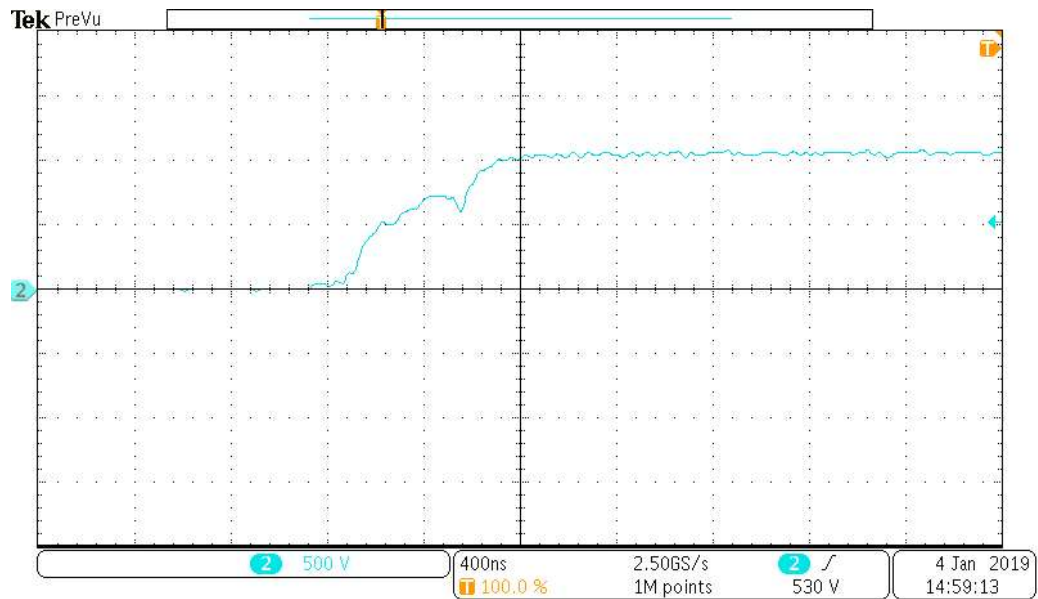
Em aplicações reais é preciso propor uma solução para evitar esses picos reversos na carga. Algumas soluções seriam a utilização de cabos dos eletrodos com baixos valores de indutância parasita ou fazer uso de filtros e *snubbers*.

O tempo de subida do primeiro pulso de um protocolo é visto na Figura 47. Ele vale aproximadamente 800 ns, magnitude relativamente elevada para o MOSFET. Isso ocorre porque R_g é também um valor alto (56 Ω). A escolha dessa resistência se deveu para limitar a corrente de *gate* e reduzir as dimensões do transformador. Levando em consideração os parâmetros escolhidos para protocolos de eletroquimioterapia, esse *delay* superior a meio microsegundo não representa um problema relevante já que a largura mínima de pulsos é 50 μs e o intervalo 12,5 μs .

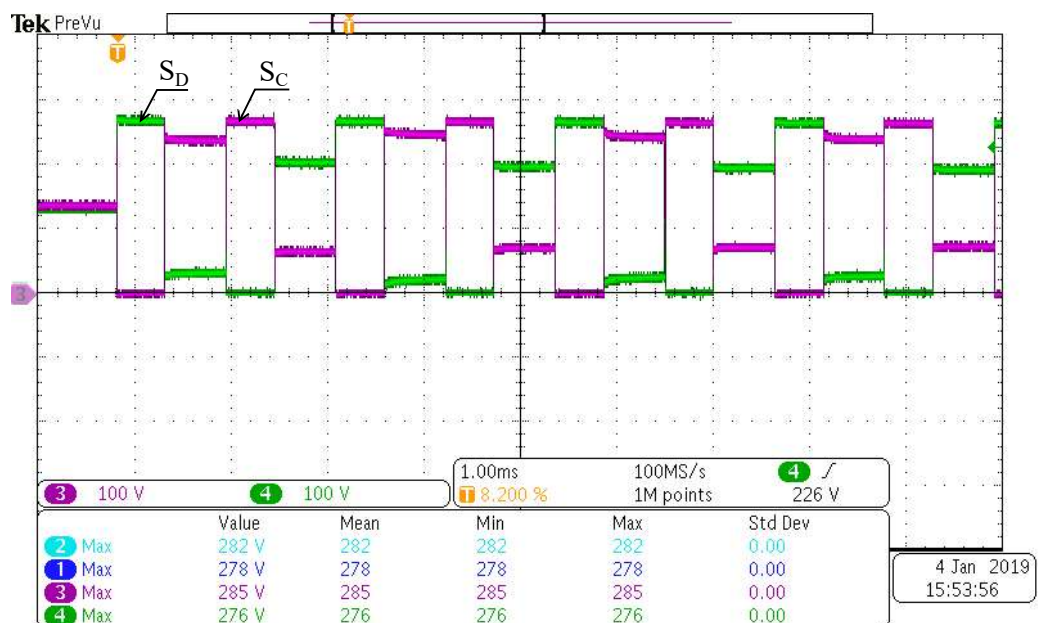
As tensões V_{DS} sobre os interruptores S_C e S_D de um mesmo braço foram monitoradas e são vistas na Figura 48. Essas chaves ficam sujeitas à tensão de alimentação quando não atuam e poderia se supor que dividissem de forma igualitária esse valor no período entre pulsos. Porém nota-se que isso não ocorre (o que já foi adiantado na Figura 35), mesmo se tratando de interruptores em braço e de mesmo modelo.

Isso pode se dever a alguns fatores, em especial incongruências construtivas dos componentes, o que alteraria suas capacitâncias internas (em especial a entre *drain* e *source*) e provocaria tensões diferentes no bloqueio em série e também por diferenças temporais dos comandos de ativação e abertura dos interruptores.

Figura 47 – Tempo de subida do primeiro pulso do protocolo



Fonte: Produção do autor.

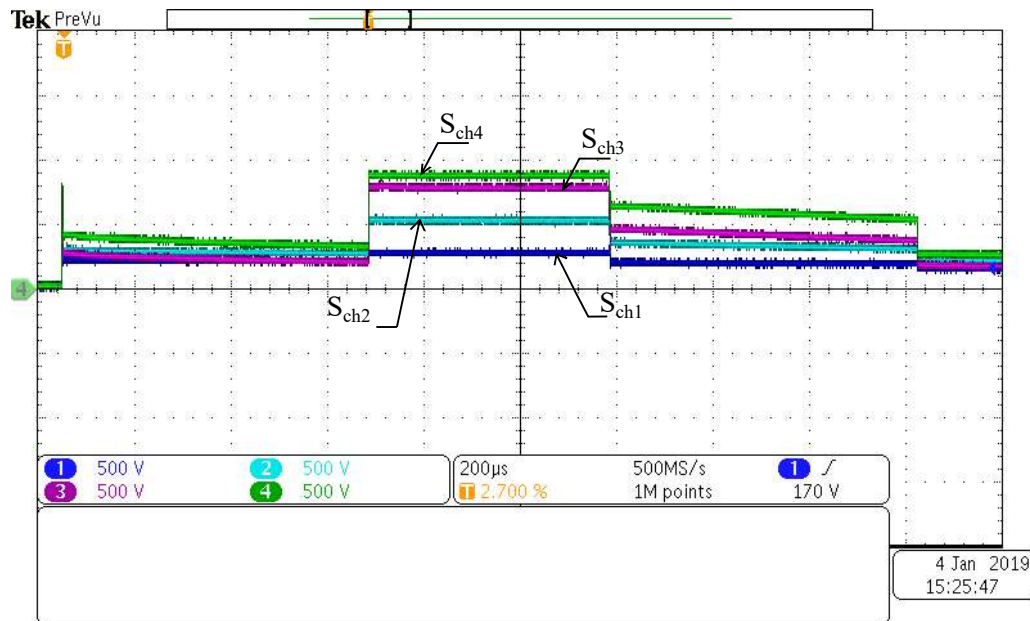
Figura 48 – Tensões V_{DS} dos interruptores de um braço das células

Fonte: Produção do autor.

Ressalta-se que essas diferenças podem ser corrigidas parcial ou totalmente com a utilização de circuitos auxiliares de descarga para esse fim (*snubbers*), mas essa característica não representa um problema na operação do gerador.

Os esforços de tensão sobre os interruptores de carga na etapa de pulsos foram monitorados e são apresentados na Figura 49.

Figura 49 – Detalhe da tensão sobre os interruptores de carga em um pulso negativo



Fonte: Produção do autor.

O comportamento é similar ao esperado, com os interruptores de maior índice sujeitos à maiores tensões, conforme visto na Figura 37. Nota-se apenas a presença de pequenas assimetrias entre os patamares de tensão.

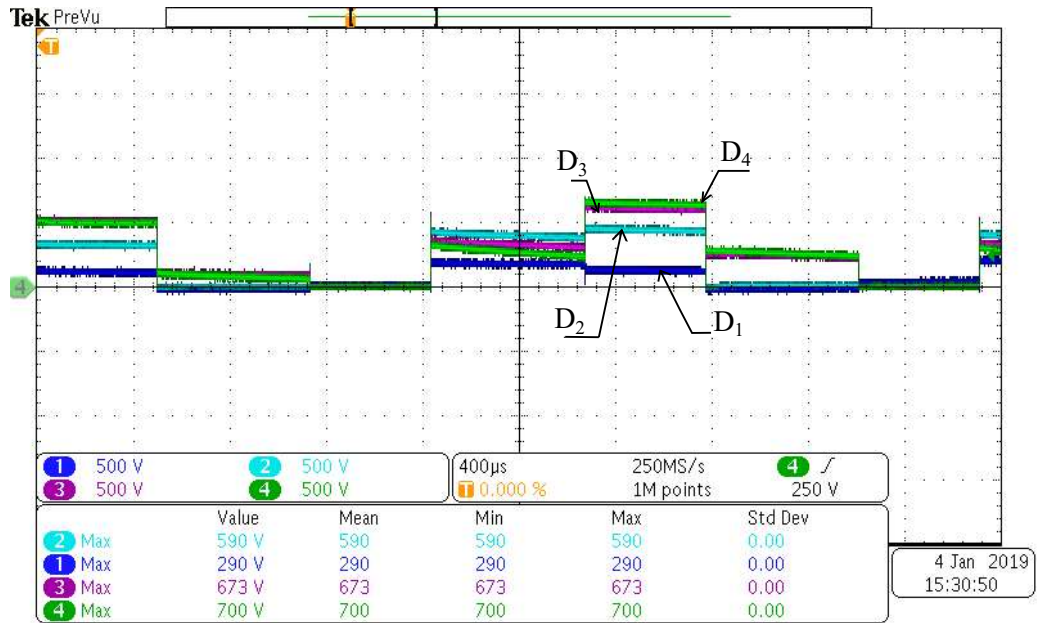
Além disso, nota-se que os valores de tensão não decrescem diretamente do nível máximo para zero. Isso se deve também à diferença das tensões sobre os interruptores de braço.

Esse valor intermediário é obtido da diferença entre tensão de entrada e o patamar variável devido à conexão em série dos interruptores.

Já as tensões sobre os diodos nessa mesma etapa são apresentadas na Figura 50.

As considerações acerca do comportamento das tensões dos diodos são similares às feitas dos interruptores de carga.

Figura 50 – Detalhe da tensão sobre os diodos em um pulso positivo



Fonte: Produção do autor.

5.5 PERDAS DOS COMPONENTES

As perdas dos principais elementos do protótipo são calculadas tomando como base os valores mais críticos de operação do mesmo.

Os dados construtivos dos componentes foram obtidos em seus *datasheets* e são informados nas tabelas nas seções anteriores. As intensidades das grandezas físicas são obtidas a partir dos cálculos realizados e para alguns casos, valores obtidos dos experimentos práticos.

5.5.1 Perdas dos interruptores das células

5.5.1.1 Perdas por condução nos pulsos

A potência média dissipada por condução dos interruptores das células no período de pulsos é calculada conforme a Equação 4.40 e verificada abaixo:

$$P_{condp} = I_{S_{rms}}^2 R_{DS} = 9,48^2 \cdot 0,1 = 8,98W \quad (5.6)$$

5.5.1.2 Perdas por condução na carga

As perdas registradas nos pelos interruptores inferiores das células no período de carga são verificadas abaixo, ressaltando que as correntes são distintas de acordo com a

posição dos mesmos no gerador.

$$P_{cond_{SB1}} = I_{S_{rms}}^2 R_{DS} = (4 \cdot 0,37)^2 \cdot 0,1 = 0,22W \quad (5.7)$$

$$P_{cond_{SD1}} = P_{cond_{SB2}} = (3 \cdot 0,37)^2 \cdot 0,1 = 0,12W \quad (5.8)$$

$$P_{cond_{SD2}} = P_{cond_{SB3}} = (2 \cdot 0,37)^2 \cdot 0,1 = 0,05W \quad (5.9)$$

$$P_{cond_{SD2}} = P_{cond_{SB4}} = 0,37^2 \cdot 0,1 = 0,01W \quad (5.10)$$

Logo, o total de perdas desses interruptores na fase de carga é 0,58 W.

5.5.1.3 Perdas por comutação

As perdas por comutação são consideradas apenas nos interruptores de células, já que são os únicos que comutam em alta frequência no sistema. É considerada a situação com maior taxa de chaveamento (8 kHz) e os tempos de subida e descida são consideradas de acordo com o resultado da medição apresentada na Figura 47: 800 ns. É aplicada a Equação 4.42:

$$P_{com} = \frac{V_{DS} I_D f_p (t_{on} + t_{off})}{4} = \frac{150 \cdot 15 \cdot 8000(800 \cdot 10^{-9} + 800 \cdot 10^{-9})}{4} = 7,20W \quad (5.11)$$

A potência total é então definida conforme a Equação 4.39:

$$P_{MOSFET} = P_{cond_P} + P_{com} = 8,98 + 7,20 = 16,18W \quad (5.12)$$

Considerando que oito interruptores atuam na fase de pulsos, as perdas totais nessa etapa chegam a 129,44 W.

5.5.2 Perdas dos interruptores de carga

As perdas por condução (únicas nos interruptores de carga) são calculadas de acordo com a Equação 4.44 e podem ser vistas a seguir. Analisando a curva fornecida no *datasheet* do IGBT, que relaciona a corrente de coletor, considera-se uma tensão de saturação de 1,5 V.

$$P_{cond_C} = V_{CESAT} I_C = 1,5 \cdot 0,37 = 0,55W \quad (5.13)$$

Se são quatro interruptores envolvidos, as perdas totais chegam a 2,2 W.

5.5.3 Perdas dos diodos

As perdas por condução dos diodos são calculadas conforme a Equação 4.45. Novamente, os dados construtivos dos mesmos são obtidos via *datasheet*. A queda de tensão V_{TO} e resistência interna dos mesmos r_T valem respectivamente 0,75 V e 0,76 Ω .

$$P_D = V_{TO}I_{D_{med}} + r_T I_{D_{ef}}^2 = 0,75 \cdot 0,20 + 0,76 \cdot 0,37^2 = 0,25W \quad (5.14)$$

Como são até quatro componentes em condução, as perdas podem chegar a 1 W nessa situação.

5.5.4 Perdas dos capacitores

Para cálculo das perdas nos capacitores do gerador, é utilizada a Equação 4.46. O *datasheet* do componente deve ser analisado, já que nele são fornecidas curvas normalizadas que relacionam a R_{SE} com frequência e temperatura de operação.

Considera-se temperatura máxima de 60 °C e frequência de 800 Hz. Com isso, a R_{SE} de cada capacitor vale 24 m Ω . Como os conjuntos de células são formadas por seis capacitores em paralelo, divide-se a corrente eficaz para analisar aquela que flui por cada componente, conforme Tabela 7.

$$P_{CAP} = R_{SE}I_{rms}^2 = 0,024 \cdot 1,58^2 = 0,06W \quad (5.15)$$

Sendo assim, as perdas em cada célula chegam a 0,36 W e o total a 1,44 W devido aos capacitores.

5.6 CÁLCULO TÉRMICO

Conhecendo os valores de potência dissipada nos interruptores, é possível realizar a análise térmica dos mesmos a fim de dimensionamento dos dissipadores. Para os interruptores de células, é considerado o período de pulsos, já que trata-se daquele que dissipa maior potência.

Adota-se 40 °C como temperatura ambiente (T_A) e resistência térmica entre cápsula e dissipador ($R_{th_{CD}}$) de 2,20 °C/W (PHILIPS, 1996), utilizando isolador de mica.

Além disso, são considerados os dados das tabelas de *datasheet* dos componentes.

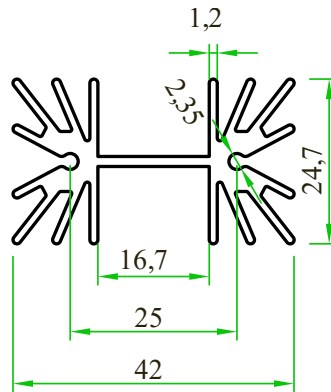
5.6.1 Interruptores de células

Aplicando a Equação 4.49, determina-se o valor de $R_{th_{DA}}$:

$$R_{th_{DA_{MOSFET}}} = \frac{150 - 40}{16,18} - 0,24 - 2,20 = 4,35^\circ C/W \quad (5.16)$$

Para essa situação, pode ser utilizado um dissipador modelo *HS 4225*, que tem resistência térmica $4,38^\circ C/W$, similar ao necessário e dimensões conforme a Figura 51.

Figura 51 – Dimensões em mm do dissipador HS 4225



Fonte: Adaptado de (HS, 2018).

Quanto à análise do transiente térmico causado pelos pulsos, primeiramente se determina a temperatura de cápsula, conforme a Equação 4.51:

$$T_C = (R_{th_{CD}} + R_{th_{DA}})P_{MOSFET} + T_A = (2,2 + 4,38) \cdot 16,18 + 40 = 146,46^\circ C \quad (5.17)$$

Em seguida é determinada a potência total dissipada nessa etapa, conforme as equações abaixo:

$$P_{P_{cond}} = I_{S_p}^2 R_{DS} = 15^2 \cdot 0,1 = 22,5W \quad (5.18)$$

$$P_{P_{MOSFET}} = P_{P_{cond}} + P_{com} = 22,5 + 7,2 = 29,7W \quad (5.19)$$

Por fim, determina-se a temperatura de junção no pulso, de acordo com a Equação 4.52. O valor da impedância térmica é obtido no gráfico do *datasheet* do componente e pode ser visto no Anexo A, conforme regime relatado no Capítulo 4.

$$T_{JP} = T_C + P_{P_{MOSFET}} Z_{th_{JC}} = 146,46 + 29,7 \cdot 0,035 = 147,49^\circ C \quad (5.20)$$

Esses resultados mostram que os valores de temperatura ficam bastante próximos aos máximos dos componentes. Por se tratar de um protótipo a aplicação e utilização é possível. Em aplicações comerciais, onde há necessidade de maior confiabilidade, seria indicada uma mudança de componentes.

5.6.2 Interruptores de carga

A temperatura de junção desses interruptores sem utilização de dissipadores é obtida conforme adaptação da Equação 4.47:

$$T_J = T_A + P_{cond_C} R_{th_{JA}} = 40 + 0,55 \cdot 40 = 62^\circ C \quad (5.21)$$

Como essa temperatura é inferior à máxima de junção, esses interruptores dispensam a utilização de dissipadores.

5.7 ENERGIA DOS CAPACITORES

A energia transferida da rede de distribuição aos capacitores é calculada conforme a Equação 4.55, considerando tensão de entrada nominal e todas as células carregadas:

$$E_c = 4 \cdot 300^2 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3} \cdot \left(-e^{\frac{-t}{4 \cdot 55 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}} \Big|_0^6 + \frac{e^{\frac{-2t}{4 \cdot 55 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}}}{2} \Big|_0^6 \right) = 732,56 J \quad (5.22)$$

Já a energia aplicada à carga, no protocolo com maior demanda é calculada a seguir, conforme a Equação 4.58:

$$E_o = 1200 \cdot 15 \cdot \left(\frac{-80 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3} \cdot e^{\frac{-2 \cdot 4 \cdot t}{80 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3}}}}{2 \cdot 4} \Big|_0^{20 \cdot 500 \cdot 10^{-6}} \right) = 159,64 J \quad (5.23)$$

Conforme mencionado no Capítulo 4, a energia carregada nos capacitores é muito mais elevada pois esses componentes devem manter uma tensão com pouca variação para fornecerem pulsos com características mais retangulares possíveis.

Ressalta-se que esse gerador só energiza os capacitores antes da aplicação dos protocolos, sem cargas "adicionais" nos períodos entre pulsos por exemplo.

5.8 TESTES EM UMA AMOSTRA VEGETAL

Testes laboratoriais foram realizados utilizando pedaços de batata (*Solanum tuberosum*) de dimensões aproximadas de 10 mm x 10 mm x 15 mm como carga, para verificar as respostas à diferentes parâmetros de pulsos.

(BERKENBROCK et al., 2017) e (BOUSSETTA et al., 2013) destacam que o tecido da batata pode ser utilizado ao invés de materiais animais para validar conceitos

da eletroporação. Enquanto aplicações de eletroquimioterapia podem levar semanas ou meses para terem seus resultados aptos a serem avaliados, os efeitos da eletroporação na batata começam a aparecer 6 horas após a aplicação (BERKENBROCK et al., 2017).

Agulhas em paralelo foram utilizadas como eletrodo do protótipo. Seus diâmetros são de $0,5\text{ mm}$, a distância entre elas é 2 mm , a profundidade que penetra na amostra é 1 cm . As figuras abaixo apresentam detalhes desse item.



Figura 52 – Eletrodo utilizado nos testes

As batatas foram refrigeradas antes da aplicação dos pulsos, e após, permaneceram 8 horas em temperatura ambiente. Foram realizados dez protocolos, para que se pudesse comparar os resultados para diferentes parâmetros. A Tabela 13 apresenta detalhadamente as configuração de cada um deles, ressaltando-se que o campo elétrico apresentado é referente à linha imaginária entre as agulhas. Nos outros pontos esse valor não é uniforme, devido à geometria do eletrodo.

Tabela 13 – Protocolos dos pulsos aplicados nas batatas

Protocolo	Tensão [V]	Quantidade	Largura [μs]	Frequência [Hz]	Campo elétrico [V/cm]
1	60	10	200	1100	300
2	100	10	200	1100	500
3	200	10	200	1100	1000
4	370	10	200	1100	1850
5	300	10	500	440	1500
6	300	10	50	4400	1500
7	300	10	200	200	1500
8	300	10	200	2000	1500
9	300	4	200	1100	1500
10	300	20	200	1100	1500

Fonte: Produção do autor.

Os quatro primeiros protocolos comparam diferentes valores de tensão, com os demais parâmetros sendo idênticos. Já a partir do quinto protocolo, eles são divididos em pares que comparam níveis altos e baixos de largura de pulso, frequência e quantidade.

As análises dos resultados dessas aplicações de pulsos são realizadas de forma visual com uso do programa *ImageJ* versão 1.52a, para levantamento do contraste das cores entre os locais que receberam ou não as descargas. Além disso, foram monitoradas tensão e corrente sobre a carga, coletadas com uso do osciloscópio.

A análise dos contrastes se deu através do sistema de cores RGB (*Red - Green - Blue*). Toda tonalidade é composta por um índice variável de 0 a 255 para cada uma das três cores básicas desse sistema. A mensuração do código da cor é obtida conforme a Equação 5.24:

$$RGB = (R \cdot 65536) + (G \cdot 256) + B \quad (5.24)$$

Sendo assim, o branco (sobreposição de todas as cores, em que todos os índices valem 255) corresponde a um valor 16777215, enquanto o preto vale 0.

5.8.1 Análise visual dos testes

Os resultados das aplicações dos quatro primeiros protocolos nas amostras vegetais são vistos nas figuras abaixo.

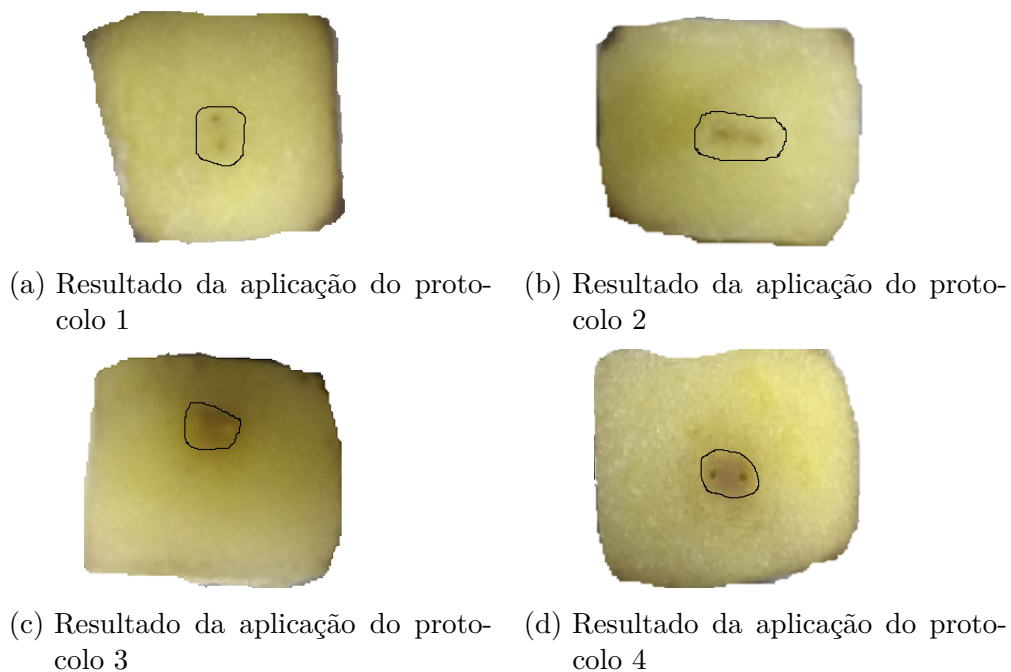


Figura 53 – Resultados das aplicações dos quatro primeiros protocolos

Nota-se que os dois primeiros protocolos não geraram alterações visuais na batata. Como são aqueles com menor intensidade de tensão, podem não ter atingido o campo elétrico limiar para se iniciar a eletroporação.

Já os protocolos 3 e 4, com maiores tensões, geraram alterações bastante evidentes nos pontos de implantação dos eletrodos, possivelmente devido à abertura de poros nas células da região.

No protocolo 3 a tonalidade da área não eletroporada é 9141810, enquanto na área que recebeu os pulsos é 7034139. Já no protocolo 4, as tonalidades são respectivamente 13155432 e 9401412. Dessa forma, percebe-se uma maior variação de cores do procedimento que emprega maior nível de tensão, comportamento esperado tendo em vista que os demais parâmetros são idênticos.

Os protocolos 5 e 6, que comparam extremos de largura de pulso, são vistos nas figuras a seguir.

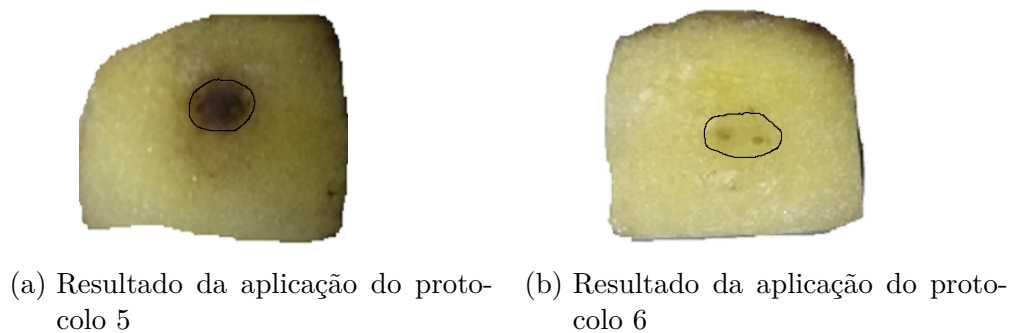


Figura 54 – Resultados das aplicações dos protocolos 5 e 6

Os resultados evidenciam uma diferença relevante entre um protocolo com largura de pulso elevada (5) em comparação com um de baixa (6). O primeiro procedimento registra tonalidade 7890995 na área não eletroporada e 2825230 na região que recebeu os pulsos, enquanto no segundo não houve alteração de cores relevante.

Os protocolos que comparam frequência baixa (7) e alta (8) têm seus resultados vistos abaixo.

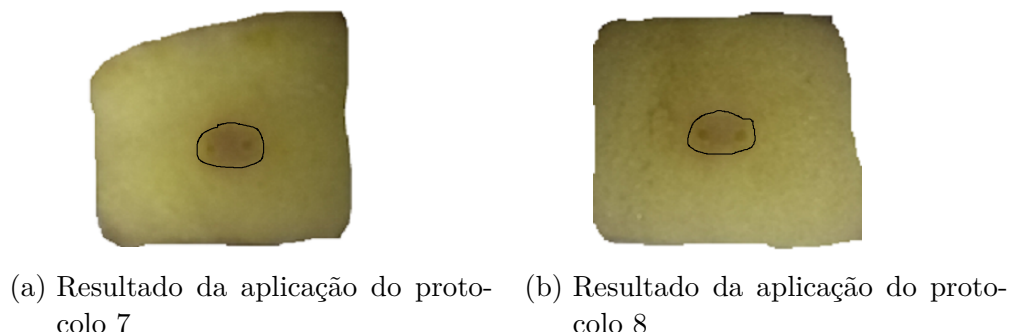


Figura 55 – Resultados das aplicações dos protocolos 7 e 8

Enquanto no protocolo 7 as cores registradas nas diferentes áreas são 9602885 e 7428395, no protocolo 8 valem 10326353 e 7758384. Nota-se que a diferença de tonalidades é similar nesses procedimentos.

Por fim, a relevância da quantidade de pulsos é testada nos protocolos 9 e 10. Vistos a seguir.

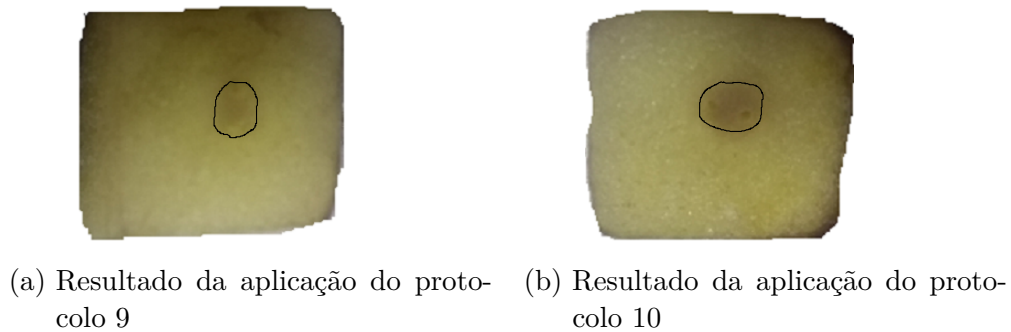


Figura 56 – Resultados das aplicações dos protocolos 9 e 10

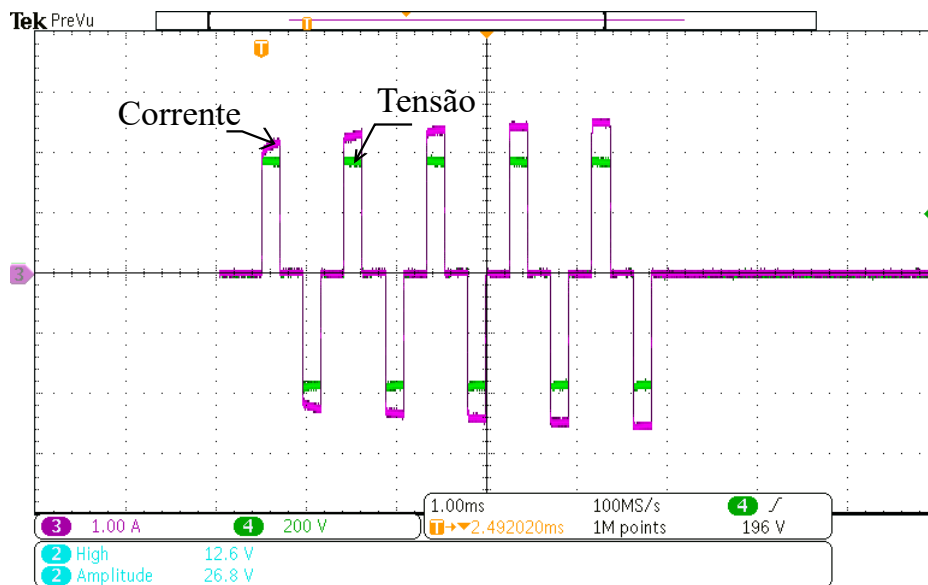
É possível notar que o protocolo com baixa quantidade de pulsos (9) gerou pouca modificação visual na amostra. Já aquele com quantidade elevada (10) produziu um efeito nitidamente mais relevante. Enquanto no primeiro a alteração de tonalidade foi de 10261587 para 8944189, no segundo houve variação de 10195543 para 7298098.

Em suma, pode-se dizer que os resultados visuais experimentais ficaram dentro do que se esperava, que uma transferência de energia maior produziria modificações mais perceptíveis nos tecidos.

5.8.2 Análise da tensão e corrente da carga

Além do comportamento visual das aplicações de pulso, as tensões e correntes sobre a carga foram monitoradas, para que se pudesse fazer outros apontamentos acerca da eletroporação. Um exemplo de aplicação é mostrado na Figura 57, que se refere ao protocolo 4.

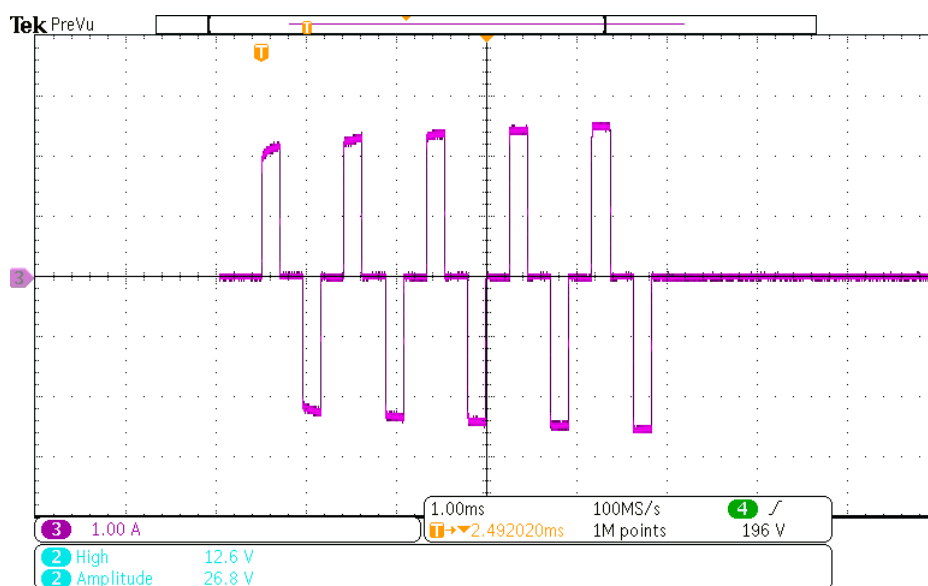
Figura 57 – Tensão e corrente sobre a carga no protocolo 4



Fonte: Produção do autor.

Analisando a corrente da carga de forma mais detalhada, é possível notar que o comportamento esperado, e mencionado nos capítulos anteriores, de corrente com característica crescente nos pulsos iniciais se comprova. A causa é o aumento da condutância do tecido de acordo com o passar dos pulsos. A Figura 58 mostra de maneira mais detalhada esse comportamento.

Figura 58 – Corrente sobre a carga no protocolo 4



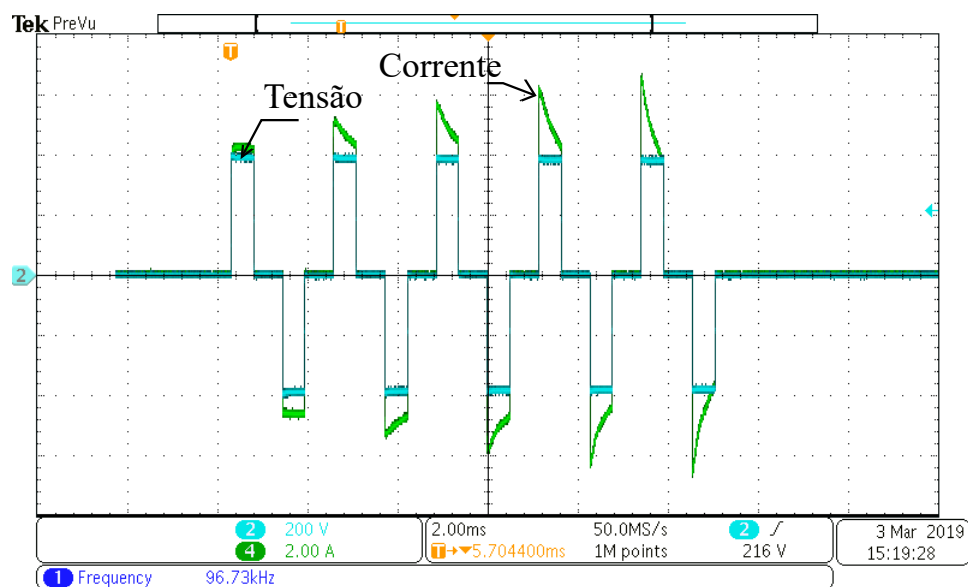
Fonte: Produção do autor.

Pode-se supor que o valor aplicado de tensão atingiu um nível suficiente para gerar

a eletroporação logo no primeiro pulso. Além disso, os poros não se fecharam de um para outro, pois o comportamento mais evidente de aumento da condutância apareceu apenas na primeira descarga de energia.

A fim de se verificar a possibilidade de causar a eletroporação irreversível no tecido, foi aplicado uma descarga com dez pulsos de 500 V, 500 μs e 440 Hz. Neste protocolo notou-se a passagem de uma corrente mais elevada que o normal, com comportamento destoante dos outros, gerando inclusive um ruído audível. Essa corrente pode ser vista na Figura 59, enquanto o resultado na amostra é apresentado na Figura 60.

Figura 59 – Corrente sobre a carga no protocolo com dez pulsos de 500 V, 500 μs e 440 Hz



Fonte: Produção do autor.

Figura 60 – Resultado prático da aplicação do protocolo com dez pulsos de 500 V, 500 μs e 440 Hz



Fonte: Produção do autor.

É possível propor que tenha ocorrido um processo de eletroporação irreversível, devido à elevada largura dos pulsos e ao nível de tensão.

Por fim, destaca-se que inspeções de queda de tensão e alteração nos valores da impedância das cargas foram realizadas e são relatadas nas subseções seguintes, para se verificar se os níveis de tensão esperados dos pulsos se mostraram na prática, e para compreender melhor os níveis de impedância das cargas utilizadas.

5.8.3 Queda de tensão real do gerador

Para verificar a queda de tensão dos capacitores nas etapas de aplicação de pulsos, as tensões do primeiro e último pulso de todos os protocolos foram monitoradas para que se pudesse levantar essa diferença, e compará-las com o cálculo teórico. O valor de impedância adotada é a média entre o valor inicial e o final, medida com relação às tensões e correntes iniciais e finais. A quantidade de células carregadas também é informada pois seus valores influenciam nessa análise. Sendo assim, os percentuais de queda de tensão podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14 – Quedas de tensões teóricas e reais do gerador

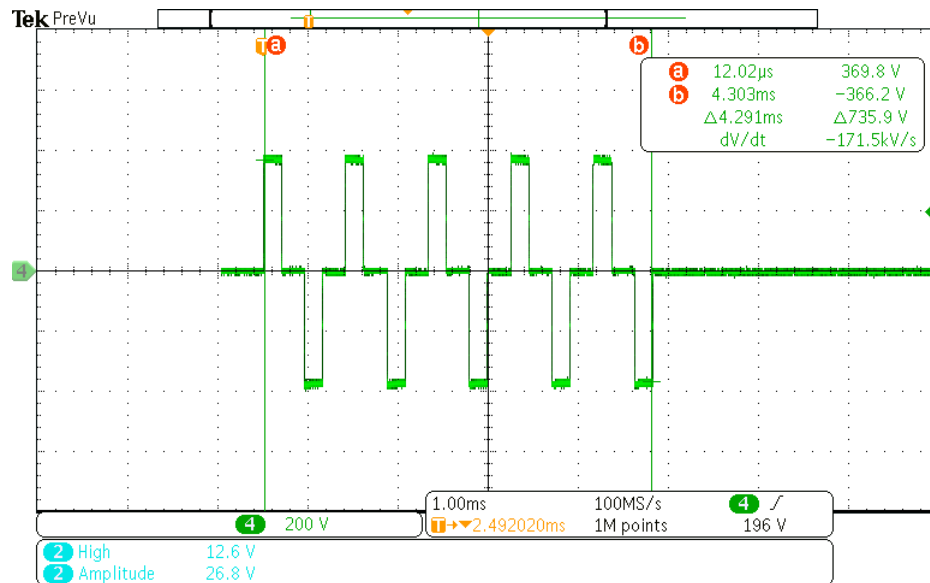
Protocolo	Tensão inicial [V]	Tensão final [V]	Queda de tensão real	Impedância média [Ω]	Células carregadas	Queda de tensão teórica
1	61,7	59,9	2,91 %	365,51	1	0,13 %
2	99,7	96,3	3,41 %	239,60	1	0,20 %
3	193,8	190,2	1,85 %	187,76	1	0,26 %
4	369,8	366,2	0,97 %	165,46	2	0,59 %
5	305,8	302,2	1,17 %	218,15	2	1,11 %
6	301,8	298,2	1,19 %	212,89	2	0,11 %
7	305,8	302,2	1,17 %	145,78	2	0,67 %
8	305,8	302,2	1,17 %	116,99	2	0,83 %
9	305,8	302,2	1,17 %	133,70	2	0,29 %
10	305,8	302,2	1,17 %	178,07	2	1,09 %

Fonte: Produção do autor.

Percebe-se uma diferença notável da queda de tensão em alguns dos protocolos, entre os valores calculados e o obtido na prática. Isso se deve principalmente às não idealidades do sistema, considerando as já citadas perdas nos semicondutores, capacitores e transformadores, mas também às dispersões nas trilhas, cabos e eletrodos. Na consideração teórica todos esses valores são desconsiderados.

Além disso, as medições foram realizadas com auxílio da ferramenta de cursores do osciloscópio, que podem apresentar certa variação relevante entre dois pontos próximos de amostragem. A Figura 61 mostra a forma de coleta desses dados, em que se exemplifica com o protocolo 4.

Figura 61 – Queda de tensão de pulsos do protocolo 4



Fonte: Produção do autor.

5.8.4 Variação da impedância da carga

Outra característica bastante notável na verificação da corrente de carga, e que entra em concordância com aquilo proposto por (WEINERT, 2017), é que a impedância da carga vai tendendo sempre a diminuir com o passar dos pulsos. Segundo o autor, isso se deve pois após cada descarga de energia, mais poros vão se formando e a condutância da membrana vai aumentando.

Três dados de impedância por protocolo foram coletados, referentes à região entre as agulhas: no início do primeiro pulso (Z_0), ao final deste (Z_1) e no fim do protocolo em si (Z_2). Os valores constam na Tabela 15, que também mostra a taxa de variação entre essas três ocorrências.

Tabela 15 – Variação das impedâncias de carga

Protocolo	Impedância inicial (Z_0) [Ω]	Impedância ao final do primeiro pulso (Z_1) [Ω]	Impedância final (Z_2) [Ω]	$(Z_0-Z_1)/Z_0$	$(Z_1-Z_2)/Z_1$
1	434,50	354,59	296,53	18,39 %	16,37 %
2	262,36	241,99	216,89	7,76 %	10,37 %
3	212,96	184,57	162,56	13,33 %	11,92 %
4	186,76	172,80	144,17	7,47 %	16,56 %
5	248,61	229,92	187,70	7,51 %	18,36 %
6	232,15	212,53	193,63	8,45 %	8,89 %
7	158,44	147,72	133,12	6,76 %	9,88 %
8	137,74	114,96	96,24	16,53 %	16,28 %
9	148,44	128,48	118,97	13,44 %	7,40 %
10	209,45	179,88	146,69	14,11 %	18,45 %

Fonte: Produção do autor.

Inicialmente nota-se que a impedância tende a possuir um maior acréscimo dentro do primeiro pulso, se comparado com o protocolo em si. Dessa forma, pode-se supor que para a amostra biológica utilizada, um pulso já foi suficiente para causar a eletropermeabilização de uma boa parte das membranas que a compõe.

Além disso, percebe-se que nos dois primeiros protocolos as impedâncias registradas são bastante superiores às demais. Isso pode ter ocorrido pois os valores de tensão aplicada foram inferiores ao limiar de eletropermeabilização, dessa forma não aumentando a condutância da amostra. A análise visual apresentada na Figura 53 deu indícios de que isso poderia ter acontecido.

5.9 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O primeiro apontamento realizado das medições é que o protótipo demonstrou correto funcionamento para aquilo que foi proposto. A interface entre equipamento e usuário ocorreu de maneira adequada, os pulsos foram gerados conforme esperado e o dimensionamento e seleção dos componentes também se mostraram dentro do esperado.

A análise da eficiência de eletroporação não pôde ser realizada com maiores detalhes, além das feitas por inspeção visual e acompanhamento da corrente de saída, em especial por falta de acesso a materiais específicos para esses fins. Conforme mencionado no Capítulo 2, tinturas fluorescentes precisariam ser empregadas para verificação da quantidade de moléculas redistribuídas em processos de eletroporação. Além disso, destaca-se que o tecido biológico utilizado como carga foi adotado por facilidade de acesso e apresentar um comportamento similar a uma amostra animal viva, que receberia os pulsos em um processo de eletroquimioterapia.

Por fim destaca-se que só havia um eletrodo, com configuração de agulhas em paralelo, à disposição para os testes práticos. Se houvesse disponibilidade de outras formas e geometrias, seria possível realizar análises distintas, em especial destacando as diferenças que essas configurações causariam na carga.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido a fim de se aprimorar os conhecimentos a respeito da eletroporação e tipos de circuitos elétricos geradores de pulsos de tensão, desenvolver um protótipo configurável com esse fim, apresentando as considerações para seu projeto e demonstrar os resultados experimentais realizados em laboratório.

Primeiramente foram detalhadas as causas físicas por trás dos procedimentos de eletroporação, que vêm ganhando vasta aplicação especialmente nas áreas médica, biológica e estética. Em seguida foram apresentados os principais parâmetros relevantes desses procedimentos, de acordo com o tipo de uso.

Foi proposto o desenvolvimento de um circuito Gerador de Marx modular e portátil, com apresentação de projeto de dimensionamento, etapas de operação e esforços elétricos.

Através de quatro células capacitivas que empregam seis capacitores eletrolíticos de $680\ \mu F$ cada, carregados em paralelo e descarregados em série esse sistema se mostrou capaz de quadruplicar uma tensão CC constante de $300\ V$, sem uso de transformador elevador, e manter a queda de tensão de pulsos em valores inferiores a $10\ \%$, para as amostras testadas. Assegurando o comportamento retangular desses sinais.

A associação de capacitores se mostrou plenamente aplicável ao sistema gerador de pulsos. Mas também vem ganhando força em aplicações como conversores CC-CC, na figura dos *Switched Capacitors Converters*. Com capacidade elevadora ou abaixadora, dependendo da topologia do circuito, podem apresentar altos índices de eficiência e densidade de energia comparados a outras topologias.

O uso do microcontrolador como componente central do comando permitiu uma ampla possibilidade de seleção de valores para os principais parâmetros dos pulsos (largura, quantidade e frequência) e também trouxe segurança à aplicação, especialmente devido à configuração de interruptores em braço do gerador.

A aplicação de MOSFETs e IGBTs como interruptores se mostrou adequada e eficiente, por possuírem vastas faixas de operação, atuando com níveis de tensão e corrente elevados e apresentando a robustez necessária para suportarem os esforços de operação do gerador. A topologia utilizada também permitiu o uso redundante de vários sinais de acionamento do microcontrolador.

Entretanto por características da topologia adotada, foi necessária a implementação de fontes isoladas, para que se pudesse acionar de maneira adequada e segura os interruptores. Os custos e dimensões do sistema sofreram relevante acréscimo já que cada circuito demandou transformador isolador, ponte retificadora, diodo zener e optoacoplador com *driver*.

Os limites de operação do gerador permitiram a utilização de interruptores em

encapsulamentos discretos, sem necessidade de arranjá-los em série ou empregar módulos de maior porte e valor financeiro. A tensão sobre os semicondutores foi o grande gargalo de seus dimensionamentos, tendo em vista que as correntes de operação do gerador ficaram bem abaixo dos limites desses componentes.

Outra característica positiva dos GM é o fato de desacoplarem a rede de distribuição dos pulsos de saída. Isso ocorre tendo em vista que inicialmente é realizada a energização dos capacitores e em seguida estes a descarregam na carga a ser eletroporada. Ressalta-se que o procedimento de carga dos capacitores demanda correntes consideradas baixas, com comportamento visto na simulação da Figura 34, o que representa também baixa perturbação ao sistema de alimentação. Já no período de pulsos a potência é proveniente exclusivamente dos capacitores. Para efeitos de comparação a máxima potência média demandada no período de carga é aproximadamente 240 W , já um pulso pode ter potência de até 18 kW .

Outra dificuldade na montagem do protótipo foi a restrição de acesso aos componentes e serviços mais adequados. As placas de circuito impresso disponíveis não tinham as dimensões que otimizariam o *layout* e preenchimento com os materiais. Além disso, por questões de prazo e disponibilidade financeira, as placas foram produzidas de forma manual em laboratório, sem possibilidade de confecção com fabricante especializado.

Tendo em vista que o sistema opera com duas etapas bastante distintas, carga dos capacitores e aplicação de pulsos, e ambas ocorrem de forma intermitente, pontual e não contínua, é difícil mensurar o rendimento global desse sistema. Sendo assim foram calculadas apenas as perdas dos componentes de acordo com etapa de operação. Além disso foi analisada a transferência de energia da rede de distribuição aos capacitores e em seguida destes à carga através dos pulsos.

Uma deficiência na análise experimental foi a falta de uma amostra que simule de forma mais correta (ou que seja propriamente) um tecido real a ser eletroporado. O comportamento da impedância teve que ser aproximado através de testes com um vegetal simulando essa carga. Além disso a indisponibilidade de indicadores que evidenciassem melhor a eficiência de cada parâmetro de eletroporação, e de eletrodos com diferentes geometrias e dimensões, também prejudicaram uma análise mais aprofundada dos resultados.

A utilização de um resistor na entrada do circuito foi adotada por ser a medida mais simples para limitação das correntes de carga dos capacitores. Entretanto, tal opção gera relevantes desperdícios de energia no sistema. Uma solução para diminuição dessas perdas seria a utilização de indutores para cargas suavizadas sem tanta dissipação de potência.

Ainda sobre as diversas perdas registradas no sistema, notou-se um valor bastante superior da queda de tensão real dos pulsos em comparação ao ideal, obtido pela descarga

natural dos capacitores. Além da contribuição dos componentes nesse fato, modificações construtivas e de montagem das placas poderiam diminuir essas imperfeições. Seja otimizando o tamanhos das próprias placas, modificando o posicionamento de certas peças no sistema ou diminuindo a quantidade de condutores de interligação dos componentes.

Com base nessas observações, pode-se apontar as seguintes sugestões a serem investigadas e efetuadas em trabalhos futuros:

- Realizar testes e análises práticas com diferentes parâmetros de pulsos em uma amostra animal real, com detalhamento mais aprofundado da eficiência da eletroporação através do uso de indicadores;
- Verificar os tipos de circuitos e topologias aplicados nos eletroporadores comerciais;
- Implementar um sistema de carga dos capacitores suave e com menor dissipação de energia;
- Otimizar o circuito oscilador de alimentação das fontes isoladas;
- Propor reduções nas dimensões e quantidades de componentes para o sistema gerador e diminuir suas perdas e quedas de tensão de pulso;
- Utilizar eletrodos de diferentes dimensões e geometrias para comparação com os resultados obtidos com o de agulhas em paralelo.

REFERÊNCIAS

- ABDELSALAM, I. et al. Full-bridge modular multilevel submodule-based high-voltage bipolar pulse generator with low-voltage dc, input for pulsed electric field applications. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, v. 45, n. 10, p. 2857–2864, 2017. Citado na página 44.
- ALBERTS, B. *Molecular biology of the cell*. [S.l.]: Garland Publishing Inc, 2002. Citado na página 35.
- ANGELIS, A. de et al. Kilovolt blumlein pulse generator with variable pulse duration and polarity. *Review of Scientific Instruments*, AIP, v. 79, n. 4, p. 044301, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- ARENA, C. B. et al. High-frequency irreversible electroporation (h-fire) for non-thermal ablation without muscle contraction. *BioMedical Engineering OnLine*, 2011. Citado na página 41.
- AVAGO. *HCPL-3120 2.5 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler*. [S.l.], 2016. Citado na página 162.
- BAKER, R. H.; BANNISTER, L. H. *Electric power converter*. [S.l.]: Google Patents, 1975. US Patent 3,867,643. Citado na página 44.
- BERKENBROCK, J. et al. In vitro simulation of electroporation using potato model. *Conference of The Canadian Medical and Biological Engineering*, n. 40, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 109 e 110.
- BONDADE, R.; WANG, Y.; MA, D. Design of integrated bipolar symmetric output dc–dc power converter for digital pulse generators in ultrasound medical imaging systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 29, n. 4, p. 1821–1829, 2014. Citado na página 46.
- BOUSSETTA, N. et al. Cold electroporation in potato tissue induced by pulsed electric field. *Journal of food engineering*, Elsevier, v. 115, n. 2, p. 232–236, 2013. Citado na página 109.
- BULLMANN, T. et al. A transportable, inexpensive electroporator for in utero electroporation. *Japanese Society of Developmental Biologists*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- CANACSINH, H.; REDONDO, L. M.; SILVA, J. F. Marx-type solid-state bipolar modulator topologies: performance comparison. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, v. 40, n. 10, p. 2603–2610, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 13, 49 e 51.
- CHEN, J. et al. Influence of pulsed electric field and thermal treatments on the quality of blueberry juice. *International Journal of Food Properties*, v. 17, 2014. Citado na página 38.
- CHOI, J. S.; KANG, F. S. Seven-level pwm inverter employing series-connected capacitors paralleled to a single dc voltage source. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, v. 62, n. 6, p. 3448–3459, 2015. Citado na página 45.

DELSHAD, M. R.; REZANEJAD, M.; SHEIKHOLESAMI, A. A new modular bipolar high voltage pulse generator. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, v. 64, n. 2, p. 1195–1203, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 13, 49 e 50.

ELGENEDY, M. A. et al. A transition arm modular multilevel universal pulse-waveform generator for electroporation applications. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, v. 32, n. 12, p. 8979–8991, 2017. Citado na página 41.

ELSEROUGI, A.; MASSOUD, A. M.; AHMED, S. A boost-inverter-based bipolar high-voltage pulse generator. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, v. 32, n. 4, p. 2846–2855, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

ELSEROUGI, A. A. et al. A transformerless bipolar/unipolar high-voltage pulse generator with low-voltage components for water treatment applications. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, v. 53, n. 3, p. 2307 – 2319, 2017. Citado na página 38.

ELSEROUGI, A. A.; MASSOUD, A. M.; AHMED, S. A unipolar/bipolar high-voltage pulse generator based on positive and negative buck–boost dc–dc converters operating in discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 64, n. 7, p. 5368–5379, 2017. Citado na página 46.

FILHO, R. F. P. *Estudo e implementação de uma fonte de tensão alternada de 220v/1kw alimentada por fontes cc de 24v*. Dissertação (Mestrado) — UFSC, 2005. Citado na página 152.

GEHL, J. Electroporation: theory and methods, perspectives for drug delivery, gene therapy and research. *Acta Physiologica Scandinavica*, Wiley Online Library, v. 177, n. 4, p. 437–447, 2003. Citado na página 37.

GRAINYS, A.; NOVICKIJ, V.; NOVICKIJ, J. High-power bipolar multilevel pulsed electroporator. *INSTRUMENTATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2016. Citado na página 41.

HS, D. *Catálogo de dissipadores de calor HS*. [S.l.], 2018. Citado na página 108.

ILIC, M. et al. An isolated high-voltage dc-to-dc converter with fast turn-off capability for x-ray tube gridding. *IEEE transactions on industry applications*, IEEE, v. 38, n. 4, p. 1139–1146, 2002. Citado na página 46.

INCORPORATED, D. *FR301 - 307*. [S.l.], 2012. Citado na página 96.

INSTRUMENTS, T. *SNx4HC14 Hex Schmitt-Trigger Inverters*. [S.l.], 2016. Citado na página 162.

KOTNIK, T. et al. Cell membrane electroporation-part 1: the phenomenon. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 28, p. 14–23, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

LAI, J. S.; PENG, F. Z. Multilevel converters-a new breed of power converters. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, v. 3, p. 2348–2356, 1995. Citado na página 44.

- LEI, Y.; PILAWA-PODGURSKI, R. C. N. A general method for analyzing resonant and soft-charging operation of switched-capacitor converters. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, v. 30, n. 10, p. 5650–5664, 2015. Citado na página 58.
- LIRIO, L. E. A. *Contribuições para análise de perdas em conversores de potência com mosfet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Citado na página 82.
- MAMMAN, H. B. et al. Study of electroporation effect on ht29 cell migration properties. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 2015. Citado na página 38.
- MENDES, J. P. M. et al. Modelling of n-stage blumlein stacked lines for bipolar pulse generation. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, p. 395–402, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- NABAE, A.; TAKAHASHI, I.; AKAGI, H. A new neutral point clamped pwm inverter. *IEEE Transactions on industry applications*, IEEE, n. 5, p. 518–523, 1981. Citado na página 44.
- NAPOTNIK, T. B.; MIKLAVIC, D. In vitro electroporation detection methods—an overview. *Bioelectrochemistry*, Elsevier, v. 120, p. 166–182, 2018. Citado na página 37.
- NEUMANN, E. et al. Gene transfer into mouse lyoma cells by electroporation in high electric fields. *The EMBO journal*, Wiley Online Library, v. 1, n. 7, p. 841–845, 1982. Citado na página 37.
- NOVICKIJ, V. et al. High-frequency submicrosecond electroporator. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2016. Citado na página 40.
- OLIVEIRA, S. V. G. *Otimização de projetos de fontes de alimentação para centrais de telecomunicações*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. Citado na página 156.
- PETKOVSEK, M. et al. High voltage pulse generation. *Electronics Letters*, v. 38, n. 14, p. 1–2, 2002. Citado na página 47.
- PHILIPS. *Mounting instructions*. [S.l.], 1996. Citado na página 107.
- RAMOS, A.; SUZUKI, D. O. H.; MARQUES, J. L. B. Numerical study of the electrical conductivity and polarization in a suspension of spherical cells. *Bioelectrochemistry*, v. 68, p. 213–217, 2006. Citado na página 37.
- RECTIFIER, I. *IRG4PH40UD*. [S.l.], 2006. Citado na página 95.
- RECTIFIER, I. *IRGP50B60PD*. [S.l.], 2006. Citado na página 96.
- RECTIFIER, I. *IR442x Dual Low Side Driver*. [S.l.], 2008. Citado na página 162.
- REDONDO, L. M.; CANACSIH, H.; SILVA, J. F. Generalized solid-state marx modulator topology. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 16, n. 4, p. 1037–1042, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 13, 49 e 50.

- REZANEJAD, M.; SHEIKHOLESAMI, A.; ADABI, J. High-voltage modular switched capacitor pulsed power generator. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, v. 42, n. 5, p. 1373–1379, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 13, 48 e 49.
- ROMEO, S. et al. A blumlein-type, nanosecond pulse generator with interchangeable transmission lines for bioelectrical applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 1224–1230, 2013. Citado na página 43.
- SAKAMOTO, T. et al. A repetitive solid state marx-type pulsed power generator using multistage switch-capacitor cells. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, v. 40, n. 10, p. 2316–2321, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 13, 52, 53, 57 e 88.
- SAMADAEI, E. et al. An envelope type (e-type) module: asymmetric multilevel inverters with reduced components. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, v. 63, n. 11, p. 7148–7156, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- SAMADAEI, E. et al. A square t-type (st-type) module for asymmetrical multilevel inverters. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, v. 33, n. 2, p. 987–996, 2018. Citado na página 44.
- SANO, M. B. et al. In-vitro bipolar nano- and microsecond electro-pulse bursts for irreversible electroporation therapies. *Bioelectrochemistry*, v. 100, p. 69–79, 2014. Citado na página 41.
- SHI, H. et al. High-voltage pulse waveform modulator based on solid-state marx generator. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 22, n. 4, p. 1983–1990, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 13, 35, 37, 51 e 52.
- SHI, J. et al. A review on electroporation-based intracellular delivery. *Molecules*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 23, n. 11, p. 3044, 2018. Citado na página 35.
- SILVA, M. D. da. *Desenvolvimento e avaliação de um gerador programável de pulsos monofásicos de campo elétrico para eletroporação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 29, 30, 35 e 58.
- SOARES, M. V. *Projeto de conversor c.a.-c.c. isolado para eletroporação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Do Estado De Santa Catarina, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 61.
- TECHNOLOGY, A. P. *MOSFET N-Channel APT5010B2VR*. [S.l.], 2008. Citado 2 vezes nas páginas 94 e 161.
- TERZI. *TRZ E-20 06 terminais*. [S.l.], 2018. Citado na página 153.
- THORNTON. *Catálogo de ferrite*. [S.l.], 2015. Citado na página 153.
- TSONG, T. Y. Electroporation of cell membranes. *Biophysical journal*, Elsevier, v. 60, n. 2, p. 297–306, 1991. Citado na página 37.
- VENKATARAMANAIAH, J.; SURESH, Y.; PANDA, A. K. A review on symmetric, asymmetric, hybrid and single dc sources based multilevel inverter topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 76, p. 788–812, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.

WANG, M. Y. et al. Electrical method to measure the transient thermal impedance of insulated gate bipolar transistor module. *IET Power Electronics*, v. 8, n. 6, p. 1009–1016, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 85 e 86.

WEINERT, R. L. *Estudo experimental e computacional de eletropermeabilização de tecidos biológicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 35, 37, 60 e 117.

WU, J. et al. A novel compact repetitive frequency square-wave generator based on coaxial pulse forming lines and coupled magnetic switches. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, v. 42, n. 6, p. 1714–1720, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

YAO, C. et al. A novel configuration of modular bipolar pulse generator topology based on marx generator with double power charging. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, v. 44, n. 10, p. 1872–1878, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 13, 50 e 51.

ZABIHI, S.; ZABIHI, Z.; ZARE, F. A solid state marx generator with a novel configuration. *19th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 13, 47 e 48.

Apêndices

.1 APÊNDICE A - CÓDIGO IMPLEMENTADO NO MICROCONTRO- LADOR

```

#include "config.h"
#include "delay_pic18.h"
#include "LCD4b.h"
#include <xc.h>
#include <stdio.h>
#include <pic18f4550.h>

// Pinos de entrada e saída -----
#define Scarga_1 PORTDbits.RD0 // Define o Pino de saída Scarga_1
#define Scarga_2 PORTDbits.RD1 // Define o Pino de saída Scarga_3
#define Scarga_3 PORTDbits.RD2 // Define o Pino de saída Scarga_3
#define Scarga_4 PORTDbits.RD3 // Define o Pino de saída Scarga_4

#define Sa PORTAbits.RA4 // Define o Pino de pulsons do capacitor Sa
#define Sb PORTAbits.RA5 // Define o Pino de pulsons do capacitor Sb
#define Sc PORTCbits.RC6 // Define o Pino de pulsons do capacitor Sc
#define Sd PORTCbits.RC7 // Define o Pino de pulsons do capacitor Sd

#define Sdescarga_1 PORTDbits.RD4 // Define o Pino de saída SDescarga_1
#define Sdescarga_2 PORTDbits.RD5 // Define o Pino de saída SDescarga_2
#define Sdescarga_3 PORTDbits.RD6 // Define o Pino de saída SDescarga_3
#define Sdescarga_4 PORTDbits.RD7 // Define o Pino de saída SDescarga_4
// -----

// Variáveis de controle da maquina de estado -----
#define EstadoConfigurandoCAP 0
#define EstadoConfigurandoPulso 1
#define EstadoConfigurandoLarguraPulso 2
#define EstadoConfigurandoFreqPulson 3
#define EstadoExecutandoAplicacao 4
#define EstadoReperirSN 5
unsigned int estado = 0;
// -----

// Inicializando as variávris ligadas a cada botão com o valor "0"
unsigned int botaoAPU = 0;
unsigned int botaoBPU = 0;
unsigned int botaoCPD = 0;
unsigned int botaoDPD = 0;
// -----

// Variáveis para definição do tempo de carga e de descarga -----
int TempoCarga = 7000;
int TempoDescarga = 12000;
// -----

// Vetor de configuração / recebe os valores quando finaliza cada estado -----
unsigned int configuracao[4] = {0, 0, 0, 0}; //{ Cap, pulsos, larg pulso, freq}
// -----

// Vetor com as opção de largura dos pulsos -----

```

```

unsigned int opcoespulso[6] = {50, 100, 200, 300, 400, 500};
// -----

// Matriz com os valores das frequências pot pulsos -----
unsigned int opcoesfreq[6][5] = {
    {800, 2600, 4400, 6200, 8000},
    {400, 1300, 2200, 3100, 4000},
    {200, 650, 1100, 1550, 2000},
    {133, 433, 733, 1033, 1333},
    {100, 325, 550, 775, 1000},
    { 80, 260, 440, 620, 801}
}; // [linhas][colunas]
// -----

// Variáveis para controle dos índice dos vetores -----
unsigned int indice_conf = 0;
unsigned int ind_freq_linha = 0;
unsigned int ind_freq_colu = 0;
// -----

// Variáveis de controle -----
unsigned int ConfirmaCAP = 0;
unsigned int ConfirmaPulso = 0;
unsigned int ConfirmaLarguraPulso = 0;
unsigned int ConfirmaFreqPulso = 0;
unsigned int ConfirmaExecuta = 0;
unsigned int ConfirmaRepetirSN = 0;

unsigned int ContaConfigCAP = 1;
unsigned int ContaConfigPulso = 2;
unsigned int ContaConfigLarguraPulso = 0;
unsigned int ContaConfigFreqPulso = 0;
unsigned int ContaRepetirSN = 0;

// -----

// Protótipos das funções -----
void ExecutandoCarga();
void ExecutandoPulsos();
void ExecutandoDescarga();
void ZeraSistema();
// -----

void main() {

    ADCON1 = 0x0F;
    UCONbits.USBEN = 0; // Para poder usar RC4 e RC5 como I/O
    UCFGbits.UTRDIS = 0;
    SPEN = 0; // Habilita porta serial
    TRISD = 0;

```

```

TRISAbits.TRISA4 = 0;
TRISAbits.TRISA5 = 0;
TRISC7 = 0;
TRISC6 = 0;

//Config Pinos botões
TRISEbits.TRISE0 = 1;
TRISEbits.TRISE1 = 1;
TRISCbits.TRISC0 = 1;
TRISCbits.TRISC1 = 1;

Scarga_1 = 0;
Scarga_2 = 0;
Scarga_3 = 0;
Scarga_4 = 0;
Sa = 0;
Sb = 0;
Sc = 0;
Sd = 0;
Sdescarga_1 = 0;
Sdescarga_2 = 0;
Sdescarga_3 = 0;
Sdescarga_4 = 0;

//Inicializa LCD
lcd_ini();
lcd_limpa();

while (1) {

    //Botão A - Troca de opções
    botaoAPU = PORTEbits.RE0;
    if (botaoAPU == 0) {
        __delay_ms(5); // Introduce a delay between each read
        do {
            botaoAPU = PORTEbits.RE0; // Read the pin
            __delay_us(1); // Introduce a delay between each read
        } while (botaoAPU == 0); // keep reading till a HIGH
        lcd_limpa();

        switch (estado) {
            case EstadoConfigurandoCAP:
            {
                if (ContaConfigCAP >= 4) ContaConfigCAP = 1;
                else ContaConfigCAP++;
            }
            break;
            case EstadoConfigurandoPulso:
            {
                if (ContaConfigPulso >= 20) ContaConfigPulso = 2;
                else ContaConfigPulso++;
            }
        }
    }
}

```

```

        break;
    case EstadoConfigurandoLarguraPulso:
    {
        if (ContaConfigLarguraPulso > 4) ContaConfigLarguraPulso = 0;
        else ContaConfigLarguraPulso++;
    }
        break;
    case EstadoConfigurandoFreqPulso:
    {
        if (ContaConfigFreqPulso > 3) ContaConfigFreqPulso = 0;
        else ContaConfigFreqPulso++;
    }
        break;
    case EstadoRepetirSN:
    {
        lcd_limpa();
        if (ContaRepetirSN == 0) ContaRepetirSN = 1;
        else ContaRepetirSN = 0;
    }
        break;
    }
}

//Botão B Voltar para nova configuração
botaoBPU = PORTEbits.RE1;
if (botaoBPU == 0) {
    __delay_ms(5); // Introduce a delay between each read
    do {
        botaoBPU = PORTEbits.RE1; // Read the pin
        __delay_us(1); // Introduce a delay between each read
    } while (botaoBPU == 0); // keep reading till a HIGH
    estado = EstadoConfigurandoCAP;
    lcd_limpa();
}

// Botão C Emergência
botaoCPD = PORTCbits.RC1;
if (botaoCPD == 1) {
    __delay_ms(5); // Introduce a delay between each read
    do {
        botaoCPD = PORTCbits.RC1; // Read the pin
        __delay_us(1); // Introduce a delay between each read
    } while (botaoCPD == 1); // keep reading till a HIGH
    lcd_limpa();

    ZeraSistema();

    estado = EstadoConfigurandoCAP;
    // DESLIGAR todos os transistores
    lcd_envia_byte(0, 0x80); //Posiciona o cursor na coluna 4 da linha 1
    printf("Emergência!"); //Escreve no LCD
    __delay_ms(2000);
}

```

```

    ExecutandoDescarga();
    lcd_envia_byte(0, 0x80); //Posiciona o cursor na coluna 4 da linha 1
    printf("Reiniciando!"); //Escreve no LCD
    __delay_ms(2000);
    lcd_limpa();
}

//Botão D // Botão CONFIRMA
botaoDPD = PORTCbits.RC0;
if (botaoDPD == 1) {
    __delay_ms(5); // Introduce a delay between each read
    do {
        botaoDPD = PORTCbits.RC0; // Read the pin
        __delay_us(1); // Introduce a delay between each read
    } while (botaoDPD == 1); // keep reading till a HIGH

    if (ConfirmaCAP == 0 && estado == EstadoConfigurandoCAP) {
        ConfirmaCAP = 1;
    } else ConfirmaCAP = 0;

    if (ConfirmaPulso == 0 && estado == EstadoConfigurandoPulso) {
        ConfirmaPulso = 1;
    } else ConfirmaPulso = 0;

    if (ConfirmaLarguraPulso == 0 && estado == EstadoConfigurandoLarguraPulso) {
        ConfirmaLarguraPulso = 1;
    } else ConfirmaLarguraPulso = 0;

    if (ConfirmaFreqPulso == 0 && estado == EstadoConfigurandoFreqPulso) {
        ConfirmaFreqPulso = 1;
    } else ConfirmaFreqPulso = 0;

    if (ConfirmaExecuta == 0 && estado == EstadoExecutandoAplicacao) {
        ConfirmaExecuta = 1;
    } else ConfirmaExecuta = 0;

    if (ConfirmaRepetirSN == 0 && estado == EstadoReperirSN) {
        ConfirmaRepetirSN = 1;
    } else {
        ConfirmaRepetirSN = 0;
    }
}

switch (estado) {
    case EstadoConfigurandoCAP:
    {
        indice_conf = 0;
        lcd_envia_byte(0, 0x80); //Posiciona o cursor na coluna 4 da linha 1
        printf("Capacitores:"); //Escreve no LCD
        lcd_envia_byte(0, 0xC0); //Posiciona o cursor na coluna 7 da linha 1
        printf("%i", ContaConfigCAP); //Escreve no LCD
    }
}

```

```

        if (ConfirmaCAP == 1) {
            ExecutandoCarga();
            configuracao[indice_conf] = ContaConfigCAP;
            estado = EstadoConfigurandoPulso;
            lcd_limpa();
        }
    }

    break;
case EstadoConfigurandoPulso:
{
    indice_conf = 1;
    lcd_envia_byte(0, 0x80); //Posiciona o cursor na coluna 4 da linha 1
    printf("Pulso:"); //Escreve no LCD
    lcd_envia_byte(0, 0xC0); //Posiciona o cursor na coluna 7 da linha 1
    printf("%i", ContaConfigPulso); //Escreve no LCD

    if (ConfirmaPulso == 1) {
        configuracao[indice_conf] = ContaConfigPulso;
        estado = EstadoConfigurandoLarguraPulso;
        lcd_limpa();
    }
}

    break;
case EstadoConfigurandoLarguraPulso:
{
    indice_conf = 2;
    lcd_envia_byte(0, 0x80); //Posiciona o cursor na coluna 4 da linha 1
    printf("Largura Pulso:"); //Escreve no LCD
    lcd_envia_byte(0, 0xC0); //Posiciona o cursor na coluna 7 da linha 1
    printf("%i us", opcoespulso[ContaConfigLarguraPulso]); //Escreve no LCD

    if (ConfirmaLarguraPulso == 1) {
        configuracao[indice_conf] = opcoespulso[ContaConfigLarguraPulso];
        ind_freq_linha = ContaConfigLarguraPulso;
        estado = EstadoConfigurandoFreqPulso;
        lcd_limpa();
    }
}

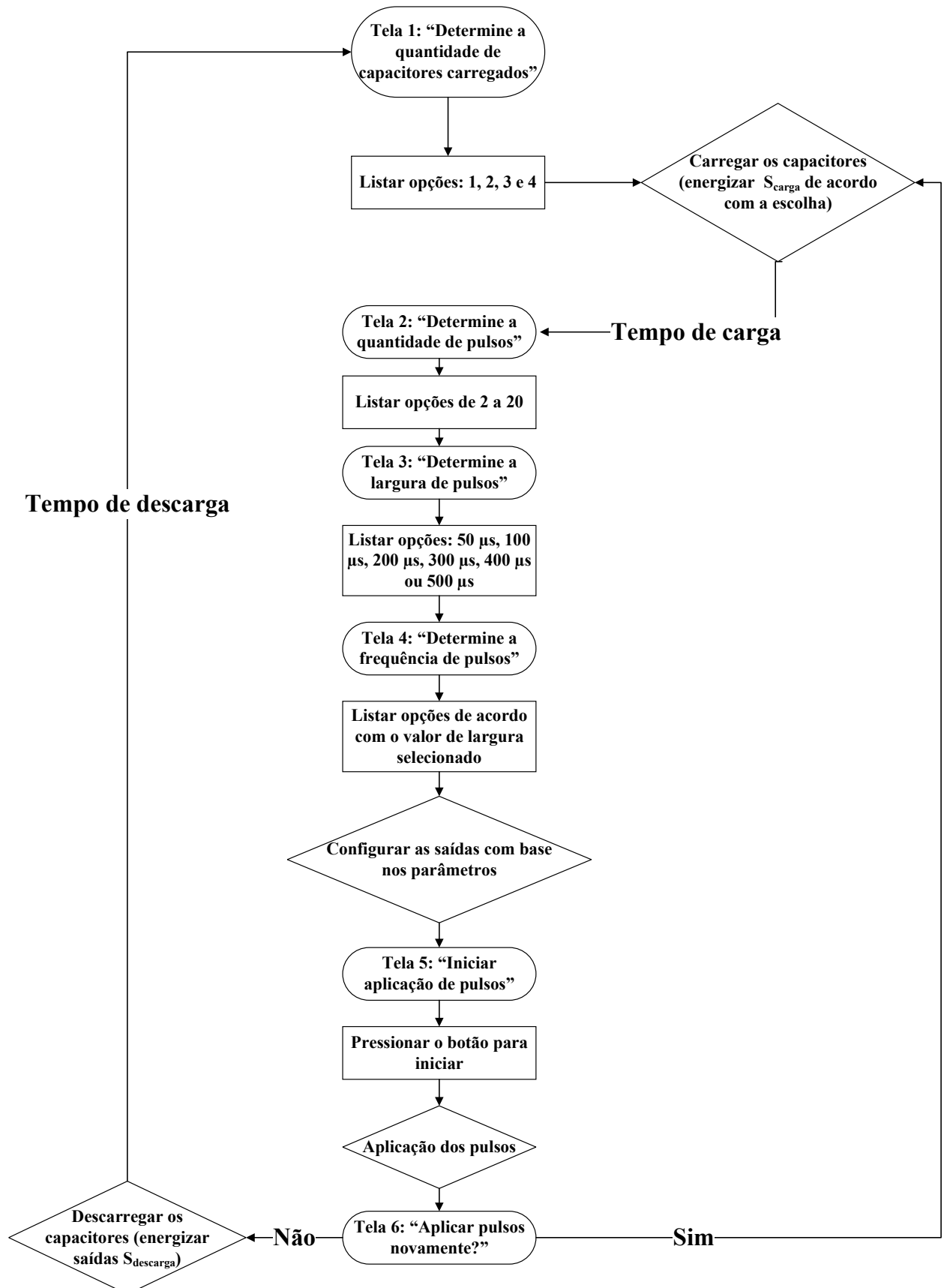
    break;
case EstadoConfigurandoFreqPulso:
{
    indice_conf = 3;
    lcd_envia_byte(0, 0x80); //Posiciona o cursor na coluna 4 da linha 1
    printf("Frequência Pulso:"); //Escreve no LCD
    lcd_envia_byte(0, 0xC0); //Posiciona o cursor na coluna 7 da linha 1
    printf("%i Hz", opcoesfreq[ContaConfigLarguraPulso][ContaConfigFreqPulso]);

    if (ConfirmaFreqPulso == 1) {
        configuracao[indice_conf] = opcoesfreq[ContaConfigLarguraPulso]
            [ContaConfigFreqPulso];
        estado = EstadoExecutandoAplicacao;
        lcd_limpa();
    }
}

```

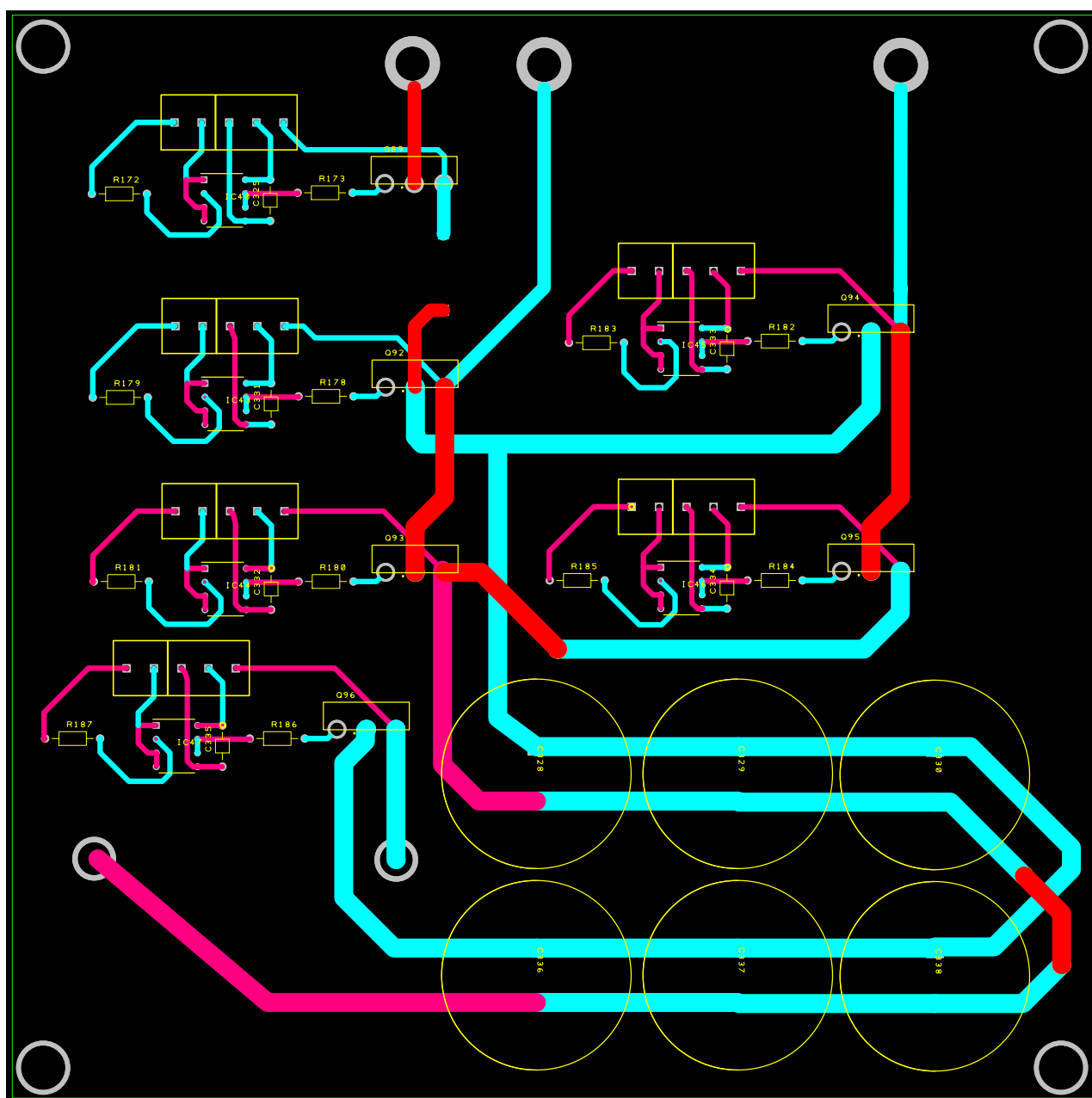

.2 APÊNDICE B - FLUXOGRAMA LÓGICO

Figura 62 – Fluxograma do programa implementado no microcontrolador



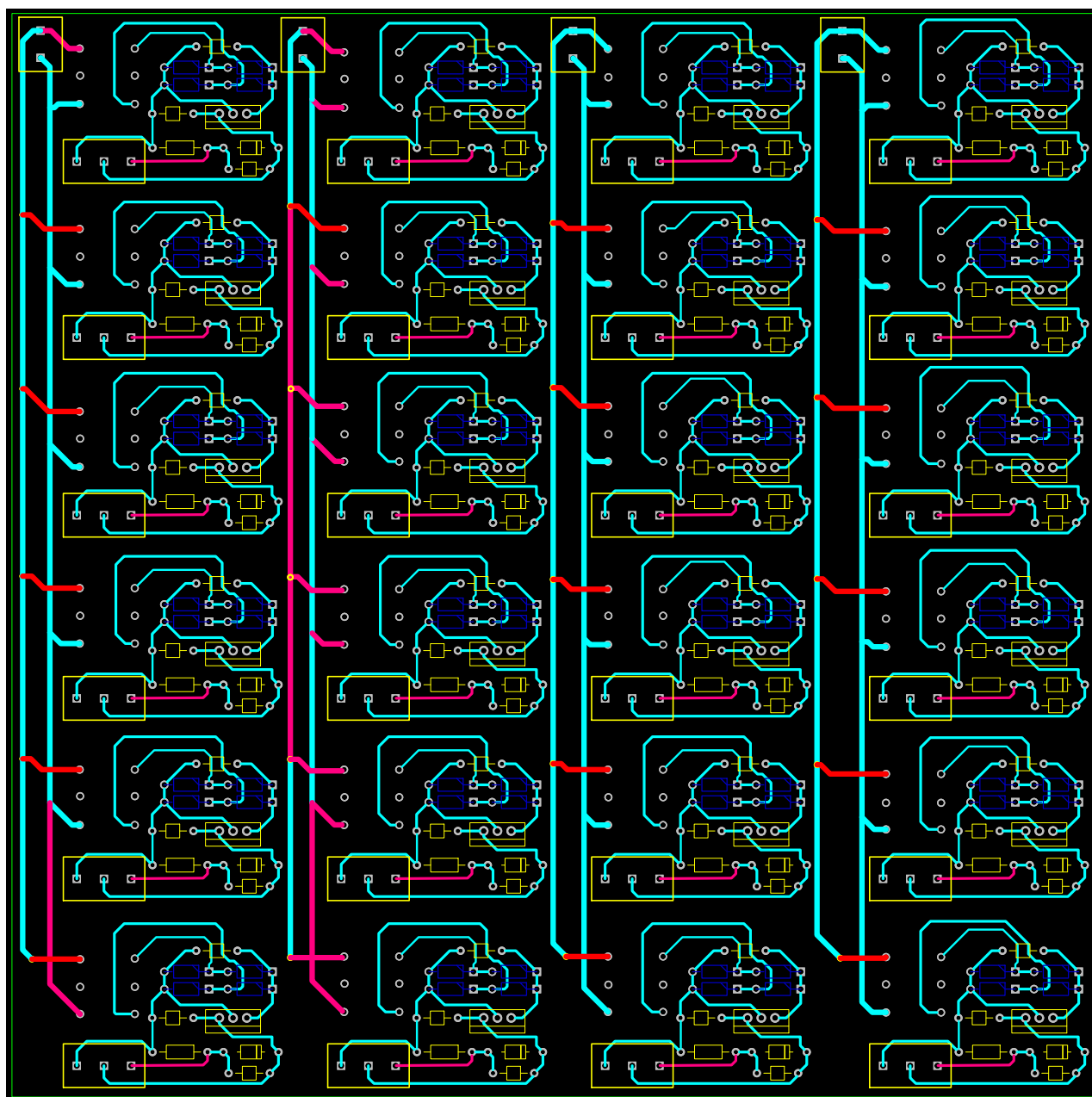
.3 APÊNDICE C - LAYOUT DAS PLACAS

Figura 63 – Layout da placa de célula capacitiva



Fonte: Produção do autor.

Figura 64 – Layout da placa de fontes isoladas



Fonte: Produção do autor.

Figura 65 – Layout da placa do oscilador

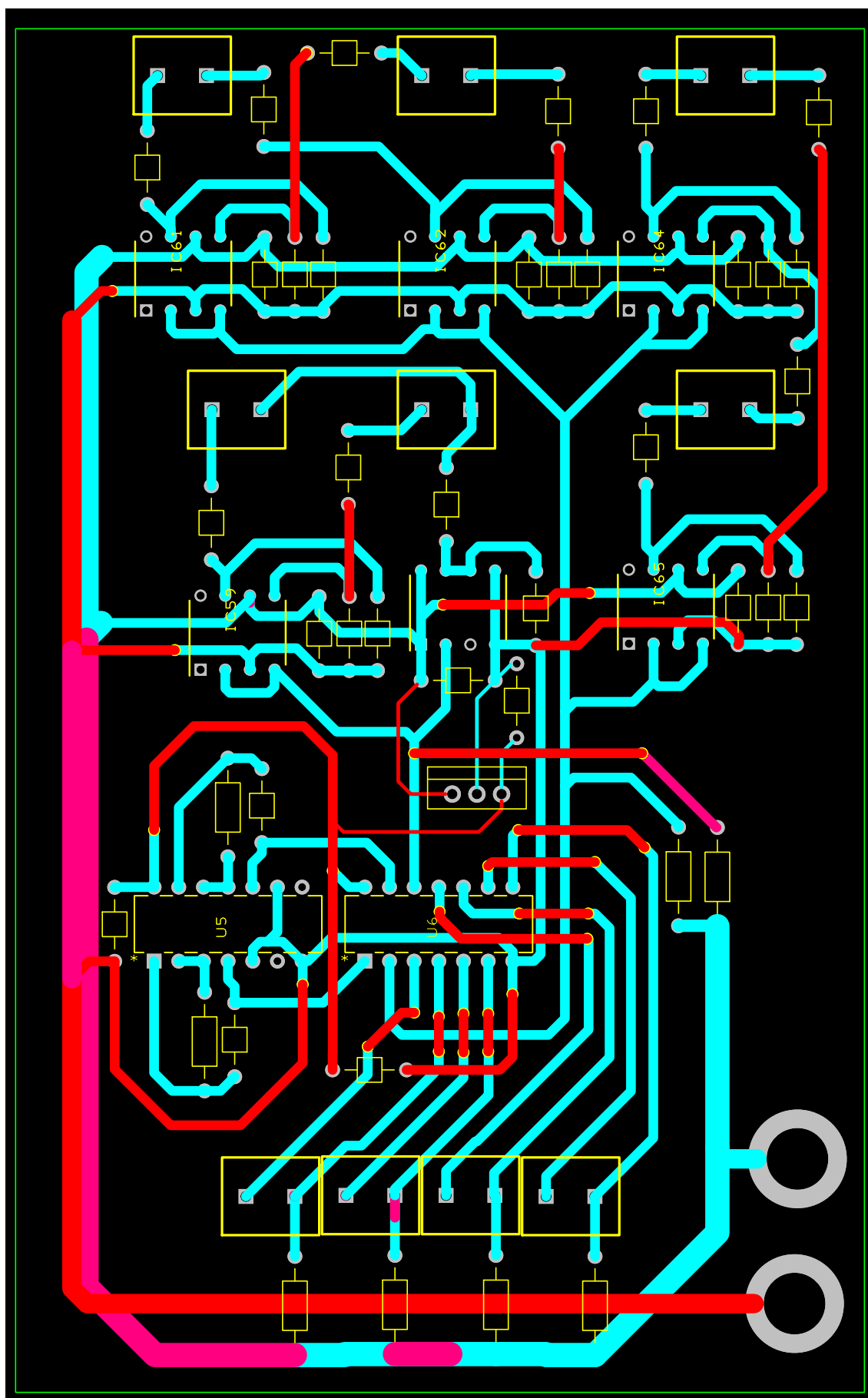
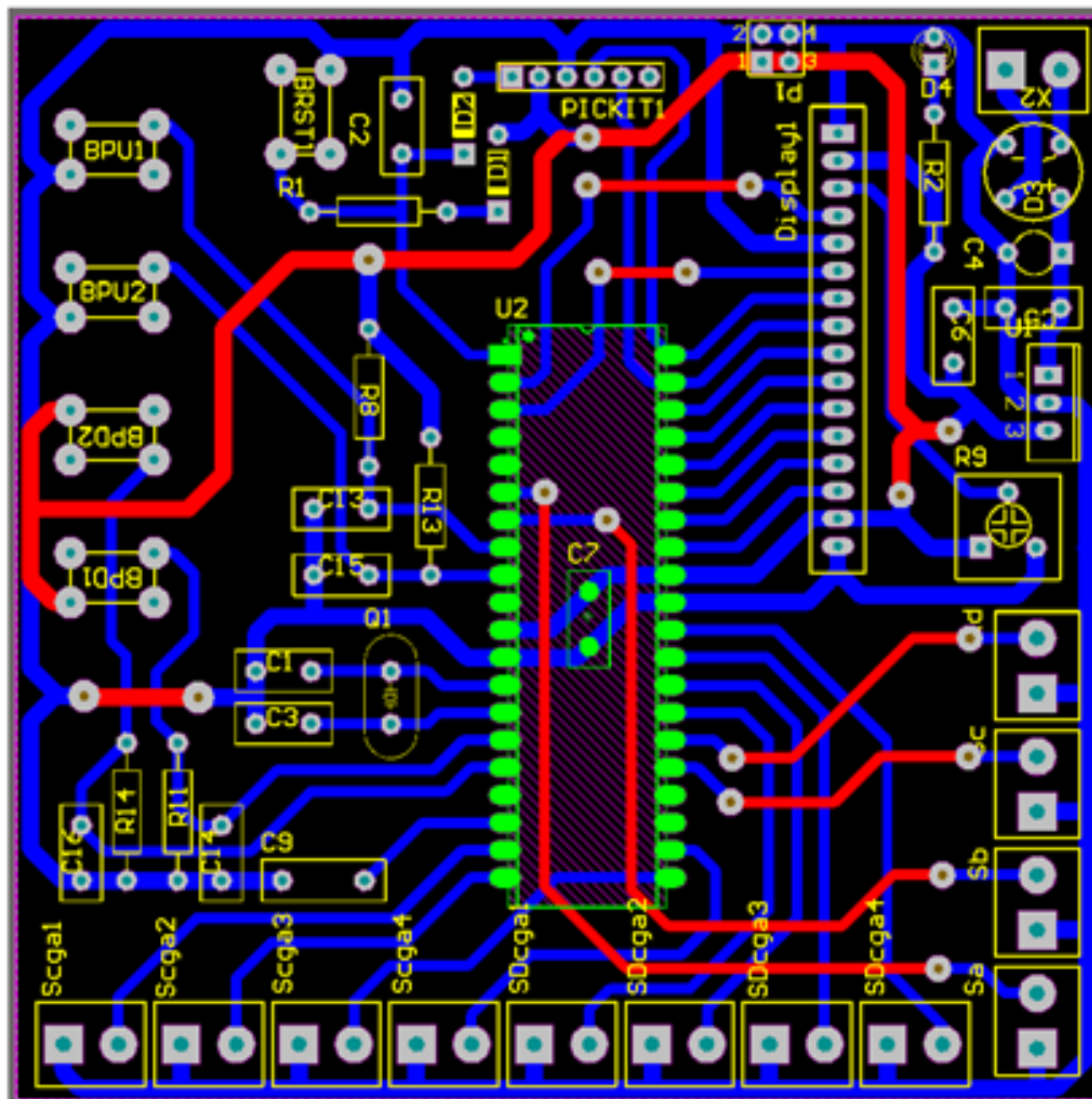


Figura 66 – Layout da placa do microcontrolador



Fonte: Produção do autor.

.4 APÊNDICE D - ESQUEMA ELÉTRICO DO GERADOR DE MARX SIMULADO

Figura 67 – Esquema elétrico do Gerador de Marx

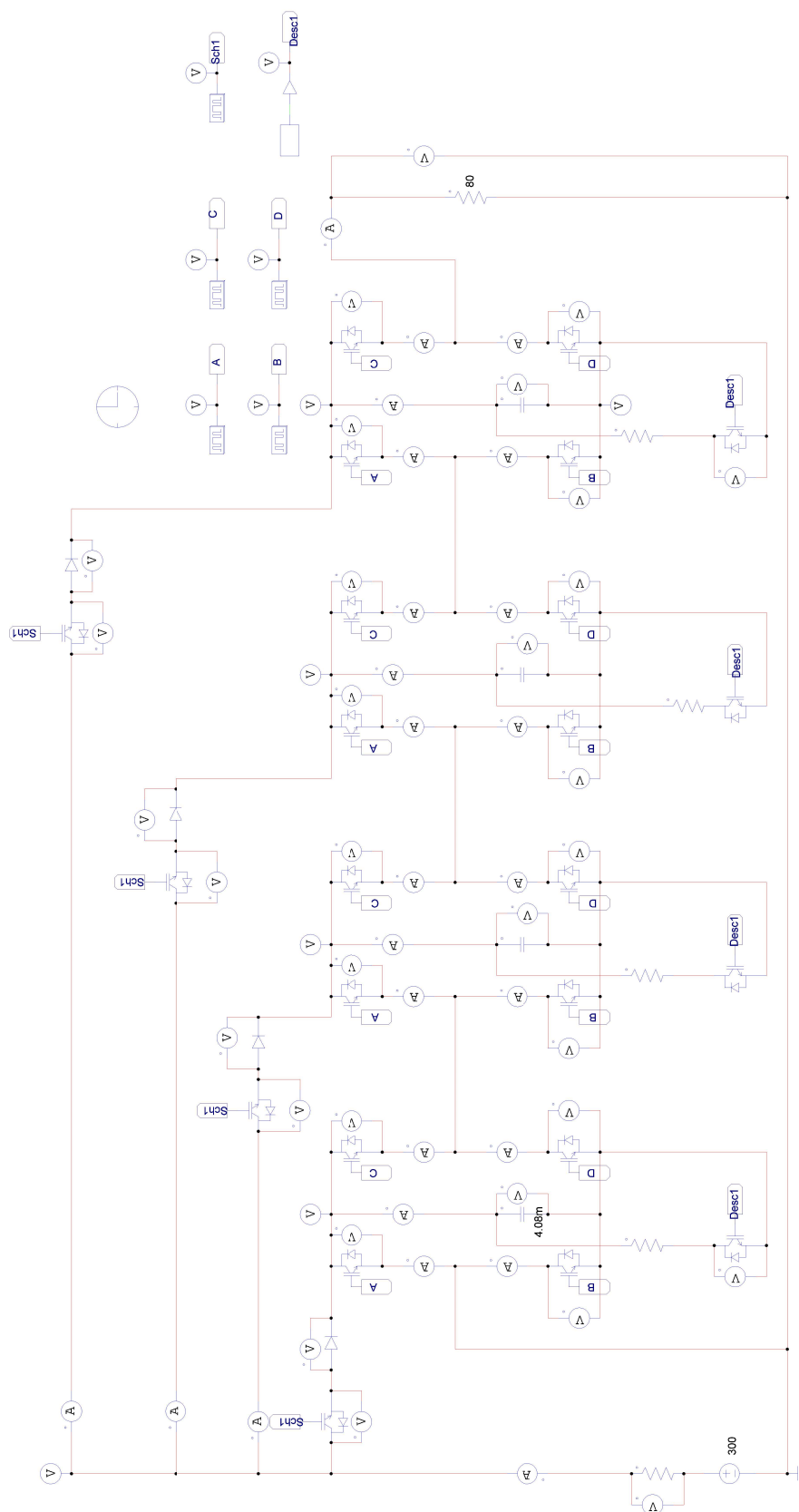
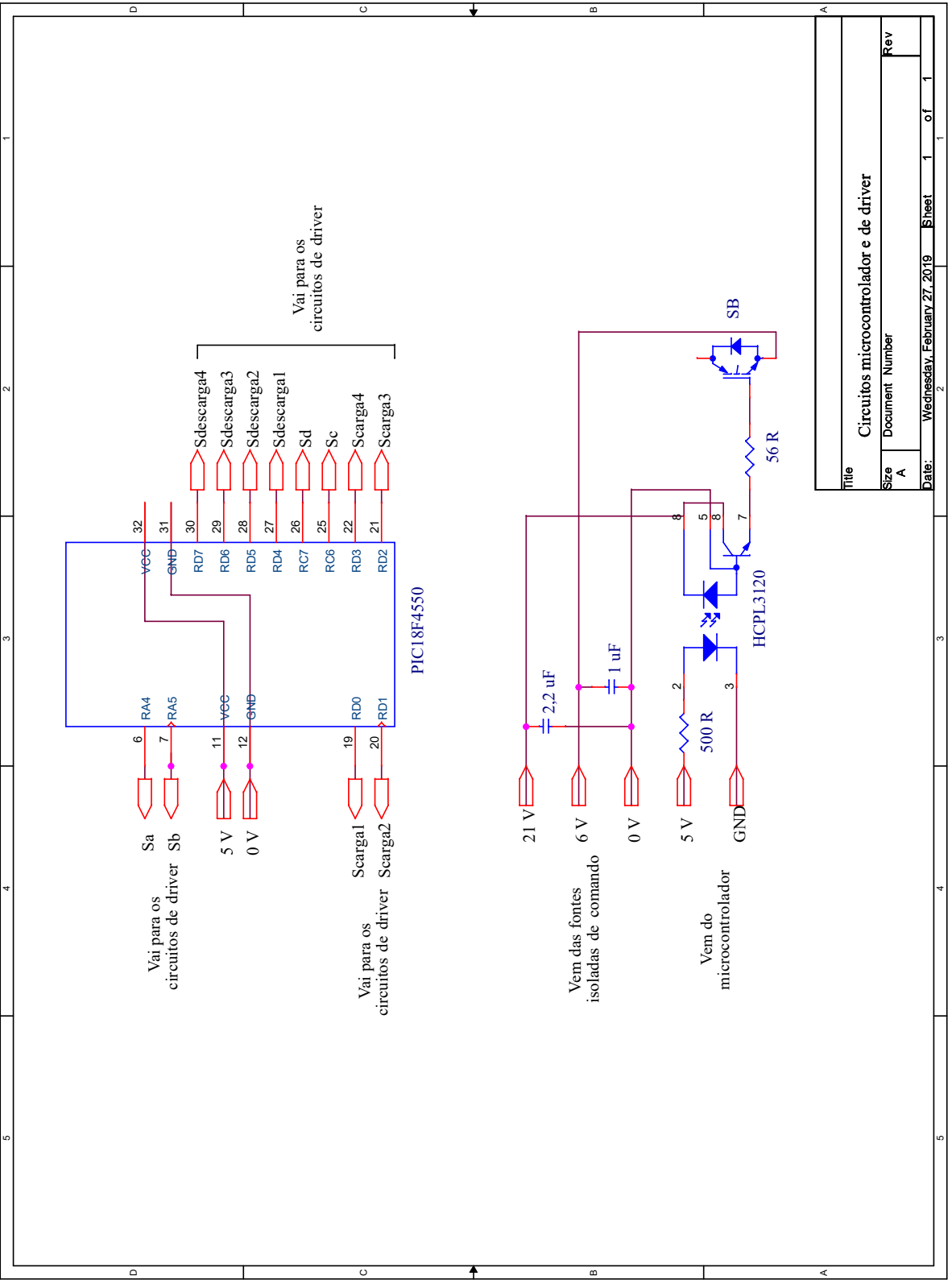


Figura 69 – Esquema elétrico dos circuitos de *drivers* dos interruptores e microcontrolador



.6 APÊNDICE F - PROJETO E CÁLCULO DE PERDAS DOS TRANSFORMADORES DAS FONTES

Os principais parâmetros dos materiais empregados nos transformadores são apresentados na Tabela 16:

Tabela 16 – Parâmetros de dimensionamento dos transformadores das fontes

Símbolo	Parâmetro	Valor
f_s	Frequência de operação	92 <i>kHz</i>
V_i	Tensão no primário	16 <i>V</i>
V_o	Tensão no secundário	21 <i>V</i>
B_{max}	Máxima densidade de fluxo magnético	0,39 <i>T</i>
J_{max}	Máxima densidade de corrente do condutor	450 <i>A/cm²</i>
P_o	Potência do transformador	4,01 <i>W</i>
k_w	Fator de ocupação da janela do carretel	0,4
k_p	Fator de ocupação dos enrolamentos	0,4
D_{max}	Máxima razão cíclica de operação	0,5

Fonte: Produção do autor.

Com base nesses valores, foi cogitada a utilização da equação proposta por (FILHO, 2005), vista na Equação 1 para determinação do mínimo produto entre área transversal do núcleo magnético (A_e) e área da janela do carretel (A_w):

$$A_e A_w = \frac{0,6 P_o}{f_s J_{max} B_{max} k_w k_p} \sqrt{\frac{D_{max}}{2}} \quad (1)$$

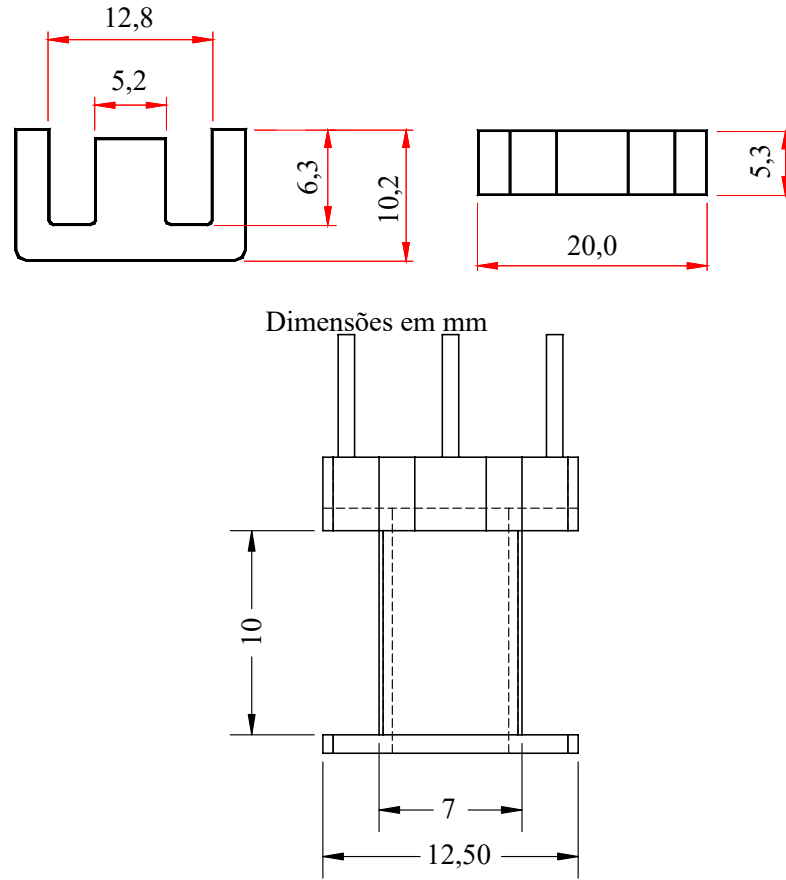
Porém, essa definição inicial do dimensionamento ficou comprometida tendo em vista que o valor de potência é bastante reduzido, por se tratar de um transformador para alimentar um interruptor, e não componente de um sistema de potência. Dessa forma a equação retornou uma relação abaixo muito abaixo até das propostas comerciais.

Com isso, na sequência foi determinada a quantidade de espiras nos enrolamentos primário e secundário, respeitando a relação de transformação do magnético.

Neste etapa, já é necessária a inclusão de dados construtivos do núcleo. Por disponibilidade de materiais foi utilizado o modelo NEE-20/10/5, da *Thornton* em conjunto com o carretel E-20 da *Terzi* e confrontada a possibilidade de utilização dos mesmos.

As dimensões de ambos podem ser vistos na Figura 70:

Figura 70 – Dimensões do núcleo e carretel utilizados nos transformadores das fontes



Fonte: Adaptado de (THORNTON, 2015) e (TERZI, 2018).

Assim, A_e e A_w possuem os valores conforme Tabela 17:

Tabela 17 – Áreas dos núcleo *NEE-20/10/5* e carretel *E-20*

A_e	Área transversal do núcleo magnético	27,56 mm ²
A_w	Área da janela do carretel	27,50 mm ²

Fonte: Produção do autor.

O número de espiras do enrolamento (N_p) primário pode ser calculado conforme a Equação 2:

$$N_p = \frac{V_i D_{max}}{2A_e f_s B_{max}} \quad (2)$$

3

$$N_p = 60,67 \approx 60 \quad (3)$$

Já a quantidade de espiras do secundário é calculada com base na relação de transformação, a , conforme equações a seguir:

$$a = \frac{N_s}{N_p} = \frac{V_o}{V_i} \quad (4)$$

$$a = 1,313 \quad (5)$$

$$N_s = aN_p \quad (6)$$

$$N_s = 79,63 \approx 80 \quad (7)$$

A seguir determina-se as seções das espiras para verificar se o conjunto escolhido é viável. Primeiramente é estabelecido o maior condutor possível de acordo com a frequência de operação. O efeito pelicular, ou *skin effect*, limita a passagem de corrente por apenas uma determinada área do condutor. A Equação 8 apresenta o maior raio possível para a frequência desejada:

$$r_{max} = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}} \quad (8)$$

$$r_{max} = 0,25mm \quad (9)$$

De acordo com as tabelas de dimensões de condutores, o maior fio a ser utilizado nesta aplicação é o AWG 24. Ou seja, caso necessário conduzir uma corrente superior ao limite do fio citado, utiliza-se mais condutores em paralelo em detrimento a um com área maior.

Para escolha da seção adequada, deve-se determinar a corrente que circula em cada um dos enrolamentos. A do secundário pode ser calculada conforme Equação 10, sendo d_{max} a máxima razão cíclica dos pulso de saída:

$$I_{s_{rms}} = \sqrt{\left(\frac{V_g}{R_g}\right)^2 D_P} \quad (10)$$

Sendo o máximo valor de D_P 0,4, a corrente eficaz do secundário do transformador é determinada na Equação 11:

11

$$I_{s_{rms}} = 0,169A \quad (11)$$

Utilizando a relação de transformação, a corrente eficaz do enrolamento primário, $I_{p_{rms}}$ é 0,22 A.

Conhecendo as correntes do transformador, e também a densidade máxima dos condutores, pode-se determinar a área necessária dos mesmos, no primário S_p e secundário S_s conforme segue:

$$S_{p_{min}} = \frac{I_p}{J_{max}} \quad (12)$$

$$S_{p_{min}} = 0,049mm^2 \quad (13)$$

$$S_{s_{min}} = \frac{I_s}{J_{max}} \quad (14)$$

$$S_{s_{min}} = 0,035mm^2 \quad (15)$$

Para essas duas áreas mínimas, podem ser utilizados fios AWG 30 e 31, que possuem as dimensões conforme Tabela 18:

Tabela 18 – Dimensões dos fios AWG 30 e 31

Classificação AWG	Diâmetro [mm]	Seção [mm^2]
AWG 30	0,2546	0,051
AWG 31	0,2268	0,040

Fonte: Produção do autor.

Sendo assim, seguindo a Tabela 18, Equação 13 e Equação 15, é utilizado um fio AWG 30 no primário e um fio AWG 31 no secundário.

Por fim, é verificada a possibilidade de execução. A partir das seções e quantidade de fios necessários, determina-se a mínima área da janela de carretel $A_{w_{min}}$ necessária:

$$w_{min} = \frac{(N_p S_p) + (N_s S_s)}{k_w} \quad (16)$$

$$A_{w_{min}} = 15,65mm^2 \quad (17)$$

Como o valor é inferior ao apresentado na Tabela 17, os modelos de núcleo e carretel mencionados satisfazem a aplicação.

As perdas nos transformadores podem ser divididas se ocorrem no núcleo magnético ou condutores dos enrolamentos. Dessa forma, vale a Equação 18, sendo P_{trans} a perda total no transformador, P_n referente ao núcleo e P_{cu} dos enrolamentos.

$$P_{trafo} = P_n + P_{cu} \quad (18)$$

As perdas no núcleo ocorrem majoritariamente devido ao efeito da histerese, mas também pelas correntes parasitas que circulam pela ferrite e podem ser calculadas conforme a Equação 19, de acordo com (OLIVEIRA, 2001).

$$P_n = \Delta B^{2,3294} V_n f_s^{1,4017} \cdot 7,9292 \cdot 10^{-6} \quad (19)$$

Sendo V_n o volume do núcleo magnético, para o modelo utilizado neste trabalho, NEE-20/10/5, esse valor é de $1,34 \text{ cm}^3$. Já (ΔB) é a variação de densidade magnética e obtida conforme a Equação 20.

$$\Delta B = \frac{V_p}{2A_e N_p f_s} \cdot 10^4 \quad (20)$$

Sendo assim, as perdas no núcleo valem:

$$P_n = 0,106W \quad (21)$$

Já as perdas no cobre são obtidas a partir da resistência dos enrolamentos (calculadas separadamente) e das correntes que circulam por eles.

Assim, deve-se inicialmente determinar a resistência dos enrolamentos (R_{cu}). A Equação 22 é empregada para esse fim:

$$R_{cu} = \frac{\rho_{cu} l_{espira} N}{S_{cond}} \quad (22)$$

Sendo ρ_{cu} a resistividade do cobre, de $1,69 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, l_{espira} o comprimento médio de uma espira e S_{cond} a área da seção transversal do condutor, conforme Tabela 18.

S_{cond} é um valor estimado conforme as dimensões carretel e dos fios, considerando que o primário foi enrolado primeiro, isolado com fita, e por cima passadas as espiras do secundário.

Assim, o comprimento médio de um enrolamento primário foi calculado em $28,5 \text{ mm}$ e do secundário $30,5 \text{ mm}$. Sendo assim ambas as resistências são calculadas conforme segue:

$$R_{cu_{pri}} = \frac{1,69 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0285.60}{0,051 \cdot 10^{-6}} = 0,566 \Omega \quad (23)$$

$$R_{cu_{sec}} = \frac{1,69 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0305 \cdot 80}{0,040 \cdot 10^{-6}} = 1,03 \Omega \quad (24)$$

Com isso, as perdas por efeito Joule podem ser calculadas conforme a Equação 25:

$$P_{cu} = R_{cu} I_{ef}^2 \quad (25)$$

$$P_{cu_{pri}} = 0,566 \cdot 0,22^2 = 0,027 W \quad (26)$$

$$P_{cu_{sec}} = 1,03 \cdot 0,169^2 = 0,029 W \quad (27)$$

Sendo assim, as perdas totais por enrolamento em cada transformador podem ser calculadas conforme a Equação 28:

$$P_{cu_{trafo}} = P_{cu_{pri}} + P_{cu_{sec}} \quad (28)$$

$$P_{cu} = 0,027 + 0,029 = 0,056 W \quad (29)$$

Com isso, aplicando a Equação 18 as perdas totais em cada transformador valem:

$$P_{trafo} = 0,106 + 0,056 = 0,162 W \quad (30)$$

Atuando no máximo oito transformadores no período de pulsos, a potência dissipada nessa etapa é de 1,296 W. Na fase de carga, até 12 transformadores atuam, totalizando 1,94 W.

O cálculo de elevação de temperatura do núcleo magnético (ΔT) se inicia determinando a resistência térmica (R_t) do mesmo, conforme Equação 31.

$$R_t = 23(A_e A_w)^{-0,37} \quad (31)$$

$$R_t = 59,73^\circ C/W \quad (32)$$

Por fim, a elevação de temperatura pode ser determinado de acordo com a Equação 33:

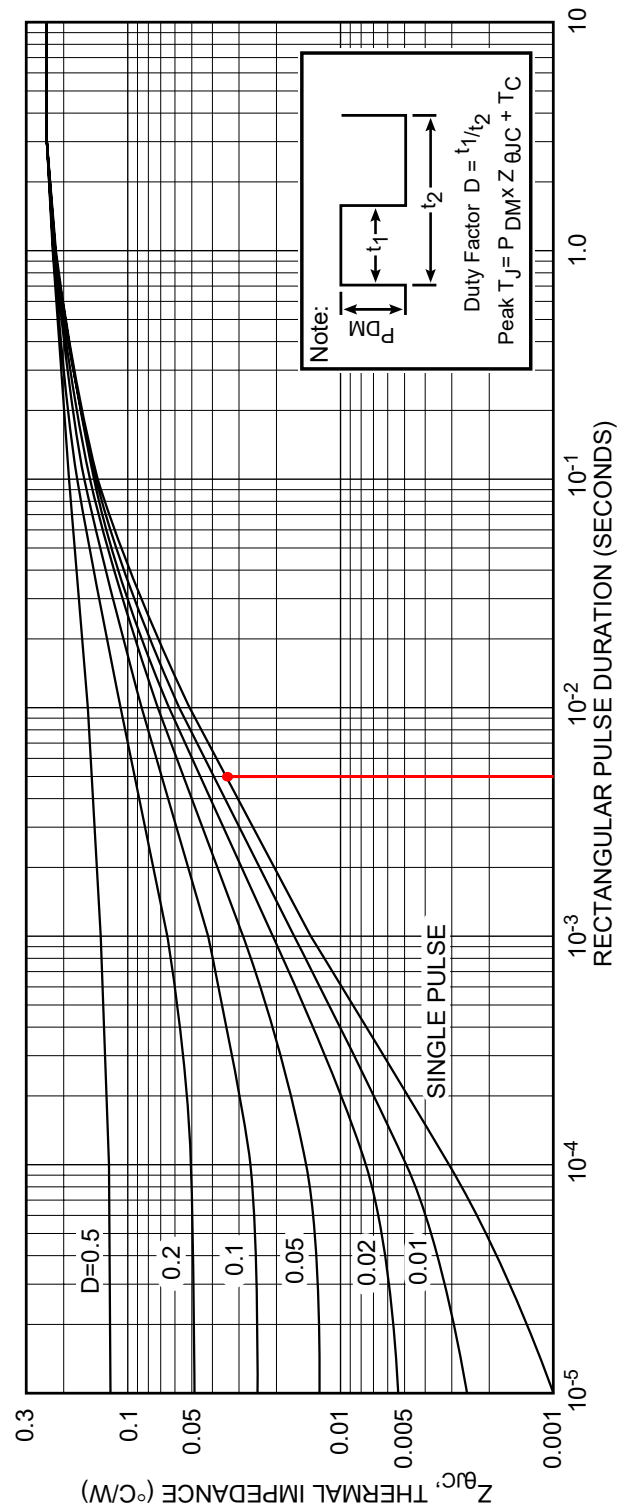
$$\Delta T = R_t P_{trafo} \quad (33)$$

$$\Delta T = 9,67^{\circ}C \quad (34)$$

Anexos

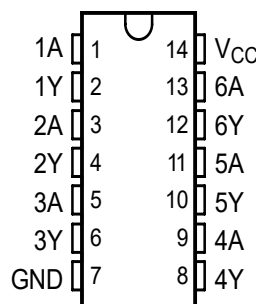
.1 ANEXO A - GRÁFICO DA IMPEDÂNCIA TÉRMICA DO MOSFET APT5010B2VR

Figura 71 – Gráfico da impedância térmica do MOSFET APT5010B2VR



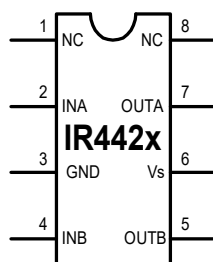
.2 ANEXO B - DIAGRAMA DE PINOS DOS CIS UTILIZADOS

Figura 72 – Configuração de pinos dos CIs SN74HC14 e SN7407



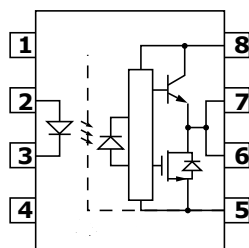
Fonte: (INSTRUMENTS, 2016).

Figura 73 – Configuração de pinos do CI IR442X



Fonte: (RECTIFIER, 2008)

Figura 74 – Configuração de pinos do CI HCPL3120



Fonte: (AVAGO, 2016)