

Agradecimentos

Eu quero agradecer em primeiro lugar ao Prof. Luís Manuel dos Santos Redondo e ao Prof. Manuel Ribeiro da Silva pela oportunidade e o privilégio que me deram para realizar esta dissertação de Mestrado. Estou muito grato pela orientação e motivação durante o período de desenvolvimento deste projecto.

Quero também agradecer ao Prof. Hiren Canacsinh e do Prof. Paulo Gamboa pela disponibilidade de tudo que puderam ensinar e apoio.

Agradeço também a todos os colegas e professores que ao longo da minha vida académica me ajudaram a concluir esta fase.

Por fim quero agradecer à minha Família e Amigos pela motivação e o apoio que me deram ao longo destes anos.

Muito Obrigado!

Resumo

Esta dissertação apresenta o estudo e o projecto de uma fonte de alimentação para um detector de radiação Geiger-Muller. A fonte de alimentação tanto pode funcionar com a tensão da rede como pode ser integrada em sistemas de electrónica modular NIM de modo a ser facilmente integrada em qualquer tipo de laboratório.

A fonte de alimentação inclui os seguintes módulos: 1) rectificador controlado; 2) conversor boost; 3) inversor de tensão; 4) transformador de impulsos; 5) ponte rectificadora de díodos e 6) separador de Alta Tensão – Sinal.

Os resultados obtidos experimentalmente estão de acordo com resultados obtidos por simulações usando o Matlab/Simulink ou o OrCAD. Estes resultados permitem demonstrar a fiabilidade e a validade da fonte de alimentação proposta para alimentar o detector Geiger-Muller. A fonte de alimentação foi testada em condições reais de funcionamento com fontes de isótopos radioactivos escolhidos.

Palavras chave: Detector Geiger-Muller, Rectificador controlado, TCA785, Conversor boost, Inversor de tensão

Abstract

This MSc thesis presents the research and project of a power supply for a Geiger-Muller radiation detector. The power supply may work with mains voltage or may be integrated in a NIM module so that can be easily integrated in any kind of laboratory.

The power supply includes the following modules: 1) single-phase full wave controlled rectifier; 2) Boost converter; 3) Voltage inverter; 4) pulse transformer; 5) single-phase bridge rectifier and 6) separador de Alta Tensão – Sinal.

The results obtained experimentally match the results obtained by simulations using Matlab/Simulink or OrCAD. This results allow to demonstrate the fiability and validate the proposed power supply to connect to the Geiger-Muller detector. The power supply was tested in real conditions of functioning with chosen sources of radioactive isotopes.

Keywords: Geiger-Muller detector, Single-phase full wave controlled rectifier, TCA785, Boost converter, Voltage inverter

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice.....	vii
Lista de figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de abreviaturas.....	xiii
Capítulo I.....	1
1. Introdução	1
1.1. Motivação da dissertação	1
1.2. Objectivo da dissertação.....	1
1.3. Estrutura da dissertação	2
Capítulo II	3
2. Detectores de radiação com enchimento de gás – o detector GM	3
2.1. Descrição do detector de radiação GM.....	3
2.2. Fonte de alta tensão	6
3. A fonte de alta tensão	9
3.1. Descrição e dimensionamento do rectificador em cadeia aberta.....	9
3.1.1. Comando do rectificador.....	9
3.2.2 Circuito gerador de impulsos para disparo dos tirístores.....	10
3.2.3 Circuito de disparo	13
3.3. Conversor boost	15
3.4. Conversor C.C. – C.A.	17
3.5. Implementação do Inversor de Tensão	19
3.6. O transformador de alta frequência e ponte de diodos	20
3.7. Circuito de separação de alta tensão e inversão do sinal do GM	21
3.8. Visualização de contagens	23
4. Resultados de simulação e experimentais.....	25
4.1. Resultados de simulação do funcionamento rectificador em cadeia aberta	25
4.2. Conversor Boost	27
4.3. Conversor CC-CA.....	28
4.4. Circuito separador AT-Sinal	30

4.5. Resultados experimentais	30
4.5.1. Rectificador totalmente controlado em cadeia aberta.....	31
4.5.2. Conversor boost	32
4.5.3. Inversor de tensão monofásico em ponte	33
4.6. Curva característica do detector Geiger-Muller.....	34
5. Conclusões e propostas de trabalhos futuros	39
5.1. Conclusões	39
5.2. Propostas de Trabalhos Futuros.....	39
Referências Bibliográficas	41
Anexos.....	43

Lista de figuras

Figura 1: Esquema do detector GM	3
Figura 2: Detector GM e circuito de polarização	4
Figura 3: Diagrama característico do detector GM	5
Figura 4: Circuito de contador de radiação incluindo o multiplicador de tensão para polarizar o detector GM	6
Figura 5: Diagrama de blocos da fonte de alta tensão para o detector GM	7
Figura 6: Unidade de disparo dos tiristores PSTT PC/20 e esquema de ligação	9
Figura 7: Circuito de comando do retificador baseado no CI TCA785	11
Figura 8: Diagrama de blocos do TCA785	12
Figura 9: Diagrama temporal dos sinais do TCA785	13
Figura 10: Diagrama de blocos da geração de sinais de disparo em pontes retificadoras monofásicas	13
Figura 11: Circuito de inversão dos sinais de disparo do TCA785	14
Figura 12: Circuito de disparo dos tiristores com isolamento galvânico por acoplamento óptico	14
Figura 13: Circuito(esquemático) de potência do conversor boost	15
Figura 14: Formas de onda do circuito conversor boost	15
Figura 15: Etapas de funcionamento do inversor monofásico em ponte com carga indutiva	17
Figura 16: Formas de onda para o circuito da Figura 13	18
Figura 17: Diagrama temporal dos impulsos nas gates dos SP (semiconductor de potência) e tensão V_{AB}	18
Figura 18: Esquema de blocos do inversor de tensão	19
Figura 19: Esquema dos Acopladores Ópticos HCPL-2232.	19
Figura 20: Circuito do transformador de impulsos com a ponte de diodos.	20
Figura 21: Voltímetro digital LASCAR DPM 490	21
Figura 22: Divisor de tensão do voltímetro	21
Figura 23: Circuito inversor e amplificador do sinal do detector GM	22
Figura 24: Resultados da simulação do circuito inversor e amplificador do sinal do detector GM (Fig. 23)	22
Figura 25: Circuito monoestável	23
Figura 26: Resultados da simulação do circuito monoestável (Fig. 25)	23
Figura 27: Contador eletrônico 520 (6 dígitos) com timer	23
Figura 28: Modelo de simulação do retificador em cadeia aberta	25
Figura 29: Modelo de simulação do bloco do circuito de disparo dos tiristores	26
Figura 30: Resultado da simulação do modelo do circuito de disparo dos tiristores (Fig. 26)	26
Figura 31: Modelo de simulação do bloco da carga do retificador	27
Figura 32: Resultado da simulação da tensão no condensador C	27
Figura 33: Circuito do conversor Boost	27
Figura 34: Resultado da simulação do circuito do conversor Boost (Fig. 33)	28
Figura 35: Modelo de simulação do circuito inversor monofásico	28
Figura 36: Resultado da simulação do circuito inversor monofásico (Fig. 35) e ponte de diodos (Fig.37)	29
Figura 37: Modelo da simulação do transformador de impulsos e ponte de diodos	29
Figura 38: Resultados da simulação do transformador de impulsos (Fig. 37)	29
Figura 39: Modelo de simulação do circuito separador AT - sinal	30
Figura 40: Resultados da simulação do circuito separador AT – sinal (Fig. 39)	30
Figura 41: Tensão dente-de-serra obtida através da tensão de amostragem da rede.	31
Figura 42: Sinais de comando U_c e rampa de sincronismo em $t = 0$	31
Figura 43: Sinais de comando U_c (CH2), rampa de sincronismo (CH1), impulsos de disparo dos tiristores (CH3 e CH4).	31
Figura 44: Inversão do sinal da saída do TCA785 para disparar as UDT (CH3 e CH4).	31
Figura 45: Sinal de saída do TCA785 (CH2) e tensão (V_{GK}) aplicada em cada tiristor (CH4)	32
Figura 46: Tensão medida aos terminais do condensador (CH4)	32
Figura 48: Sinais de saída do microcontrolador	33
Figura 49: Sinais V_{GS} de cada MOSFET	33
Figura 50: Tensão no primário do transformador de impulsos	34
Figura 51: Tensão no secundário do transformador de impulsos	34
Figura 52: Tensão no primário (CH4) e no secundário (CH1) do transformador de impulsos.	34
Figura 53: Tensão à saída da ponte de tiristores (CH2) e da ponte de diodos (CH1)	34
Figura 54: Diagrama de blocos da instalação experimental do detector GM	35

<i>Figura 55: Curva da região de Plateau do detector GM</i>	35
<i>Figura 56: Fonte (1) + meio-disco de compensação</i>	37
<i>Figura 57: Fonte (2) + meio-disco de compensação</i>	37
<i>Figura 58: Fonte (1) + fonte (2)</i>	37

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Características dos detectores GM</i>	5
<i>Tabela 2: Parâmetros do transformador de alta frequência</i>	20
<i>Tabela 3: Configuração dos parâmetros do contador e do timer</i>	24
<i>Tabela 4: Parametros de simulação do modelo de simulação do bloco da carga do retificador</i>	26

Lista de abreviaturas

NIM – *Nuclear Instrumentation Module*
I&D – Investigação & Desenvolvimento
GM – Geiger-Müller
A.T. – Alta Tensão
CC – Corrente Contínua
CA – Corrente Alternada
CI – Circuito integrado
 V_{AK} – Tensão ânodo-cátodo
UDT – Unidade de disparo dos tirístores
 I_{GK} – Corrente porta-cátodo
 V_{GK} – Tensão porta-cátodo
 V_R – Tensão de rampa
 V_C – Tensão de controlo
 I_c – Corrente de colectador
 R_L – Resistência de carga
 V_{cc} – Tensão contínua
 V_{in} – Tensão de entrada
 I_B – Corrente de base
 R_B – Resistência de base
 V_{BE} – Tensão base-emissor
 R_s – Resistência de controlo da corrente
 I_{cm} – Corrente de controlo recomendada
 V_o – Tensão de saída
U – Tensão de entrada
T – Período
SP – Semiconductor de potência
 t_{off} – Tempo em que o SP está ao corte
 t_{on} – Tempo em que o SP está à condução
D – Duty Cycle
 I_{LB} – Corrente que circula na bobine
L – Bobine
 Φ_{max} – Fluxo magnético
 V_p – Tensão máxima à saída do ondulator

Capítulo I

1. Introdução

1.1. Motivação da dissertação

A detecção qualitativa e expedita de radiação nuclear é uma necessidade constante quer em laboratórios de ensino, quer em laboratórios de investigação e controlo. No entanto a variedade de equipamento de base entre diferentes laboratórios pode ser muito grande.

Será por isso de todo interesse desenvolver e fornecer uma plataforma modular e universal para detecção de radiação nuclear, beta e gama simultaneamente, de funcionamento independente ou integrada em sistemas de electrónica modular NIM, que possa ser facilmente integrada em qualquer tipo de laboratório.

O tema desta dissertação insere-se na área de I&D no âmbito da secção de Automação e Electrónica, com particular ênfase na área da Instrumentação. Considerando o problema da detecção expedita de radiação nuclear por meio de detectores GM (Geiger- Muller), quer em laboratórios de ensino, quer em ambientes de investigação e controlo, pretende-se com esta dissertação:

a)

Projectar uma plataforma modular e alternativamente universal para detecção de radiação nuclear, beta e gama, de funcionamento independente ou incluída em sistemas de electrónica modular NIM (*Nuclear Instrumentation Module*), que possa ser facilmente integrada em qualquer tipo de laboratório.

Esta plataforma deve incluir fonte de alta tensão de alimentação múltipla, sistema de contagem digital de impulsos com pré-selecção, de tempo, de quantidade de impulsos, e módulo de digitalização dos impulsos provenientes de detectores GM.

b)

Montagem uma Unidade Modular de Detecção de Radiação GM projectada e testa-la em condições reais de funcionamento com fontes de isótopos radioactivos escolhidos.

c)

Demonstrar a interacção de alguns tipos de radiação com a matéria, bem como a variedade de equipamento base em laboratórios e as topologias mais comuns associadas com os detectores de radiação GM, e a electrónica associada.

1.2. Objectivo da dissertação

1- Unidade integrada para detectores GM incluindo uma fonte de alimentação para funcionar:

- com a tensão da rede; alimentada através do cesto normalizado NIM.

2 - Contador com preset em tempo.

3 - Bloco conversor do sinal analógico proveniente do detector GM em sinal digital.

4 - Unidades de visualização da tensão aplicada ao detector GM e de contagens de eventos dos impulsos de radiação.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, organizados da forma a seguir descrita:

Capítulo I – Introdução. Definição o enquadramento do trabalho realizado bem como dos objectivos a que este se propõe e as respectivas motivações para a sua realização.

Capítulo II – Definição os conceitos teóricos necessários para a abordagem do tema proposto através da descrição detalhada dos elementos constituintes do sistema, nomeadamente dos módulos da fonte de alta tensão (sistema de controlo do rectificador; circuito de potência do rectificador; conversor boost; circuito de comando do inversor e circuito de potência do inversor) e do detector GM, electrónica associada e particularidades do sinal.

Capítulo III – Descrição o dimensionamento do sistema proposto nomeadamente do circuito de comando do rectificador; e sinais de comando do inversor.

Capítulo IV – Apresentação e análise os resultados obtidos por simulações e os resultados obtidos experimentalmente.

Capítulo V – Conclusões bem como propostas para trabalhos futuros.

Capítulo II

2. Detectores de radiação com enchimento de gás – o detector GM

2.1. Descrição do detector de radiação GM

Funcionamento do detector GM:

Os detectores GM (Figura 1) são normalmente cilindros metálicos de dimensões que podem variar de 5 a 50 mm para o diâmetro e de 1 a 50 cm para o comprimento. O cilindro é cheio com uma mistura de gases inertes (argon, neon). A pressão é inferior à atmosférica (0,1 atm) e tem os topos fechados com uma passagem isolante com eléctrodo central de um lado e uma “janela” muito fina do outro. Cada vez que uma partícula entra no detector ioniza uma certa quantidade de moléculas do gás. A componente negativa da ionização primária criada no gás, ie os electrões, descarrega-se totalmente no eléctrodo central mantido a um potencial positivo (ânodo). Depois desta descarga os iões positivos ainda se movem lentamente para o corpo do GM (cátodo). Nesta situação a diferença de energias entre o potencial de ionização do ião e o trabalho de extracção do material do cátodo pode ser suficiente para a extracção de electrões secundários ou fotoelectrões do cátodo. Estes electrões, atraídos pelo ânodo, podem iniciar uma nova descarga, a qual não corresponderá a partículas efectivamente detectadas. É para evitar o aparecimento destas descargas secundárias parasitas que é adicionado um agente de bloqueio (álcool ou halogéneo p. e.) ao gás inerte.

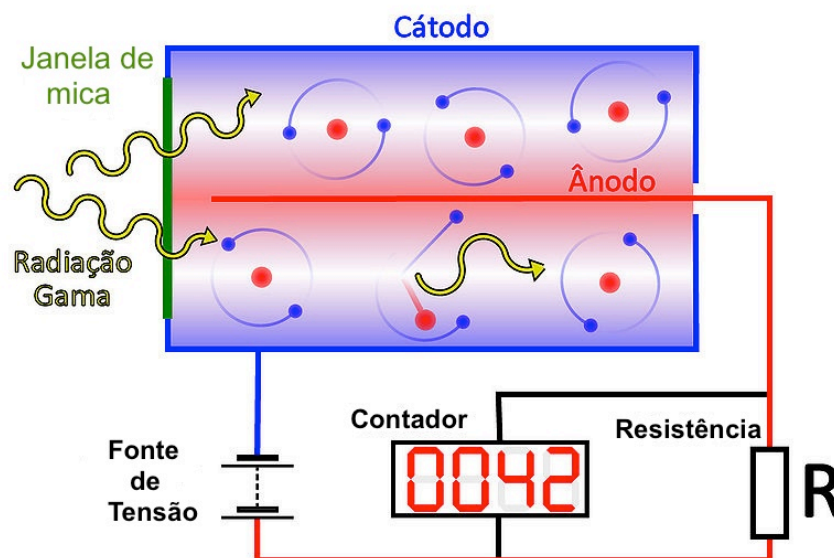


Figura 1: Esquema do detector GM

A) Detectores com bloqueio de descarga orgânico .

O agente de bloqueio típico para estes detectores é o álcool etílico na percentagem de 90 torr de argon para 10 torr de álcool. Os iões de argon, originados pela passagem de uma partícula, transferem a sua energia por colisão para as moléculas de álcool (o potencial de ionização do álcool é menor que o do argon) e, em seguida, o excesso de energia das moléculas de álcool é libertado por dissociação no cátodo do detector. A dissociação das moléculas de álcool é irreversível e por isso o tempo de vida útil destes detectores está limitado a cerca de 10^9

descargas (partículas). Além disso qualquer descarga interna originada por sobretensão do ânodo destruirá completamente o detector, por dissociação total do álcool.

B) Detectores com bloqueio de descarga por halogéneo .

O enchimento típico destes detectores é constituído por néon com a adição de 0,1% de argon e 0,1% de bromo (gasoso). O efeito bloqueador do bromo é semelhante ao do álcool mas com a vantagem de as moléculas de bromo se tornarem a regenerar depois da dissociação.

A adição de argon permite que os estados metaestáveis do néon possam transferir a sua energia (ionização) para o argon o que leva ao aumento do factor de multiplicação do gás, com o conseqüente abaixamento do valor do campo eléctrico necessário ao funcionamento eficaz do detector. O tempo de vida útil destes detectores é mais longo, cerca de 10^{13} descargas.

C) Para funcionarem correctamente os detectores GM são tipicamente incluídos num circuito semelhante ao da Figura 2 [2].

O circuito R_1C_1 limita a corrente de descarga desde que o forte impulso de carga (cerca de 10^9 electrões) cause uma queda de tensão suficiente na tensão do ânodo.

A resistência R_2 provoca uma queda de tensão e limita a corrente que irá percorrer o detector GM, o condensador C_2 separa a componente continua associada com a alta tensão do sinal do GM, deixando apenas passar o sinal alternado que será posteriormente invertido e amplificado.

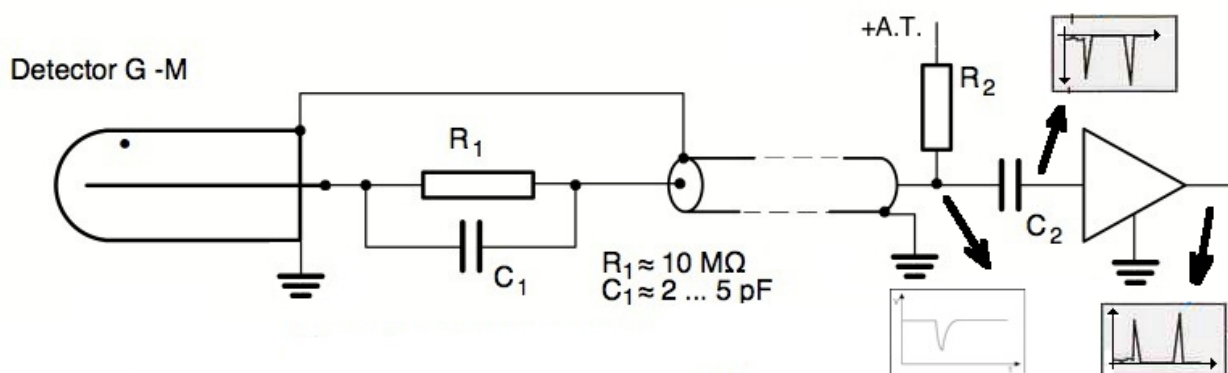


Figura 2: Detector GM e circuito de polarização

D) Características do patamar de um detector GM.

O detector GM deve funcionar com uma tensão que se situe entre a extensão do patamar de modo a evitar a deterioração acelerada do agente de bloqueio e aumentar assim o seu tempo de vida útil. O valor da tensão de funcionamento pode ser determinado a partir do diagrama característico do detector (Figura 3) [2] que para uma mesma fonte de ionização externa relaciona a variação da taxa de contagem de eventos com a tensão aplicada no ânodo. Neste diagrama a pendente do patamar é dada em (%) do aumento da taxa de contagem por cada 100V de aumento de tensão. O número de contagens irá depender da fonte radioactiva e do tempo em que o detector GM estará em funcionamento.

Esta pendente é devida ao aumento de volume virtual sensível do detector com o aumento da tensão de polarização. Com o aumento da polarização aumenta também a influência dos campos eléctricos axiais não uniformes presentes sobretudo na extremidade do ânodo.

Tipicamente esta zona relativamente constante – patamar, tem uma pendente da ordem de 1% para detectores com bloqueio álcool e até cerca de 10% para detectores com bloqueio halogéneo.

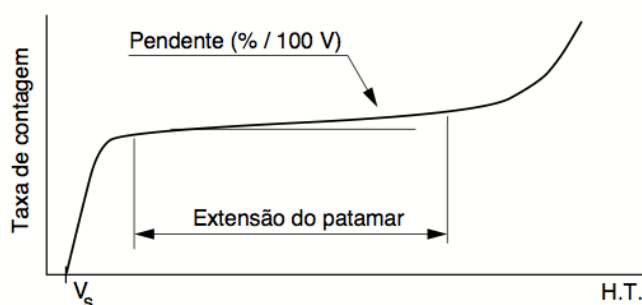


Figura 3: Diagrama característico do detector GM

No fim do patamar do lado da A.T. a curva sobe abruptamente devido à perda de eficiência do aditivo de bloqueio e consequente aparecimento de impulsos múltiplos para uma única partícula (micro-cascatas).

Como regra empírica podemos dizer que a tensão de funcionamento deve ser 50 a 100 V mais elevada que a tensão de início do patamar do detector. Uma indicação do envelhecimento do detector pode ser dada pela diminuição da extensão do patamar (de 1/2 a 1/4, da extensão original).

De seguida pode-se constatar um quadro comparativo entre características das fontes de alimentação para os dois tipos de enchimento de gás para o detector GM e para os três tipos de radiação:

Tabela 1 – Características dos detectores GM

Tipo	Detector Geiger- Muller	
	Organico	Halogénio
Mecanismo	Ionnização total e descarga por avalanche	
Tensão de funcionamento	0,8 → 1,6 kV	0,2 → 1 kV
Corrente de funcionamento	≈ 10 mA	≈ 50 μA
Característica para : α	Janela de mica ou mylar para α de alta energia	
β	Janela de mica ou mylar e paredes finas	
γ	Controle de radiação ≈ 50 keV → 10MeV	

Quando surgiu o detector GM a tecnologia das fontes de Alta Tensão, AT, de polarização era muito limitada. As alimentações AT eram construídas com de válvulas electrónicas que operavam como um oscilador de amplitude constante que alimentava um multiplicador de tensão do tipo Cockcroft-Walton onde se pode verificar a associação entre os díodos a-h e os condensadores C₁₅-C₂₂ (Figura 4).

Apesar de ser um circuito de simples se construção este tinha a desvantagem de ser alimentado com baterias de 200-300 Volt para se obter 1000 Volt na saída para alimentar o detector GM [3].

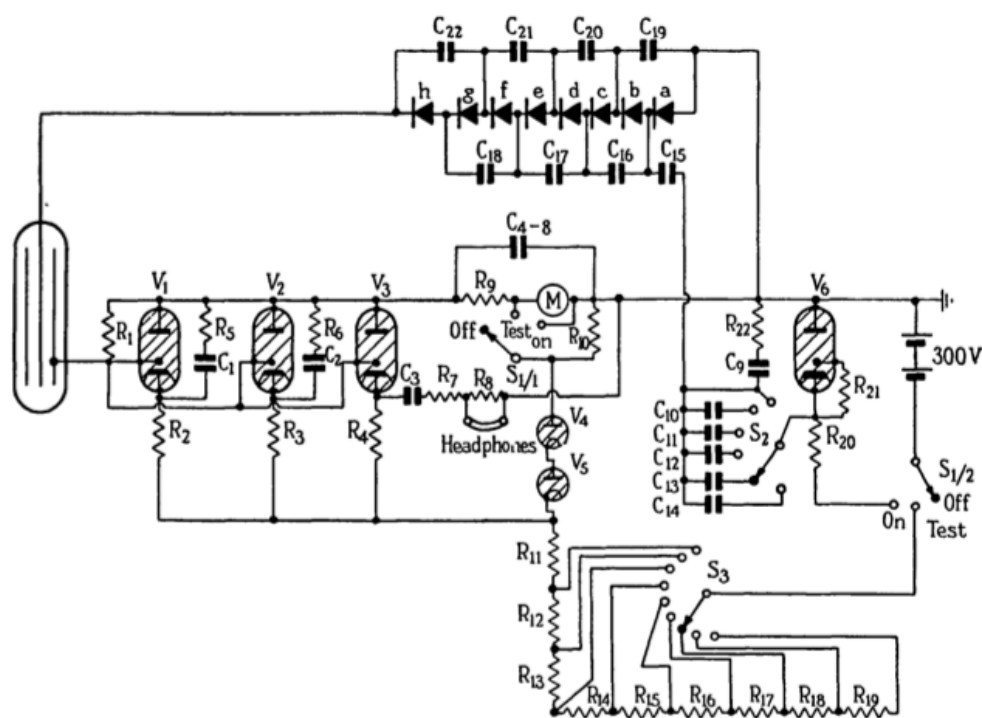


Figura 4: Circuito de contador de radiação incluindo o multiplicador de tensão para polarizar o detector GM

2.2. Fonte de alta tensão

Com este trabalho propõe-se projectar e construir uma fonte de alimentação de AT, destinada a polarizar detectores GM, com as seguintes características:

Tensão max: 1000 V; Corrente max: 1mA; Potencia: 1W.

Toda a estrutura da fonte de alimentação é apresentada na Figura 4.

O sistema de alimentação de um transformador de alta tensão tem por base a utilização de um inversor de tensão que converte uma tensão contínua numa tensão alternada.

A seguir a tensão alternada do secundário do transformador de alta tensão irá alimentar uma ponte rectificadora que por fim irá alimentar o detector GM.

Como se pode constatar, o conversor CC-CA pode ser alimentado de dois modos distintos, quer pelo rectificador controlado por tiristores, quer pelo conversor boost. Este por sua vez irá alimentar o transformador de alta tensão.

Na saída para o detector GM esta fonte possui um circuito de separação da polarização (alta tensão) – sinal de modo a poder extrair os impulsos correspondentes aos eventos detectados no GM.

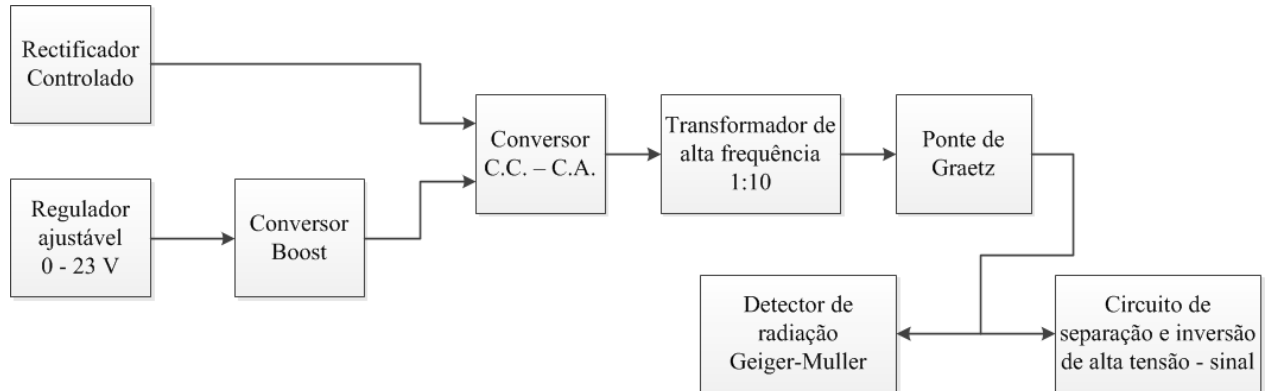


Figura 5: Diagrama de blocos da fonte de alta tensão para o detector GM

3. A fonte de alta tensão

Neste capítulo irá ser apresentado uma visão global de todo o sistema da fonte de alimentação. Dividindo o processo em subsistemas, será analisado detalhadamente o funcionamento de cada parte da estrutura.

3.1. Descrição e dimensionamento do rectificador em cadeia aberta

3.1.1. Comando do rectificador

O tiristor é passa ao estado de condução mediante um curto impulso de corrente injectado através da junção porta-cátodo, desde que a tensão ânodo-cátodo seja positiva ($V_{AK} > 0$).

O tiristor passa ao estado de corte quando a corrente que o atravessa for inferior à corrente de manutenção, I_H (holding current). Logo esta ocorrência só se regista se for causada pelo próprio circuito de potência onde o tiristor está inserido.

A passagem do tiristor à condução através de um impulso de disparo na junção gate-cátodo requer a satisfação de duas condições a saber:

- O tiristor tem de estar polarizado directamente (tensão ânodo-cátodo positiva);
- A corrente que o circuito de potência faz atravessar o tiristor tem de ser igual ou superior a um valor mínimo de lançamento, I_L (latching current). Na prática os disparos são lançados através das unidades de disparo dos tiristores (Figura 6) que permitem manter o isolamento galvânico do circuito de commando que gera os impulsos relativamente ao circuito de potência.

Unidade de disparo dos tiristores (UDT):

Os sinais de controlo gerados pelo circuito típicos como é o caso do integrado TCA 785 não podem ser enviados directamente para actuarem os semicondutores de potência devido ao facto do circuito de comando e do circuito de potência não terem a mesma referência de massas. Devido a este facto são usados acopladores ópticos ou transformadores de impulsos de modo a isolar galvânicamente o circuito de potência do circuito de comando. Neste caso foi usado o módulo PSTT PC/20 da PowerSem [9].

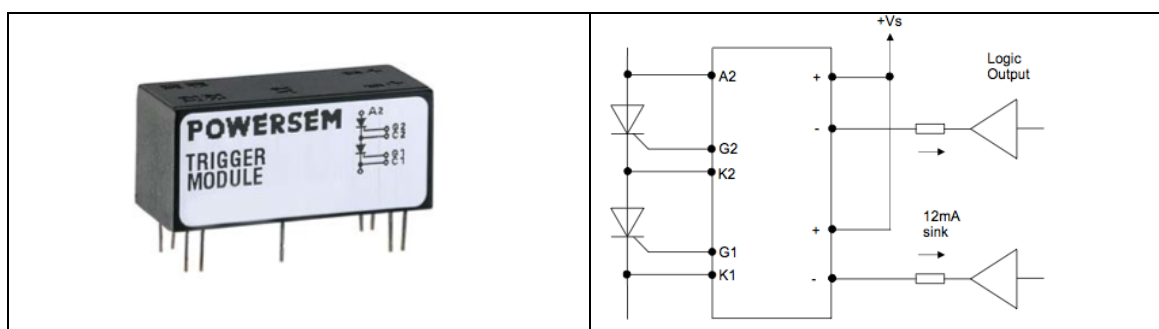


Figura 6: Unidade de disparo dos tiristores PSTT PC/20 e esquema de ligação

O funcionamento seguro destes dispositivos está limitado apenas pelo valor da tensão máxima de alimentação e da corrente de controlo (12mA), funcionando se a tensão da rede se situar entre os 115V e os 690Vrms.

3.2.2 Circuito gerador de impulsos para disparo dos tirístores

Para a geração dos sinais de disparo do rectificador a implementar no trabalho foi utilizado um circuito integrado (CI) TCA785. Como este integrado faz uso das funções auxiliares tipo rampa (dente de serra), para sincronizar o disparo com a passagem do zero da tensão da rede, é possível a geração de impulsos que podem variar entre um ângulo de 180° a 0° em cada alternância da tensão da rede, e que podem posteriormente ser aplicados a um circuito de disparo. Em particular este módulo integrado permite gerar dois sinais de disparo, desfasados de 180°, próprio para o comando de tirístores montados no mesmo braço de uma ponte. É um integrado prático e versátil pois permite ao utilizador a definição de vários parâmetros tais como, a amplitude do dente de serra, largura de impulso e ângulo de disparo.

Como existe uma diferença significativa na ordem de grandeza das tensões usadas no circuito de potência onde o tiristor está inserido e as usadas nos circuitos de comando do tiristor e controlo da potência a fornecer à carga o acoplamento entre o circuito de controlo e comando e a porta do tiristor irá ser efectuado com isolamento galvânico por acoplamento óptico.

O disparo do tiristor por acoplamento óptico é um processo adequado para enviar o sinal de disparo à porta do tiristor, sob a forma de um impulso. Na situação de disparo por impulso deve garantir-se uma corrente e tensão de comando acima de I_{GK} e V_{GK} (respectivamente, o valor mínimo da corrente e tensão porta-cátodo para o disparo do tiristor) e o tempo suficiente para que a corrente de ânodo exceda o valor da corrente de lançamento I_L sem, no entanto, exceder a máxima potência admissível na porta.

Neste contexto, o conhecimento das características do terminal de porta do tiristor é importante pois o início da condução do dispositivo, polarizado directamente, é determinado, geralmente, com a injeção de um impulso de corrente na porta. Para garantir o disparo o impulso de corrente deve ter uma amplitude e duração convenientes, além de que a tensão porta-cátodo deve sempre superar um valor mínimo.

O rectificador controlado baseia-se num circuito integrado TCA785, Figura 7 [8].

No circuito que inclui TCA785, o sinal de sincronismo é obtido pela queda de tensão em R_1 que liga ao pino 5 do integrado. Um detector de zeros avalia as passagens de tensão por zero transformando a informação num registo de sincronismo. O registo de sincronismo controla o gerador de rampa, constituído pelo condensador C_2 , que é carregado por uma corrente constante determinada pelo potenciómetro P_1 associado em série com uma resistência R_5 . Quando a tensão de rampa V_R excede a tensão de controlo V_C teremos o ângulo de disparo definido sendo o sinal processado e emitido para o circuito lógico. O ângulo de disparo pode variar num ângulo de fase entre 180° e 0°, dependendo da amplitude da tensão de controlo V_C .

No circuito da Figura 7 é feita a ligação do pino 12 a uma capacidade C_3 que permite que os impulsos tenham duração entre ϕ e 180°. Os impulsos gerados surgem nas saídas Q1 (pino 14), durante as alternâncias positivas e em Q2 (pino 15) durante as alternâncias negativas da tensão da rede.

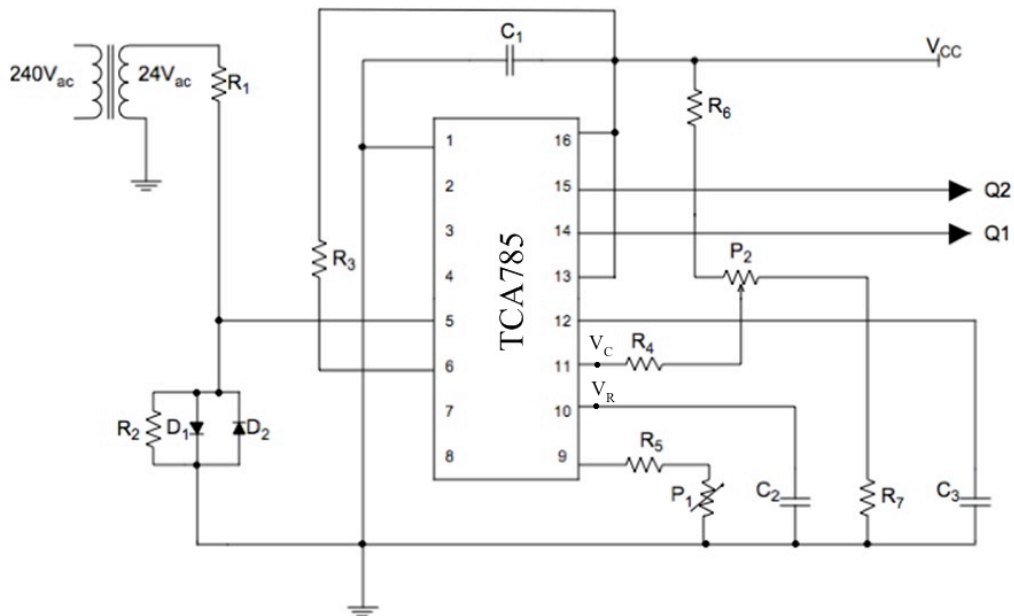


Figura 7: Circuito de comando do rectificador baseado no CI TCA785

O circuito de comando do rectificador tem como elemento principal o CI TCA785. Na Figura 8 [8] é apresentado o seu diagrama de blocos.

Internamente o integrado é alimentado por uma tensão regulada de 3,1V que é obtida através do pino 8. O sincronismo é obtido através de um detector de zero (pino 5) ligados a uma memória de sincronismo.

O gerador de rampa, cujo controlo está na unidade lógica, é baseado numa fonte de corrente constante que carrega o condensador C_{10} . Esta corrente é controlada pelo potenciómetro P_9 , que permite o ajuste da amplitude de rampa que vai a zero sempre que a tensão de sincronismo passa por zero, devido à saturação do transístor T_1 que está em paralelo com o condensador, como está indicado na Figura 8.

O condensador de controlo compara a tensão de rampa com a tensão de controlo: quando as tensões forem iguais o condensador envia impulsos às saídas através da unidade lógica.

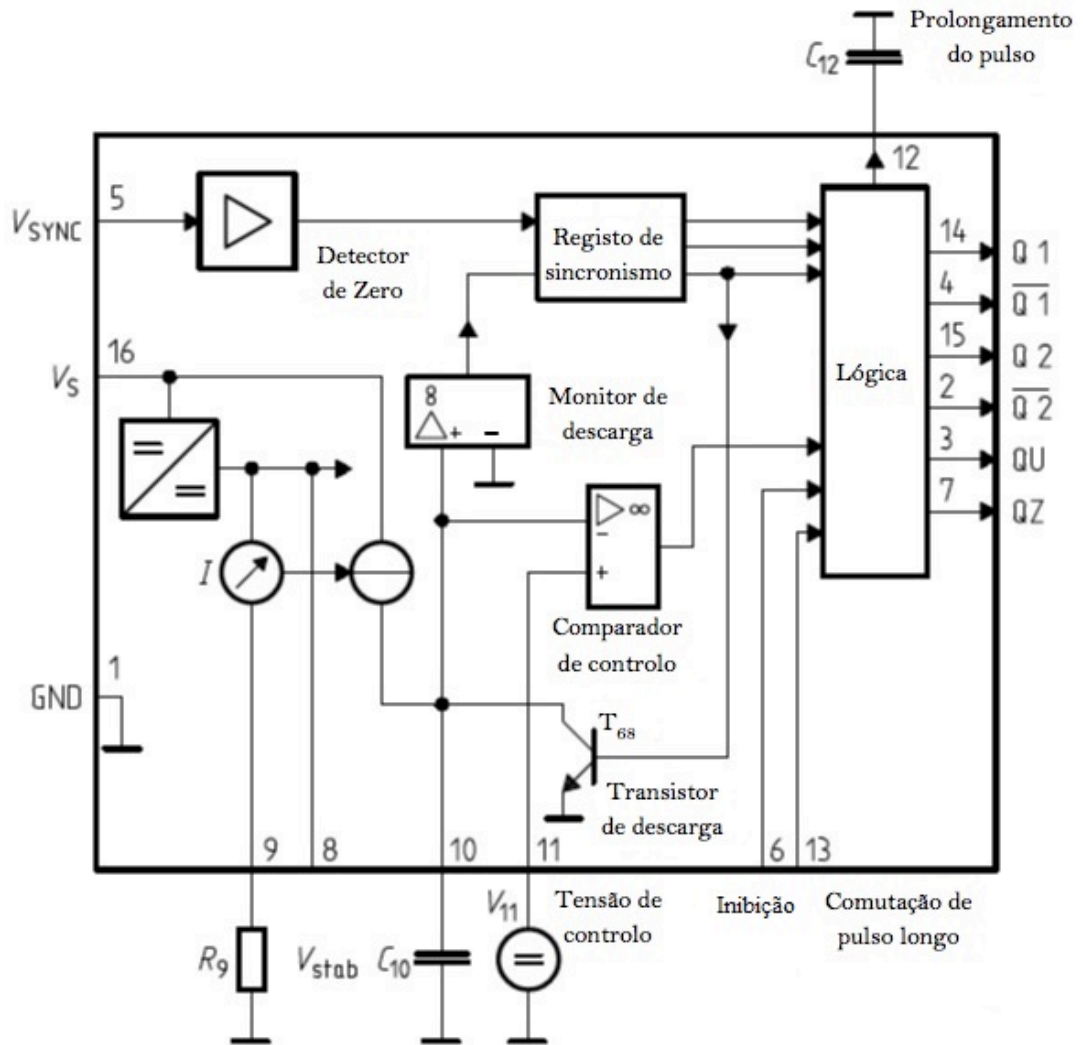


Figura 8: Diagrama de blocos do TCA785

No pino 15 são obtidos impulsos positivos no semi-ciclo positivo de tensão de sincronismo, desfasados 180° entre si. Esses impulsos têm uma largura determinada pela ligação de um condensador externo C_{12} , entre o pino 12 e a massa. O pino 6 quando ligado a um relé ou a um transistor PNP inibe todas as saídas do TCA 785.

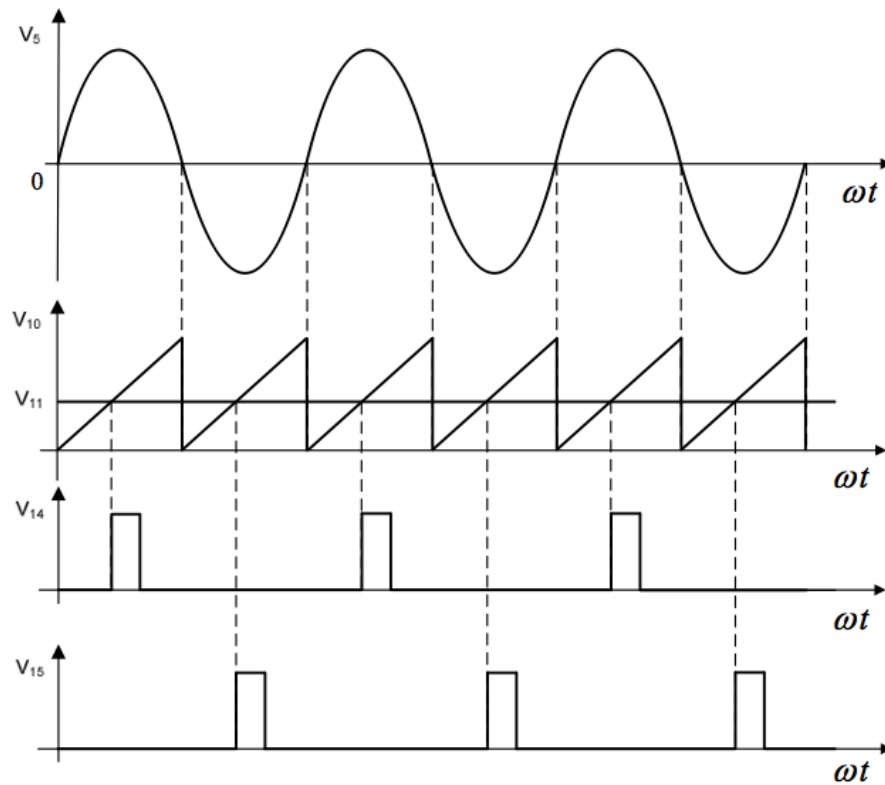


Figura 9: Diagrama temporal dos sinais do TCA785

Na Figura 9 estão representadas as formas de onda do TCA 785. Em que V_5 é a tensão de sincronismo, V_{10} é a onda dente de serra, V_{11} é a tensão de controlo e V_{14} e V_{15} são os impulsos gerados pelo TCA 785.

Resumindo na Figura 10 [5] está representado o diagrama de blocos de princípio para geração dos sinais de comando para o rectificador monofásico.

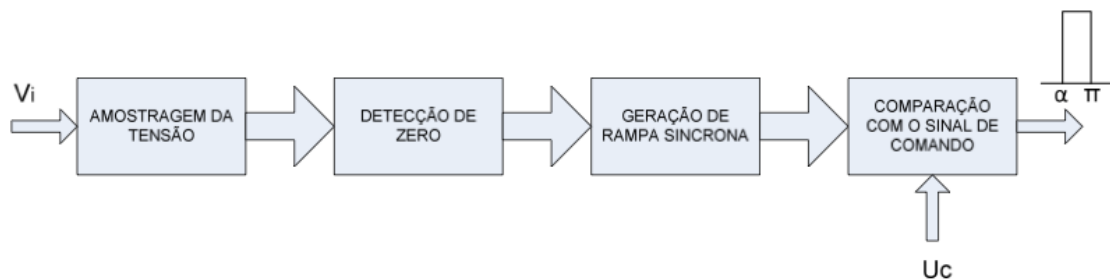


Figura 10: Diagrama de blocos da geração de sinais de disparo em pontes rectificadoras monofásicas

3.2.3 Circuito de disparo

Os circuitos usados para o disparo dos tiristores têm isolamento galvânico. Este facto deve-se não só à diferença na ordem de grandeza das tensões usadas no circuito de potência, onde o tiristor está inserido, e as usadas nos circuitos de comando e disparo do tiristor, mas também ao facto de os terminais de comando do tiristor estarem a potenciais diferentes dos da massa dos circuitos de potência, bem como à necessidade de protecção de pessoas e equipamentos.

Apresenta-se em seguida o dimensionamento das resistências do circuito inversor de sinal do TCA 785, para o funcionamento da UDT em “active low”.

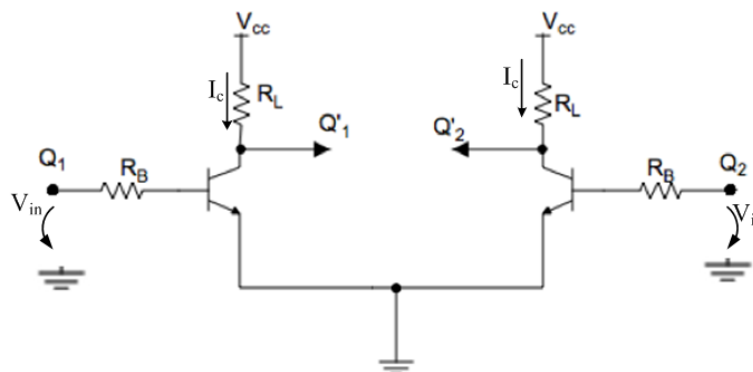


Figura 11: Circuito de inversão dos sinais de disparo do TCA785

Dimensionamento das resistências de base e colector dos transístores para o circuito inversor de sinal:

$$I_c \cdot R_L = V_{cc}$$

$$R_L = \frac{V_{cc}}{I_c} \Leftrightarrow R_L = \frac{15}{150e^{-3}} = 100\Omega$$

$$V_{in} = I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

$$R_B = \frac{15 - 0,6}{15e^{-3}} \Leftrightarrow R_B = 960 \approx 1k\Omega$$

Das técnicas usadas para transmitir sinais com isolamento galvânico, o acoplamento óptico (optoacoplador ou fibra- óptica para tensões mais elevadas) foi a escolhida.

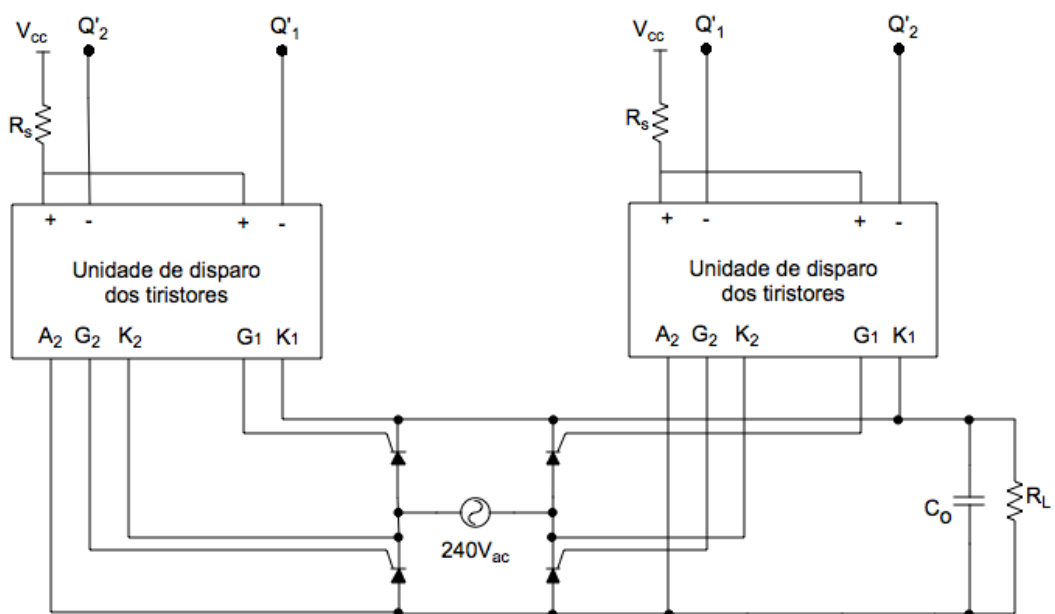


Figura 12: Circuito de disparo dos tiristores com isolamento galvânico por acoplamento óptico

É também necessário colocar uma resistência em série com a UDT (Figura 11) de modo a limitar a corrente uma vez que se a corrente pedida for superior à que a UDT pode suportar (12mA) esta perderá eficiência que se reflete ao nível do número total de horas de funcionamento.

$$R_s = \frac{V_{cc}}{I_{cm}} \Leftrightarrow R_s = \frac{15}{12e^{-3}} = 1,2k\Omega$$

3.3. Conversor boost

Na Figura 13 [6] apresentamos o esquema do conversor boost. A sua função é ampliar a tensão de entrada por um factor de 100/24 em relação à da saída, considerando a situação em que a fonte é alimentada pelo módulo NIM a 24V.

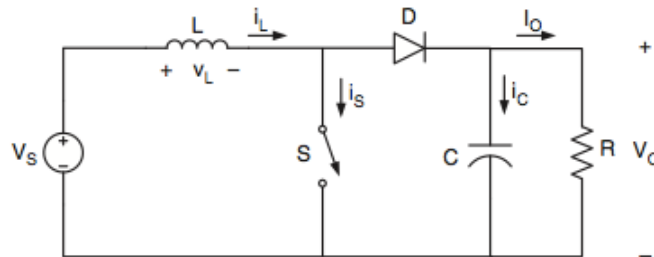


Figura 13: Circuito(esquemático) de potência do conversor boost

O funcionamento do circuito pode ser entendido considerando dois modos de funcionamento. No primeiro modo, quando o interruptor S está à condução, o diodo está polarizado inversamente, admitindo que o condensador C está carregado com a tensão de saída, isolando assim o estágio de saída, nesta situação a fonte V_S fornece energia à bobina. Quando o interruptor S está ao corte, o estágio de saída recebe energia tanto da bobine como da fonte V_S . Em regime permanente, assume-se que o condensador C tem um valor elevado de modo a garantir uma tensão de saída é aproximadamente constante para a constante de tempo de carga considerada.

A Figura 14 mostra as formas de onda em regime permanente:

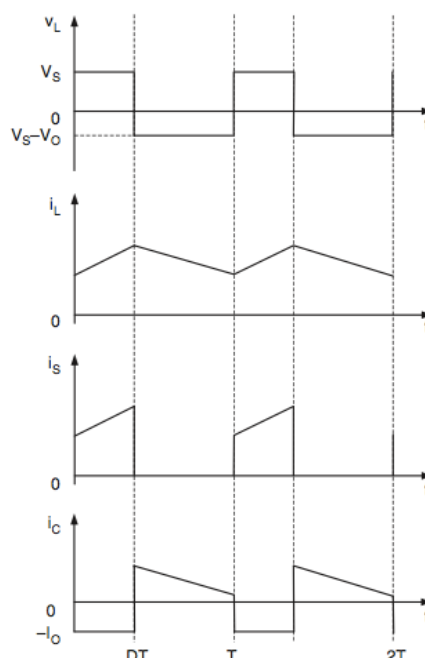


Figura 14: Formas de onda do circuito conversor boost

Para um funcionamento correcto temos que escolher uma frequência elevada:

1. Para o ripple da tensão de saída ser pequeno
2. Para o núcleo magnético da bobine ter dimensões reduzidas
3. Para diminuir a poluição sonora; a partir dos 20kHz a comutação dos semicondutores não é audível.

Para dimensionar o conversor teve-se em conta as seguintes considerações:

Cálculos para o dimensionamento do impulso de disparo na porta do IGBT:

$$U = 24V \quad f = 20kHz$$
$$V_o = 100V \quad T = 50\mu s$$

Como em regime permanente o valor médio da tensão na bobine (V_L) tem de ser nulo vem [7]:

$$V_s.t_{on} + (V_s - V_o).t_{off} = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

$$\frac{100}{24} = \frac{50\mu}{t_{off}} \Leftrightarrow t_{off} = 12\mu s \rightarrow t_{on} = 38\mu s$$

$$\frac{100}{24} = \frac{1}{1-D} \Leftrightarrow D = \frac{76}{100} \Leftrightarrow D = 0,76$$

Cálculo do dimensionamento da bobine (L) e do condensador (C) [6]:

$$L > \frac{(1-D)^2 \cdot D \cdot R}{2 \cdot f}$$

$$L > \frac{(1-0,76)^2 \cdot 0,76 \cdot 1 \times 10^3}{2 \cdot 20 \times 10^3} \approx 1mH$$

$$C_{\min} = \frac{D \cdot V_o}{V_r \cdot R \cdot f}$$

$$C_{\min} = \frac{0,76 \cdot 100}{1,1 \times 10^3 \cdot 20 \times 10^3} = 3,8\mu F$$

3.4. Conversor C.C. – C.A.

O sistema de alimentação do transformador de alta tensão é constituído por um inversor de tensão. Os inversores de tensão são conversores estáticos destinados a controlar o fluxo de energia entre uma fonte de tensão contínua e uma carga em corrente alternada monofásica ou polifásica, com controlo dos níveis do valor eficaz da tensão e da frequência, dependendo da aplicação. Neste trabalho será utilizada a configuração “ponte” como é indicado na Figura 15.

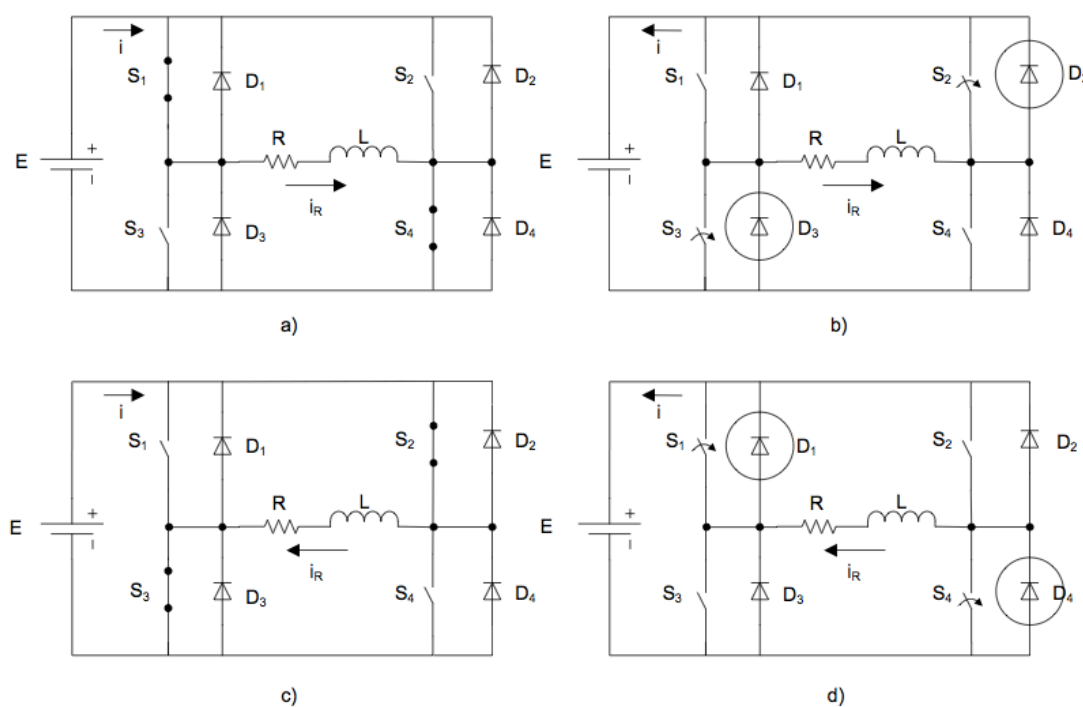


Figura 15: Etapas de funcionamento do inversor monofásico em ponte com carga indutiva

Etapas de funcionamento do conversor c.c. - c.a. para uma carga resistiva:

- S_1 e S_4 estão à condução
- Tempo morto: S_1 , S_2 , S_3 e S_4 estão em aberto
- S_2 e S_3 estão à condução
- Tempo morto: S_1 , S_2 , S_3 e S_4 estão em aberto

Com carga é indutiva um transformador de impulsos, implica que devem ser adicionados diodos de roda livre $D_{1,2,3,4}$, como está representado na Figura 15 [4], onde também aparecem as 4 etapas de funcionamento da estrutura como se pode constatar também na Figura 16.

Para o circuito da Figura 15 funcionar correctamente é necessário que a fonte E absorva corrente, para os casos em que a carga é indutiva.

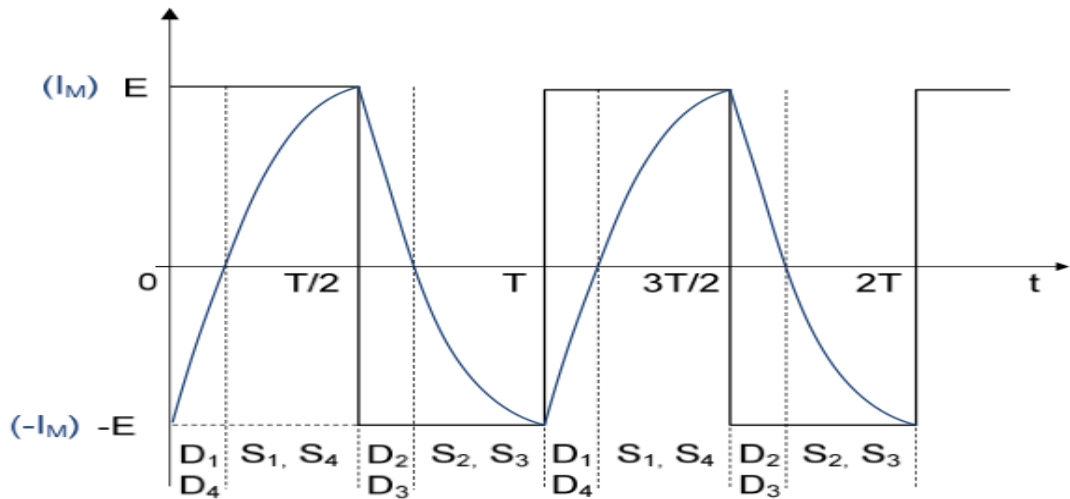


Figura 16: Formas de onda para o circuito da Figura 13

Para este projecto será utilizado uma modelação por impulsos múltiplos e iguais mas desfasados entre si com uma razão de ciclo constante previamente calculada de acordo com as características magnéticas do circuito a jusante do inversor, como se pode observar na Figura 17.

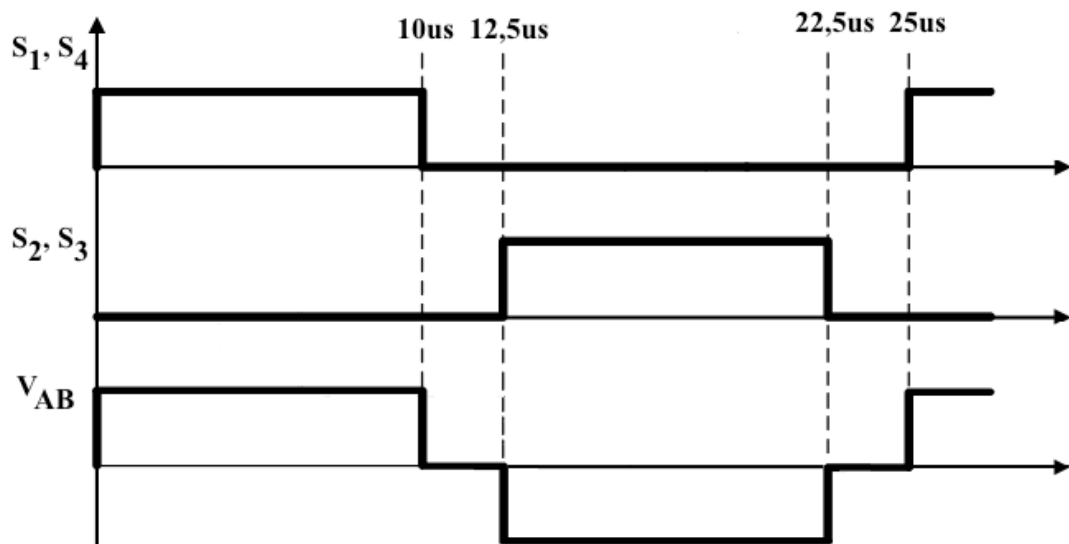


Figura 17: Diagrama temporal dos impulsos nas gates dos SP (semiconductor de potência) e tensão V_{AB}

Tendo em consideração que inversor estará a alimentar um transformador (disponível) de alta frequência a 25 kHz com uma tensão máxima de 100 V, com um fluxo Φ_{\max} de 2,5 mWb, tem-se:

$$\Phi_{\max} = \int_0^{T_{on}} V_p \cdot dt$$

$$2,5 \times 10^{-3} = V_p [T_{on} - 0] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow T_{on} = \frac{2,5 \times 10^{-3}}{100} = 25 \mu s$$

Conclui-se assim que para o transformador não saturar, ao aplicar um impulso de 100 V no primário do transformador este só poderá ser aplicado no máximo durante 25 μ s.

3.5. Implementação do Inversor de Tensão

Para dimensionar um sistema de alimentação de um transformador de alta tensão é necessário a implementação de um inversor de tensão. Este inversor converte a tensão do barramento CC numa tensão CA (Figura 18).

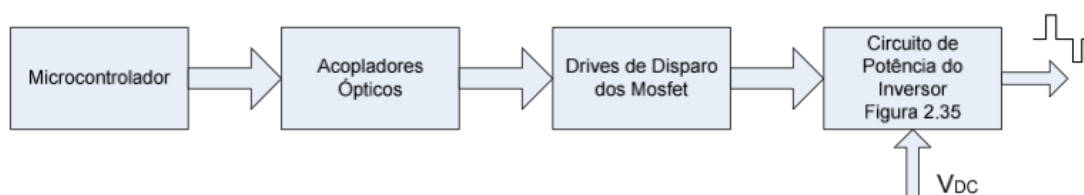


Figura 18: Esquema de blocos do inversor de tensão

Microcontrolador: a geração dos sinais de comando dos SP é efectuada através de um microcontrolador PIC. Este deverá ser programado de modo a executar os sinais anteriormente dimensionados, e essencialmente respeitar os tempos mortos na comutação de dispositivos pertencentes ao mesmo braço.

Na programação do microcontrolador o software de programação usado para implementar o código em linguagem C foi o MPLAB IDE.

Para enviar o código criado no MPLAB para o microcontrolador PIC é necessário o uso de um programador. O programador usado foi o ICD2USB.

Acopladores Ópticos: os sinais de controlo gerados pelo microcontrolador não podem ser enviados directamente para actuarem os semicondutores de potência devido ao facto do circuito de comando e do circuito de potência não terem a mesma massa. Por isso são usados acopladores ópticos de modo a isolar galvânicamente o circuito de potência do circuito de comando. Estes acopladores baseiam-se numa ligação entre a entrada e a saída através de fotodíodos, tal como é mostrado na Figura 19. O acoplador óptico usado foi o HCPL-2232 da Hewlett Packard [10].

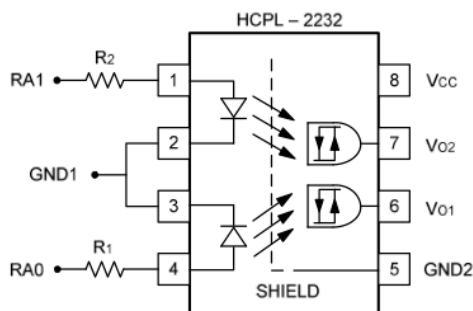


Figura 19: Esquema dos Acopladores Ópticos HCPL-2232.

O isolamento completo entre o microcontrolador e o circuito de potência é garantido pelo uso de fontes CC-CC, com isolamento galvânico entre a entrada e saída, neste caso foram usadas Traco Powers, ligadas aos acopladores no lado isolado para garantir que os sinais enviados para os semicondutores tenham massas diferentes e assegurem níveis de tensão adequados para a comutação correcta dos semicondutores.

Foi também necessário colocar resistências em série com os fotodiodos (Figura 19) de modo a limitar a corrente pedida ao microcontrolador, R_1 e R_2 . Se a corrente pedida pelos fotodiodos for superior à máxima fornecida pelo microcontrolador diminui o nível de tensão dos sinais de saída do PIC.

3.6. O transformador de alta frequência e ponte de diodos

Neste trabalho foi utilizado um transformador disponível com os seguintes parâmetros:

Tabela 2 – Parâmetros do transformador de alta frequência

$n = N_2/N_1 = 10,38$	$R_2 = 0,125 \text{ ohm}$
$R_1 = 0,094 \text{ ohm}$	$X_2 = 81,46 \times 10^{-6} \text{ henry}$
$X_1 = 50 \times 10^{-6} \text{ henry}$	$\Phi_{\text{max}} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ Vs}$
$X_m = 8,393 \times 10^{-3} \text{ henry}$	

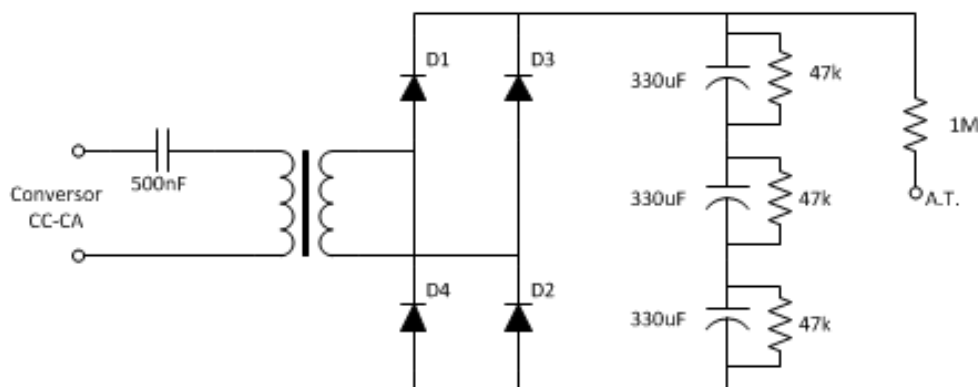


Figura 20: Circuito do transformador de impulsos com a ponte de diodos.

O condensador de 500nF colocado em série entre a saída do conversor cc-ca e o transformador tem como utilidade cortar qualquer possível componente contínua que possa aparecer do conversor cc-ca de forma a evitar a saturação do núcleo do transformador.

Voltímetro

A tensão aplicada no detector GM é visualizada por leitura directa num voltímetro digital LASCAR DPM 490.



Figura 21: Voltímetro digital LASCAR DPM 490

Este voltímetro só permite ler tensões até 60V. Para funcionar correctamente dimensionou-se um divisor de tensão, Figura 22:

$$V_{in} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{out}$$

$$1000 = \frac{115k}{10M + 115k} \times V_{out} \Leftrightarrow V_{out} = 11,37V$$

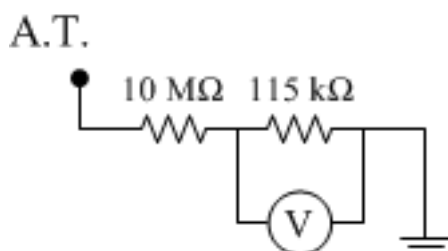


Figura 22: Divisor de tensão do voltímetro

3.7. Circuito de separação de alta tensão e inversão do sinal do GM

Os impulsos originados no GM pela radiação têm polaridade negativa. Assim para poder-se alimentar uma lógica digital – sinais positivos – é necessário inverter os sinais provenientes do GM.

Simultaneamente é necessário eliminar a componente contínua de A.T. do sinal original do GM. Para isso desenvolveu-se o circuito de separação e inversão de sinal GM.

Neste circuito (Figura 23) a componente AT é eliminada pelo condensador C6 e é invertida no transistor Q1 do sinal que vem do detector GM que posteriormente é amplificado nos transístores Q2 e Q3.

De seguida o sinal entra no circuito do Monoestável (Figura 25) que fornece impulsos rectangulares (TTL) ao módulo de contagem de impulsos.

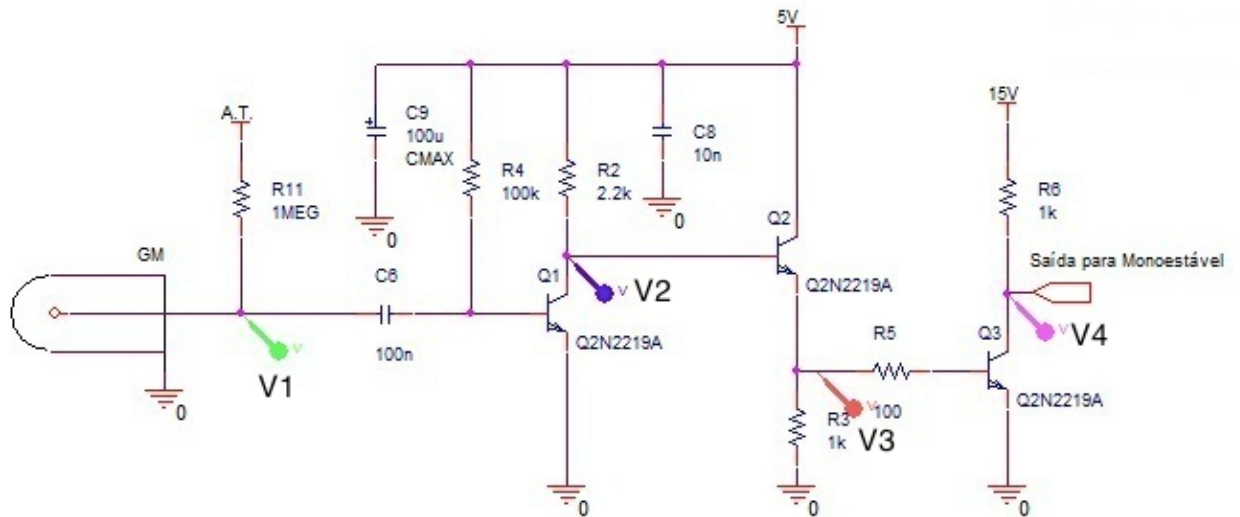


Figura 23: Circuito inversor e amplificador do sinal do detector GM

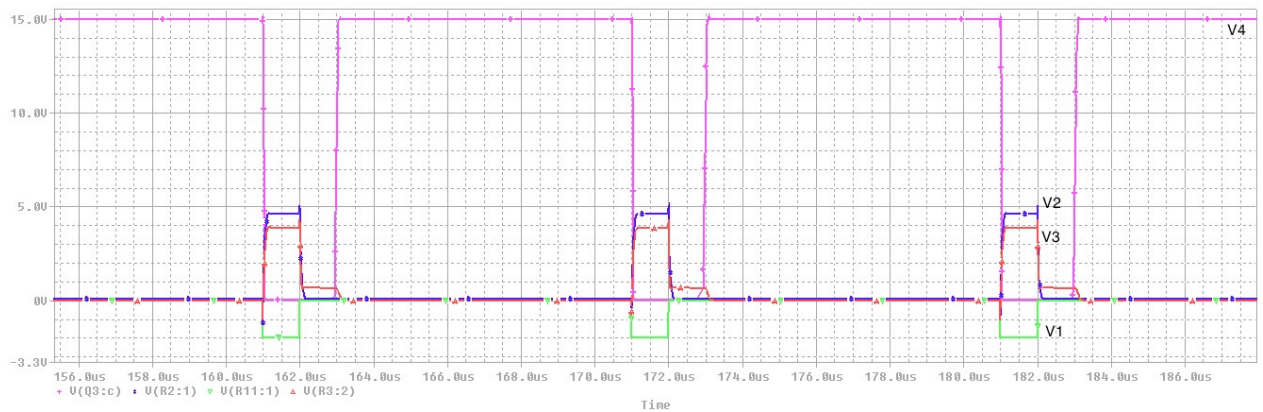


Figura 24: Resultados da simulação do circuito inversor e amplificador do sinal do detector GM (Fig. 23)

Como é possível constatar, após a simulação do circuito da figura 21, o impulso de entrada (onda verde (V1)) apenas mostra o impulso negativo, simulando o GM, e não a AT visto que usou-se o bloco *vpulse* da biblioteca do *OrCAD*. A onda a azul (V2) à saída do transistor Q1 mostra o impulso invertido tal como era pretendido com a montagem inversora. De seguida a onda a vermelho (V3) mostra uma montagem seguidora de tensão já que é semelhante à onda azul (V2), que por sua vez é invertida novamente e ampliada de modo a poder alimentar o monoestável (Figura 25).

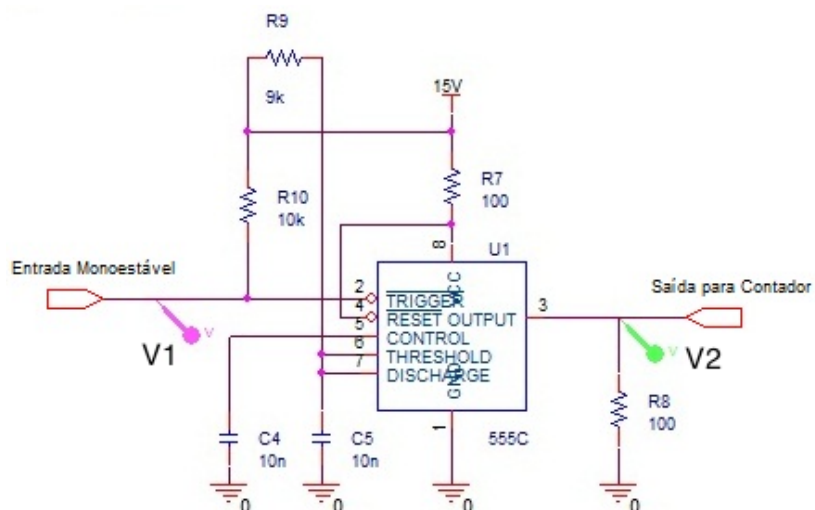


Figura 25: Circuito monoestável

De seguida apresenta-se o resultado da simulação da Figura 25:

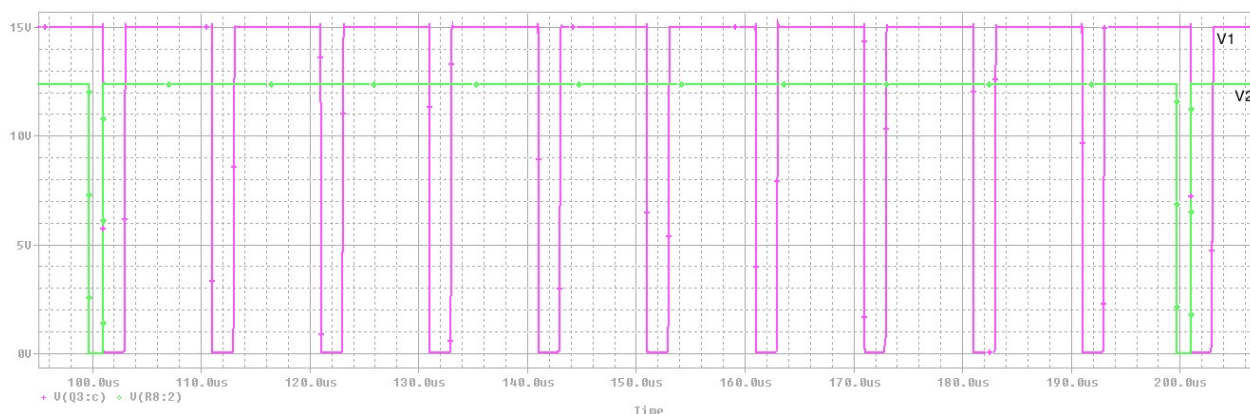


Figura 26: Resultados da simulação do circuito monoestável (Fig. 25)

Com os resultados da Figura 26 apenas se pretende mostrar o tempo morto do detector GM por um período de 100 us, em que a onda a roxo mostra os impulsos emitidos pelo GM e a onda a verde os eventos que são contados.

3.8. Visualização de contagens

Os impulsos originados no GM depois de digitalizados tem de ser visualizados para o utilizador num bloco de contagem e com limitação do tempo de contagem.



Figura 27: Contador electrónico 520 (6 dígitos) com timer

O contador com preset em tempo utilizado é um *Kubler Codix 520* (Figura 27). O circuito do timer (ver anexo E) faz o “enable” da a contagem de impulsos em intervalos de tempo fixos (nesta configuração: 300 segundos).

Tabela 3 – Configuração dos parâmetros do contador e do timer

Configuração do contador Codix 520	Configuração do Timer Codix 523
1. INPOL: PNP	1. INPOL: NPN
2. FILTER: OFF	2. FILTER: OFF
3. dp: 0	3. START: GATEHI
4. RESNrE: MANrE	4. MODE: SEC
	5. dp: 0
	6. RESNrE: MANrE
	7. SETPt: 0
	Ligar ao input B

4. Resultados de simulação e experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados tanto para o rectificador em cadeia aberta em ambiente Matlab/Simulink, como para o inversor de tensão e circuito de separação AT-sinal em OrCAD. Esta opção de simular o rectificador em Matlab/Simulink é devia ao facto do OrCAD não dispor do componente TCA 785 na biblioteca de componentes.

Na secção 4.1 serão apresentados os resultados das simulações relativas ao rectificador em cadeia aberta, na secção 4.2 o resultado da simulação do conversor boost e na secção 4.3 será apresentado os resultados referentes à simulação do inversor de tensão. Na secção 4.4 serão apresentados os resultados experimentais que irão permitir efectuar uma comparação destes com os resultados simulados.

4.1. Resultados de simulação do funcionamento rectificador em cadeia aberta

O rectificador a construir tem como opção o controlo da tensão de saída em cadeia aberta.

Na Figura 28 apresenta-se o esquema global do modelo utilizado para a simulação do rectificador seja em cadeia aberta, realizado em MATLAB/SIMULINK, para uma tensão de referência (V_{ref}) de 8.5 Volt. Este V_{ref} varia entre 10 Volt, valor mínimo que corresponde a um ângulo de 180° , e 7 Volt, valor máximo que corresponde a um ângulo de 126° .

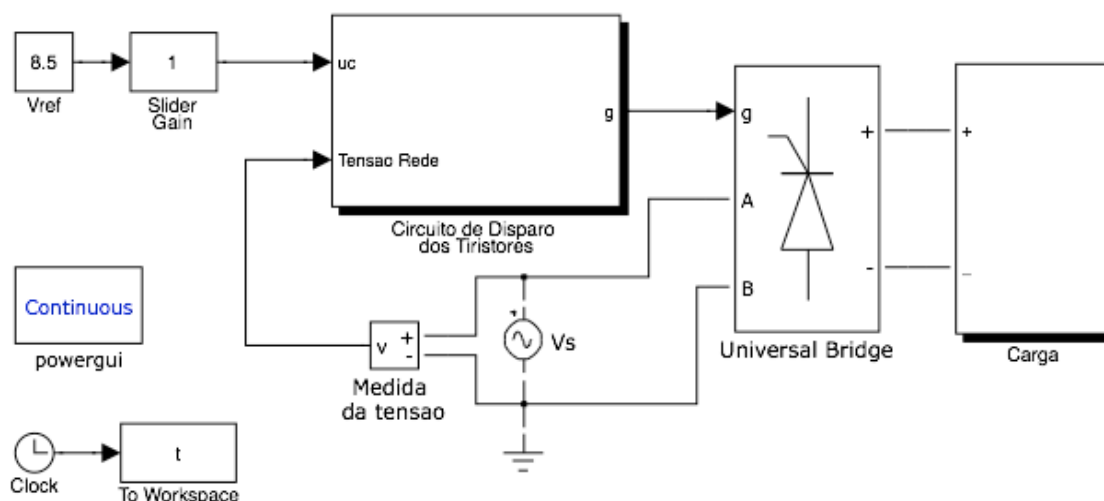


Figura 28: Modelo de simulação do rectificador em cadeia aberta

A Figura 29 mostra um modelo matemático do TCA 785 de modo a poder-se simular o disparo dos tiristores do bloco *Universal Bridge* da Figura 28:

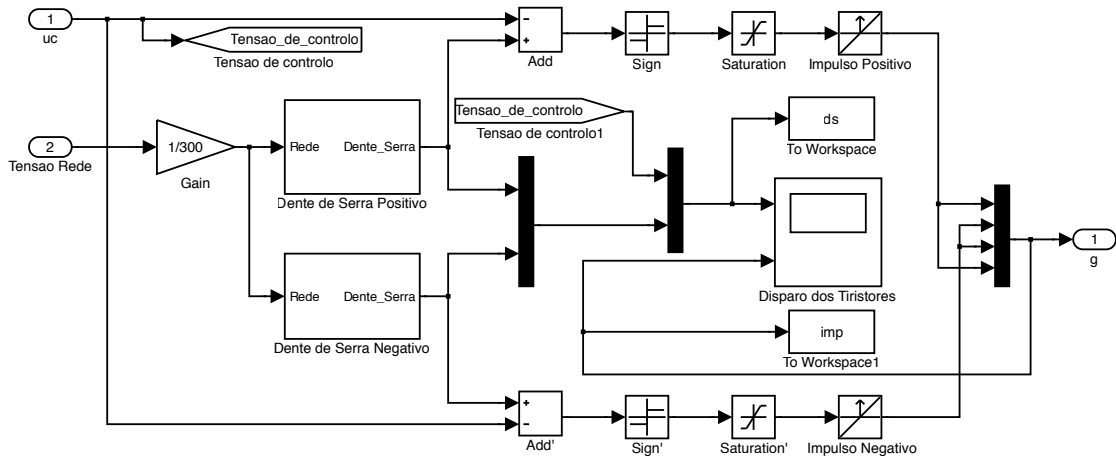


Figura 29: Modelo de simulação do bloco do circuito de disparo dos tiristores

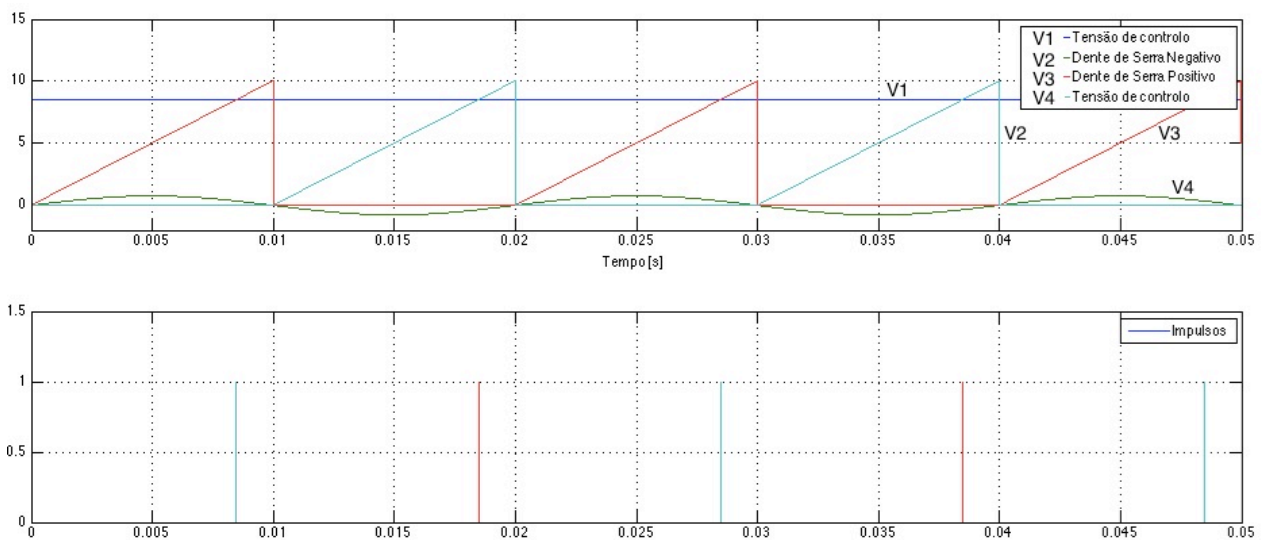


Figura 30: Resultado da simulação do modelo do circuito de disparo dos tiristores (Fig. 26)

Na Figura 30 é representado a simulação dos impulsos aplicados nos tiristores de modo a reproduzir no barramento DC uma tensão próxima de 90 V.

O modelo representado na Figura 31 permite visualizar o funcionamento de uma ponte rectificadora monofásica, um filtro RLC com resistência R_0 em paralelo com o condensador C (de modo a reproduzir o sistema de carga) de acordo com os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parametros de simulação do modelo de simulação do bloco da carga do rectificador

Parâmetros	Descrição	Valores	Unidades
V_s	Tensão de alimentação AC	230	V
R_t	Resistência do filtro RLC	0,4	Ω
L_t	Indutância do filtro RLC	1,8	mH
C_t	Capacidade do filtro RLC	150	μF
R_0	Resistência de carga	2,2	k Ω

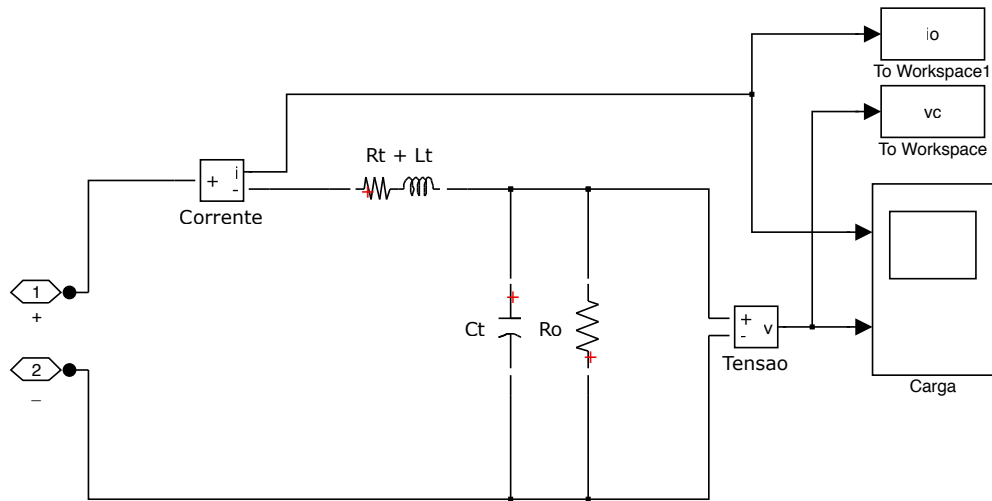


Figura 31: Modelo de simulação do bloco da carga do retificador

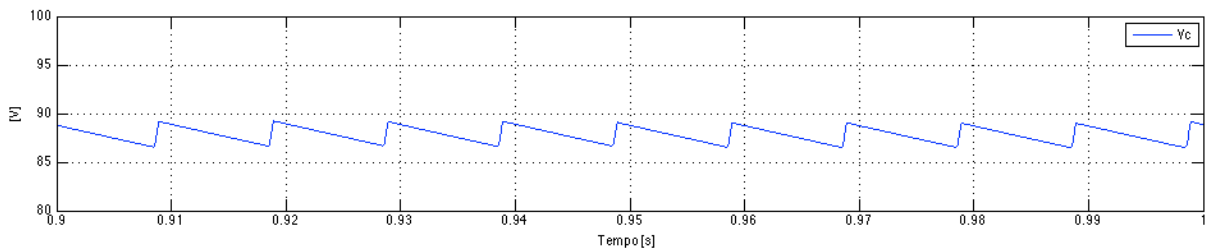


Figura 32: Resultado da simulação da tensão no condensador C

Na Figura 32 pode-se verificar a evolução do modelo de tensão na carga no condensador quando este alimenta uma carga de 2,2 k Ω .

4.2. Conversor Boost

Esquema do circuito do conversor Boost (Figura 33) utilizado na simulação para uma tensão máxima de 24 Volt que corresponde a tensão de alimentação do módulo NIM. Esta tensão pode ser variável desde 0 Volt a 24 Volt através do regulador de tensão LM350T.

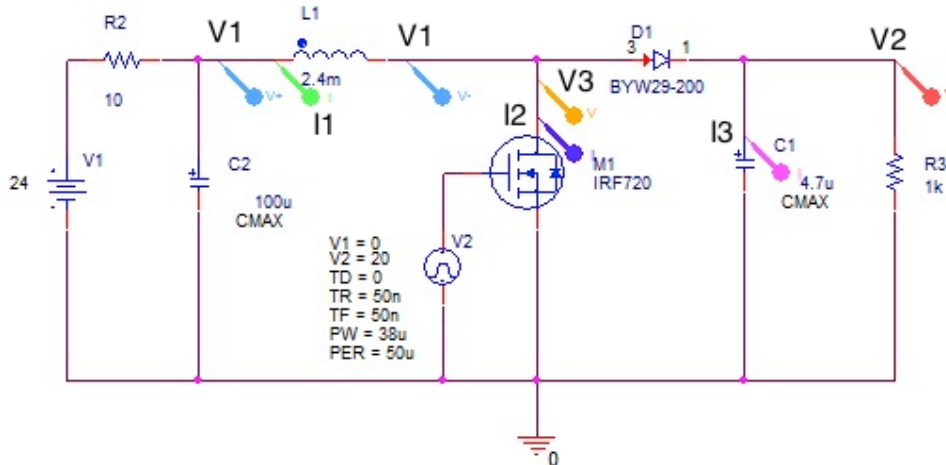


Figura 33: Circuito do conversor Boost

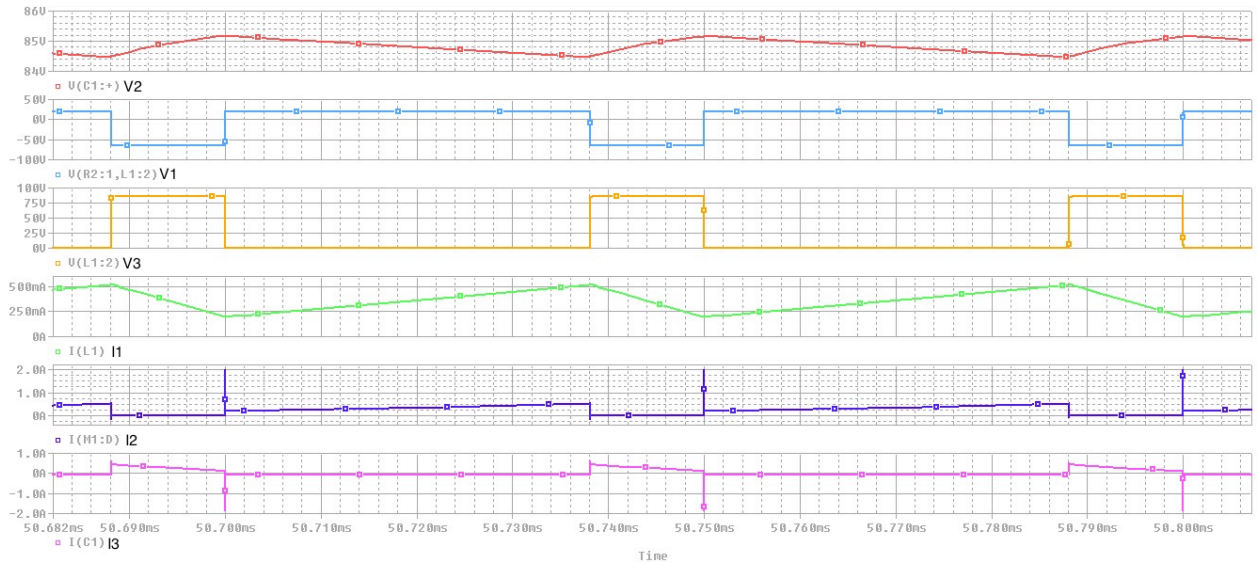


Figura 34: Resultado da simulação do circuito do conversor Boost (Fig. 33)

Verifica-se que os resultados simulados coincidem com os teóricos, em que a segunda e quarta ondas são a tensão e corrente na bobine respectivamente, a terceira e a quinta onda são a tensão e corrente no SP M1 e por fim a sexta onda é a corrente no condensador.

Também se simulou a tensão na carga como se pode constatar na primeira onda em que se verifica um pequeno ripple como era pretendido. Como a corrente máxima da fonte de 24V do módulo NIM é inferior 1 Ampère se verifica que a corrente que atravessa a bobine cumpre esse requisito.

4.3. Conversor CC-CA

Para simulação do funcionamento do inversor de tensão monofásico em ponte foi construído em OrCAD o modelo representado na Figura 35 para a tensão máxima de funcionamento de 100 Volt. Esta tensão pode variar desde 0 Volt até 100 Volt.

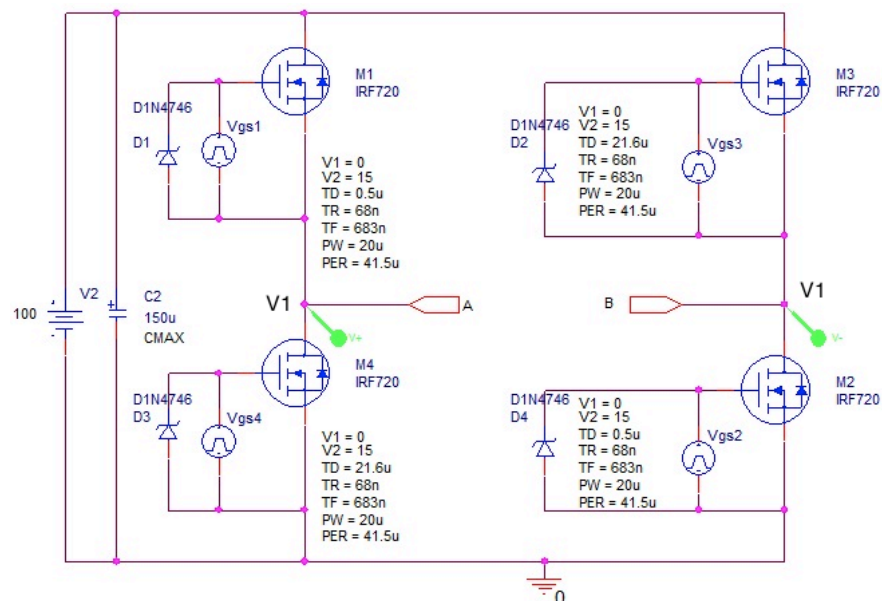


Figura 35: Modelo de simulação do circuito inversor monofásico

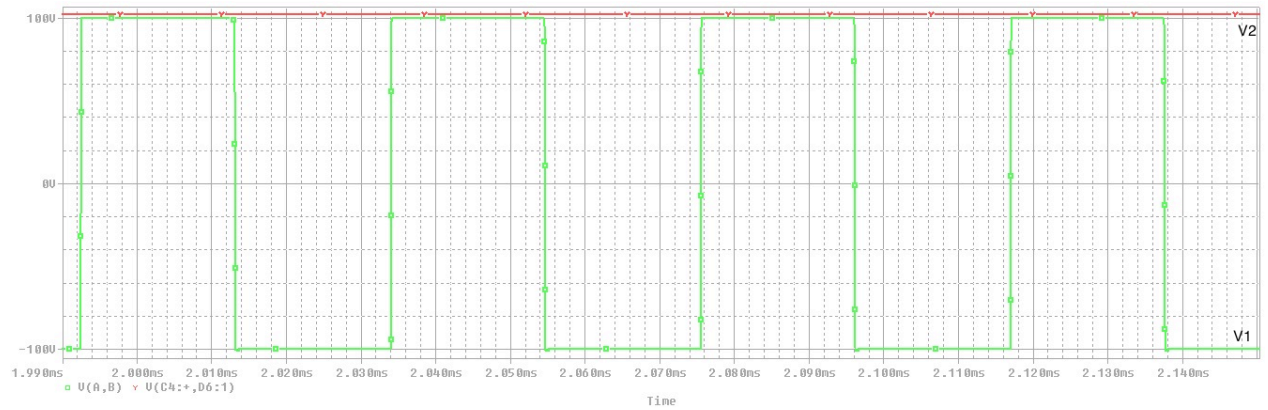


Figura 36: Resultado da simulação do circuito inversor monofásico (Fig. 35) e ponte de díodos (Fig.37)

A Figura 36 mostra os resultados à saída do circuito monofásico a verde e à saída ponte de díodos a vermelho na Figura 37.

À que ter em consideração que o resultado da simulação não corresponde à realidade uma vez que o modelo do transformador não inclui a relação de transformação de 1/10, daí a tensão no primário ser igual à do secundário

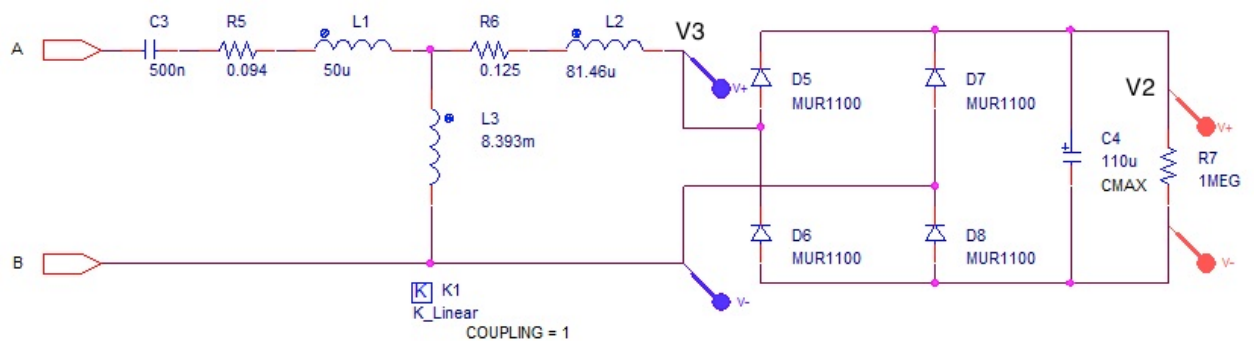


Figura 37: Modelo da simulação do transformador de impulsos e ponte de díodos

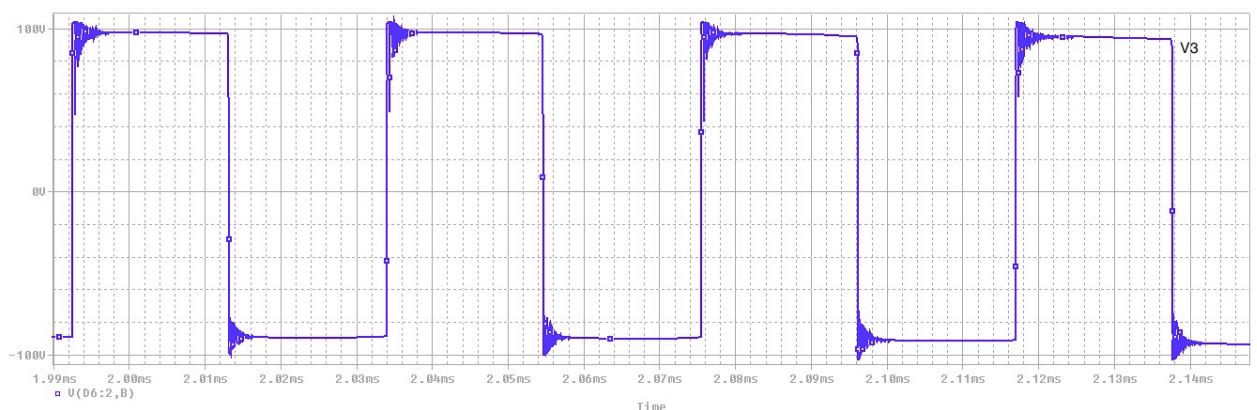


Figura 38: Resultados da simulação do transformador de impulsos (Fig. 37)

A figura 38 mostra o resultado da simulação do secundário do modelo em T do transformador de impulsos.

4.4. Circuito separador AT-Sinal

É apresentado em baixo o esquema do circuito separação AT-sinal (Figura 39) e resultado da respectiva simulação para um impulso de 1us com período de 10 us por forma a poder simular uma possível ocorrência do detector GM, isto é, a cada 10 us o GM detecta um evento. A largura dos impulsos que o GM detecta são de um modo geral na ordem dos micro-segundos, portanto a escolha de 1us foi feita com base em [2].

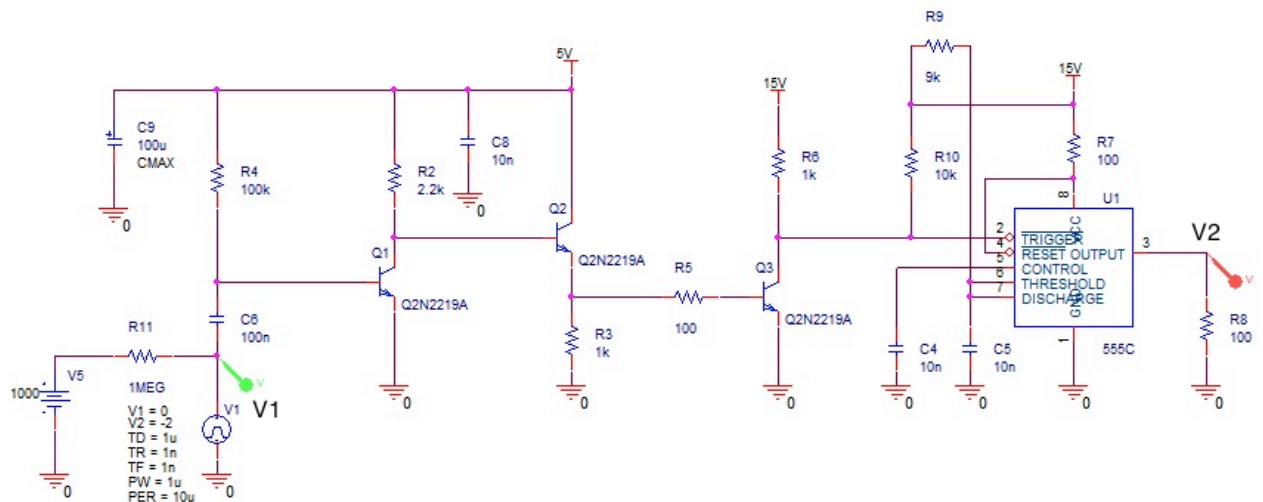


Figura 39: Modelo de simulação do circuito separador AT - sinal

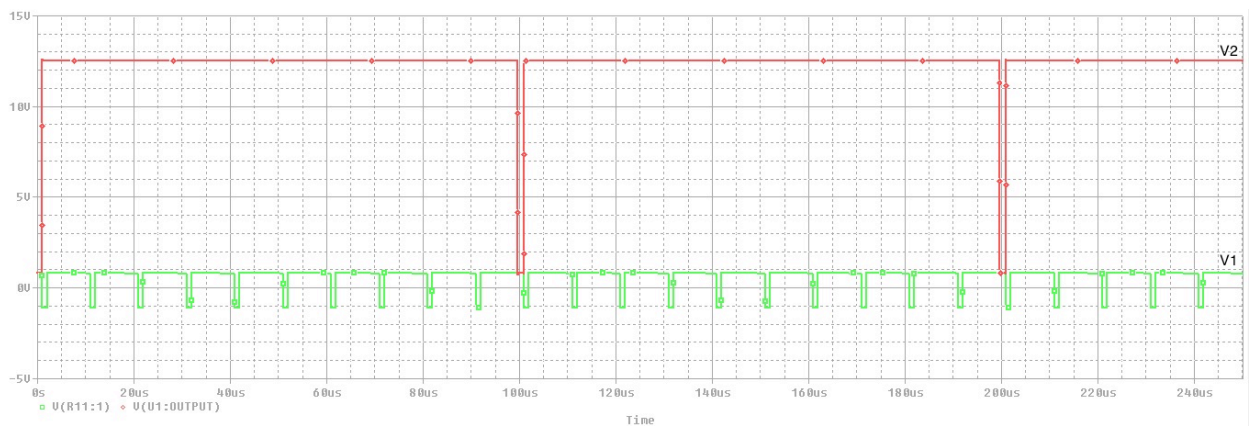


Figura 40: Resultados da simulação do circuito separador AT – sinal (Fig. 39)

A Figura 40 mostra a simulação do impulsos do detector GM (onda a verde) e a vermelho os impulsos que o circuito monoestável irá processar num período de 100us. Esta simulação é apenas hipotética uma vez que as fontes radioactivas não libertam radiação seja de que tipo for a uma frequência constante.

4.5. Resultados experimentais

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos do rectificador totalmente controlado (em cadeia aberta) e também do inversor de tensão. Depois da implementação prática e respectivos testes foi realizado um teste com o sistema completo, rectificador controlado / inversor / transformador de AT / Ponte de diodos.

4.5.1. Rectificador totalmente controlado em cadeia aberta

Com o rectificador totalmente controlado espera-se a conversão da tensão alternada da rede numa tensão contínua, para posterior aplicação no inversor de tensão. Em cadeia aberta o valor desta tensão contínua é controlado por variação da resistência do potenciômetro P₂ da Figura 6, que define o valor do ângulo de disparo dos tiristores.

A Figura 41 mostra a tensão de amostragem da tensão da rede (CH3) e a rampa síncrona com a tensão da rede (CH2).

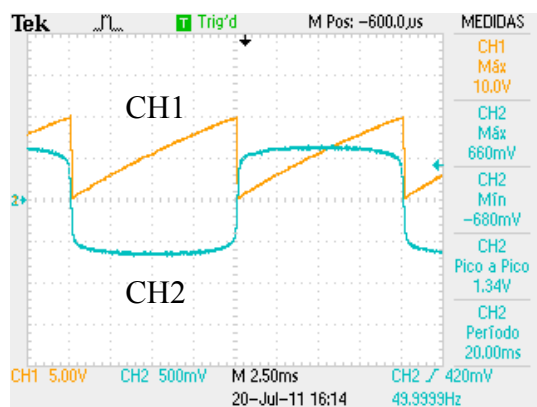


Figura 41: Tensão dente-de-serra obtida através da tensão de amostragem da rede.

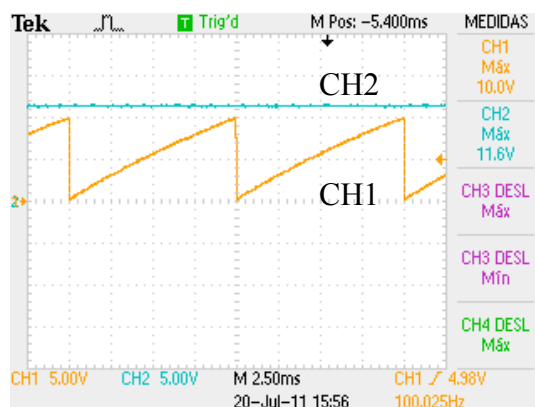


Figura 42: Sinais de comando U_c e rampa de sincronismo em t = 0

Do resultado da comparação desta rampa de sincronismo com a tensão de comando definida pelo potenciômetro P₂ resulta a geração dos impulsos de disparo dos tiristores do rectificador.

Este funcionamento é mostrado nas figuras seguintes. A Figura 42 mostra o momento inicial em que os sinais de devem sempre encontrar no momento em que se liga a alimentação 230 V_{AC} ao rectificador. Como inicialmente o barramento de condensadores está descarregado, o ângulo de disparo dos tiristores terá de variar gradualmente de modo a que não sejam aplicadas grandes diferenças de potencial aos respectivos condensadores, de modo a evitar picos de corrente que possam danificar os componentes.

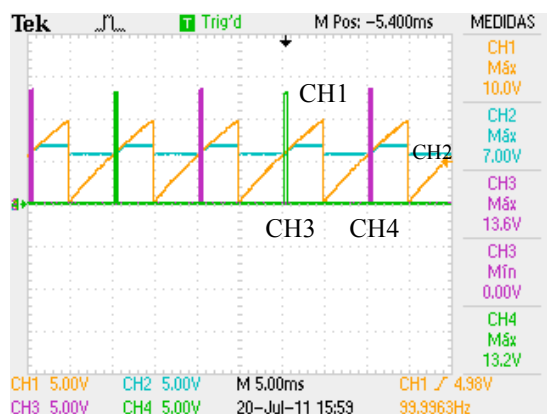


Figura 43: Sinais de comando U_c (CH2), rampa de sincronismo (CH1), impulsos de disparo dos tiristores (CH3 e CH4).

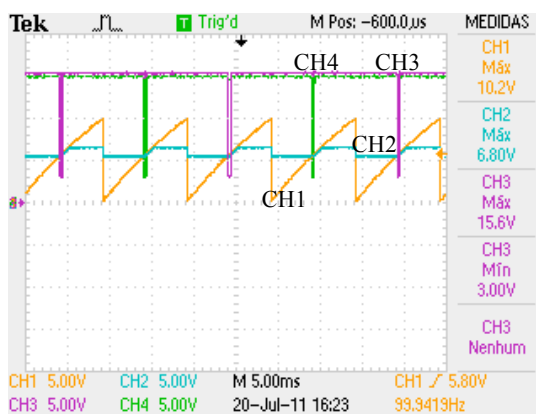


Figura 44: Inversão do sinal da saída do TCA785 para disparar as UDT (CH3 e CH4).

Na figura 43 são mostrados um dos impulsos de disparo (CH3, CH4) gerados pelo TCA 785, tendo este um t_{on} de aproximadamente 80 µs inferior ao t_{on} máximo.

Na figura 45, o CH4 mostra o impulso aplicado no tiristor no circuito de potência, necessário para colocar o dispositivo à condução.

Na Figura 46 é possível verificar o momento de geração dos impulsos de disparo (CH1) pelo TCA 785. Tendo em conta os parâmetros indicados na tabela 4, verifica-se que um ângulo de disparo de aproximadamente 100°.

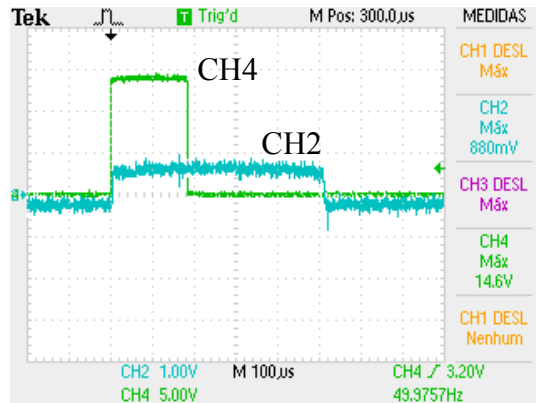


Figura 45: Sinal de saída do TCA785 (CH2) e tensão (V_{GK}) aplicada em cada tiristor (CH4)

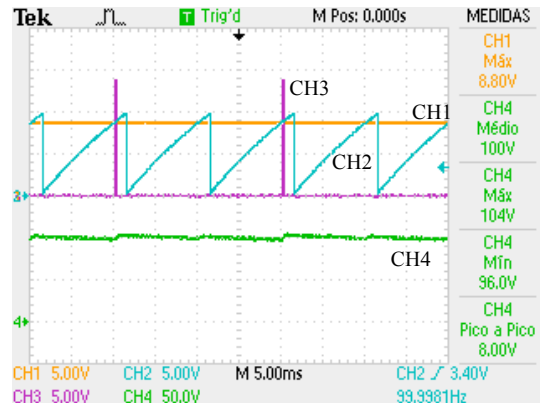


Figura 46: Tensão medida aos terminais do condensador (CH4)

4.5.2. Conversor boost

Para testar o funcionamento do conversor Boost, colocou-se a tensão de 24V / 1A para poder simular a tensão de saída do módulo NIM. Os sinal de comando do SP do conversor é gerado por um microcontrolador PIC 18F2331.

No anexo C apresentamos o código em C do programa desenvolvido para reproduzir os sinais de comando previamente dimensionados.

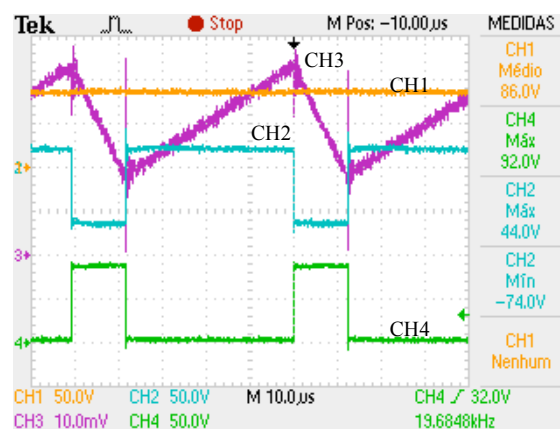


Figura 47: Tensão medida aos terminais do condensador (CH4)

Como se pode verificar pelas ondas da Figura 47 o conversor Boost na prática tem um resultado semelhante à simulação em que o CH1 é tensão de saída, o CH2 é a tensão aos terminais da bobine e o CH4 é o impulso no SP.

O CH3 é a corrente que atravessa a bobine com a sonda de corrente Tektronix AM503B configurada para para um ganho de 200mA/div.

4.5.3. Inversor de tensão monofásico em ponte

Para testar o funcionamento do inversor, colocou-se a tensão do barramento DC a alimentar a ponte inversora. Os sinais de comando dos semicondutores do inversor são gerados por um microcontrolador PIC 18F2331.

No anexo A apresentamos o código em C do programa desenvolvido para reproduzir os sinais de comando previamente dimensionados.

Os sinais gerados no microcontrolador apresentam uma tensão de 0 ou 5 V, como se pode ver na Figura 48. Ao ser enviado para optocoupler (HCPL2232), o sinal é alterado para níveis de tensão compreendidos entre 0 ou 15 V (Figura 49) de maneira a poder ser aplicado na gate do MOSFET. Desta forma, quando numa saída do microcontrolador o sinal de PWM se encontra no nível baixo (0 V), a saída do drive do MOSFET acha-se também no nível baixo (0 V), mantendo o semicondutor no estado de não condução. Por outro lado, se numa saída do microcontrolador for apresentado um sinal no nível lógico alto (+5 V) é aplicado ao semicondutor correspondente um sinal no nível lógico alto (+15 V), para o colocar à condução.

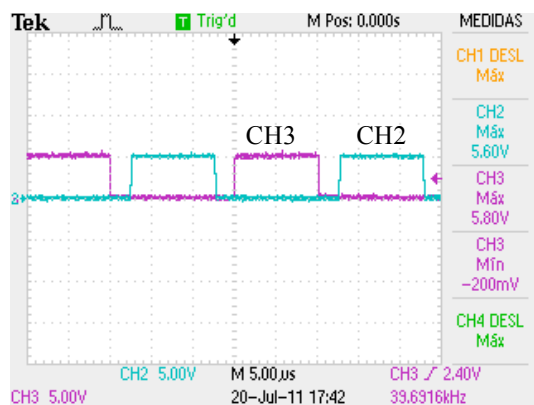


Figura 48: Sinais de saída do microcontrolador

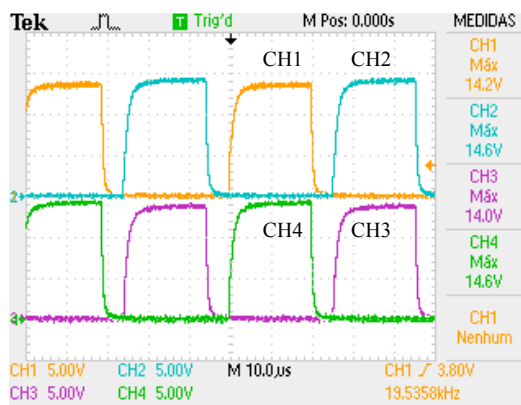


Figura 49: Sinais V_{GS} de cada MOSFET

Na da programação dos sinais do microcontrolador é necessário ter em atenção os tempos mortos entre sinais do mesmo braço de modo a garantir que não ocorra condução simultânea. Por este facto, estipulou-se um tempo morto de 2,5 μ s como adequado entre cada sinal do mesmo braço. Para este ensaio transferiu-se a resistência R_L em paralelo com o barramento DC para a saída do inversor de tensão.

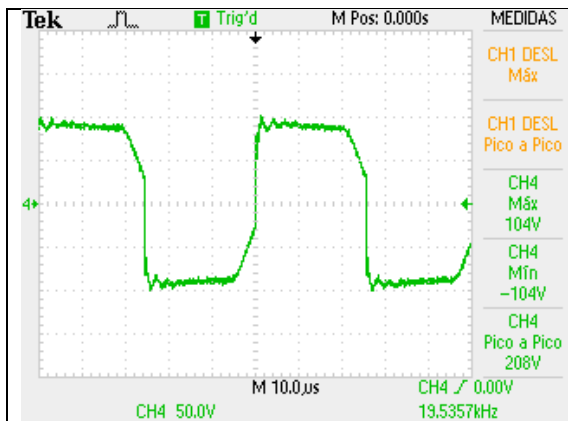


Figura 50: Tensão no primário do transformador de impulsos

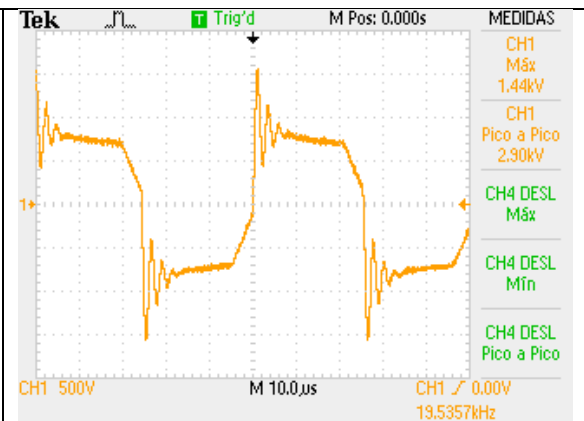


Figura 51: Tensão no secundário do transformador de impulsos

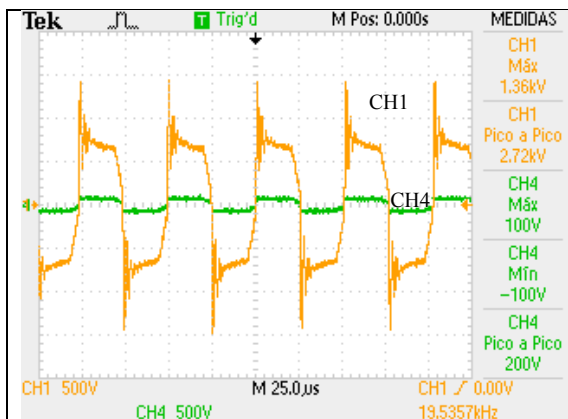


Figura 52: Tensão no primário (CH4) e no secundário (CH1) do transformador de impulsos.

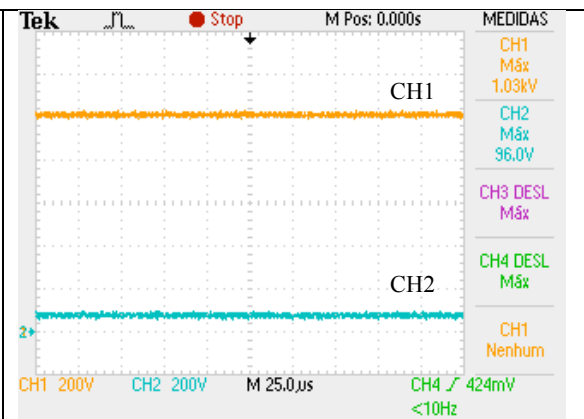


Figura 53: Tensão à saída da ponte de tiristores (CH2) e da ponte de diodos (CH1)

Como se pode verificar nas figuras 51, 52 e 53 a tensão obtida à saída do inversor tem um comportamento idêntico ao obtido em simulação (Figura 36 e 38).

4.6. Curva característica do detector Geiger-Muller

O GM que foi utilizado, e apenas testado com a fonte ligada à tensão da rede, é de enchimento de halogénio visto que só precisa de uma tensão de alimentação até 1000V, dentro da gama de tensões da fonte construída.

Não foi possível fazer o ensaio com o conversor Boost uma vez que não estava disponível na altura do ensaio uma bobina cujo núcleo não saturasse.

Procedimento experimental

A caracterização experimental típica de um detector GM consta de esquema experimental, determinação do Plateau, ruído de fundo e tempo morto.

1 - Montar o detector (com janela de 1/2") e electrónica associada segundo o esquema da Figura 26, certificando-se previamente que a fonte de alta tensão (AT) se encontra desligada;

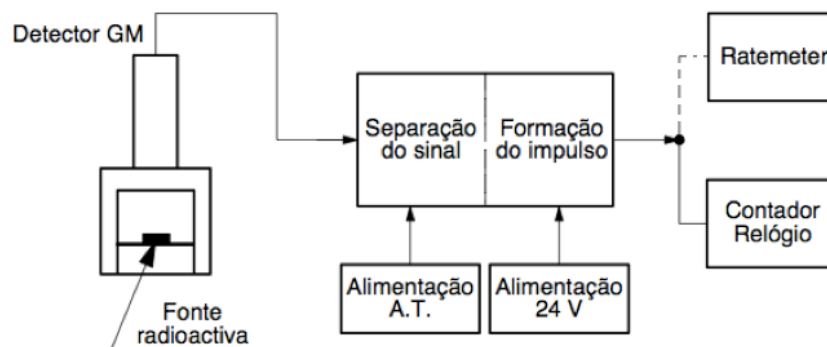


Figura 54: Diagrama de blocos da instalação experimental do detector GM

- 2 - Colocar no suporte graduado uma fonte radioactiva de ^{137}Cs (Césio) a cerca de 2 cm da janela do detector; ajustar o relógio do contador para um tempo suficientemente longo (≈ 20 min);
- 3 - Aumentar a tensão de polarização até o detector começar a contar; tomar nota do valor;
- 4 - Reajustar o relógio do contador para um intervalo de tempo menor (2-3 minutos). Registrar o número de contagens para sucessivos aumentos de 100 V na tensão de polarização a partir do ponto de arranque do detector. Uma vez atingido o fim do patamar parar o aumento da tensão de polarização num valor cerca de 20% superior ao valor médio do patamar;
- 5 - Apresentar os valores obtidos em forma de gráfico (Figura 55). Fixar o ponto de funcionamento para o detector ensaiado (valor da tensão de polarização a ser utilizado em todas as experiências seguintes com este detector).

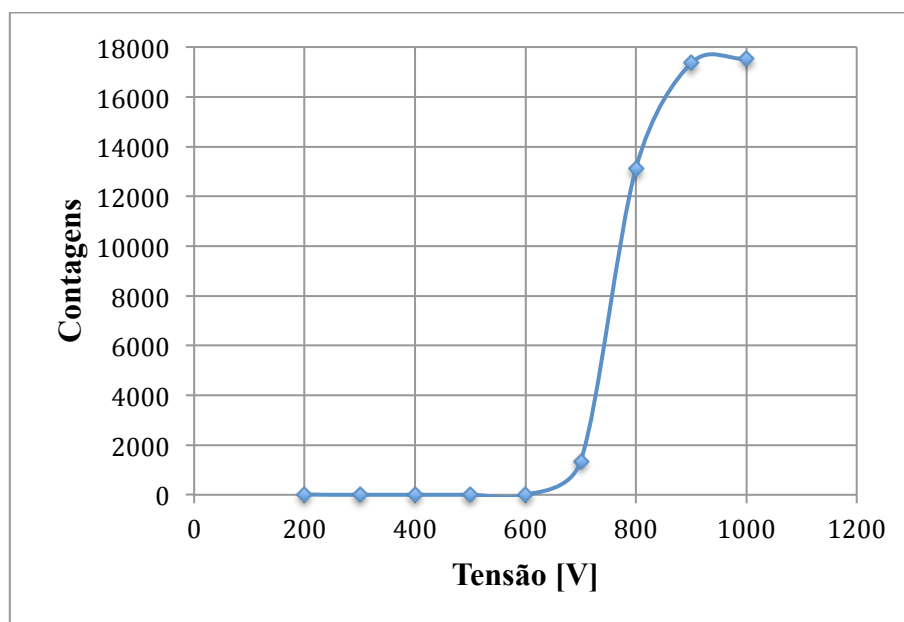


Figura 55: Curva da região de Plateau do detector GM

Como se pode constatar o resultado tirado com o detector GM é o esperado e coincide com a teoria (Figura 3). Nota-se a região de *plateau* começa sensivelmente a partir dos 900 Volt. Não se determinou onde termina uma vez que se pretendia evitar a danificação do detector para além de a fonte estar limitada até 1000 Volt.

Ruído de fundo

O espaço que nos rodeia está constantemente sujeito à acção de uma certa quantidade radiação. Esta radiação traduz-se num “ruído de fundo” em qualquer medição de radiação que se efectue no laboratório e tem uma origem dupla: radiação cósmica, proveniente da interacção das partículas cósmicas de alta energia com a atmosfera terrestre, e radiação terrestre, proveniente da desintegração dos radioisótopos naturais da crosta terrestre e dos radioisótopos artificiais produzidos pelo homem, presentes no meio ambiente.

A radiação de fundo pode variar sensivelmente com o local de instalação do laboratório e com a própria organização interna deste. Deve ser observado cuidado especial com a blindagem de resguardo e o armazenamento das fontes radioactivas e evitar a movimentação de fontes, que não estão a ser usadas durante a realização de medições.

Nestas condições valores de 1 a 4 contagens por segundo são típicos para este tipo de radiação de fundo.

Obtenção experimental do ruído de fundo

1 - Com todas as fontes radioactivas do laboratório bem resguardadas em blindagens anti-radiação, fixar a tensão de polarização do detector GM no valor da tensão de funcionamento;

2 - Acumular uma quantidade de contagens N estatisticamente fiável ($\sigma = \sqrt{N}$). Anotar o valor obtido.

3 - Calcular e anotar o ruído de fundo médio em c.p.m..

$$V = 880V$$

$$t = 180 \text{ segundos}$$

Número de contagens:

$$N_1 = 97$$

$$N_2 = 82$$

Número médio de contagens:

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2}{2} = 89,5 \quad \bar{N} = \frac{N_1 + N_2}{2} = 89,5$$

$$\bar{N} = 89,5 \pm \sqrt{2} \quad \bar{N} = 89,5 \pm \sqrt{89,5}$$

Verifica-se que o GM irá detectar cerca de 90 eventos por 180 segundos ou 30 eventos por 60 segundos a mais em cada fonte radioactiva que se realizar um teste.

Tempo morto

Quando uma radiação incidente origina ionização no interior do detector GM desenvolve-se uma cascata de iões e electrões: os electrões deslocam-se para o ânodo (eléctrodo central) com uma velocidade muito maior que a dos iões que se movem em direcção do cátodo (paredes do tubo). Enquanto este processo se desenvolve o detector é “cego” para qualquer outra partícula ou radiação que o atinja. O intervalo de tempo correspondente é designado por *tempo morto* do detector.

Como resultado da existência do tempo morto o número de contagens registado no sistema de contagem é sempre inferior à quantidade de impactos reais sofrida pelo detector. Na prática, para taxas de contagem inferior a 200-300 c.p.m. esta diferença pode ser desprezada, mas para taxas de contagem superiores podem existir erros de avaliação apreciáveis se não for tido em conta o tempo morto.

Existem vários métodos para a determinação do tempo morto de um sistema GM. Nesta experiência o tempo morto será determinado pelo método das duas fontes, no qual são utilizadas duas fontes de radiação de natureza e actividade absoluta desconhecidas (no entanto a sua relação de actividades relativas é aproximadamente 1:2). Estas fontes tem como característica uma geometria bem definida (meios discos).



Figura 56: Fonte (1) + meio-disco de compensação



Figura 57: Fonte (2) + meio-disco de compensação



Figura 58: Fonte (1) + fonte (2)

Obtenção experimental do tempo morto

- 1 - Subir a tensão de polarização do GM até ao ponto de funcionamento previamente definido. Colocar, centrado no suporte de fontes a cerca de 2 cm do detector. O conjunto “fonte (1) e meio-disco de compensação”. Acumular contagens no contador durante um período de tempo (t) estatisticamente significativo (nunca inferior a 2 min.) e anotar o valor obtido (R_1).
- 2 - Repetir o ponto 1) substituindo a fonte (1) pela fonte (2). Anotar o valor obtido (R_2);
- 3 - Remover o meio disco de compensação e colocar as duas fontes [(1)+(2)] no suporte de fontes. Acumular durante o mesmo tempo fixo t e anotar o valor obtido (R_{12}).
- 4 - Se necessário, corrigir os valores obtidos em relação ao nível do ruído de fundo.

Calcular o tempo morto τ do detector pela formula:

$$\tau = \frac{R_1 \cdot R_2 - [R_1 \cdot R_2 - (R_{12} - R_1) \cdot (R_{12} - R_2)]^{1/2}}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_{12}} \quad (s)$$

Distância da fonte ao detector: 15mm

Tempo de acumulação de contagem: 300 segundos

Contagens:

$$R_1 \rightarrow 154$$

$$R_2 \rightarrow 179$$

$$R_{12} \rightarrow 231$$

$$\tau = \frac{154 \cdot 179 - [154 \cdot 179 - (231 - 154) \cdot (231 - 179)]^{1/2}}{154 \cdot 179 \cdot 231} = 4,3 \times 10^{-3} \quad (s)$$

Este tempo morto é a soma dos tempos mortos do detector GM, do módulo de formatação de sinal (circuito monoestável) e do módulo contador (Figura 27 – *Kubler Codix 520*). Apesar do detector GM e o módulo de formatação terem um tempo morto na ordem dos microssegundos o módulo contador tem uma frequência máxima de 10 kHz, e assim sendo se irá traduzir no resultado final na ordem do milissegundos, o que faz com que haja um atraso na detecção do próximo evento que o GM detecta.

5. Conclusões e propostas de trabalhos futuros

5.1. Conclusões

O objectivo principal deste trabalho consistiu no projecto e implementação de uma fonte de alta tensão para um detector GM. Esta fonte foi realizada por um conversor CA/CC, ou um conversor boost, e posteriormente por um conversor CC/CA que transforma a tensão contínua numa tensão alternada de valor médio nulo. Aplicada a um transformador, tensão essa que no secundário do transformador foi rectificadora e aplicada ao detector GM.

Inicialmente foi feito um estudo sobre as características das fontes de alimentação para os detectores GM. De seguida procedeu-se ao estudo projecto e dimensionamento dos circuitos de geração de impulsos e disparo do rectificador. Posteriormente abordou-se o inversor de tensão e definiu-se as etapas de operação.

Por último, procedeu-se à simulação do sistema, e posteriormente à sua implementação para obtenção dos resultados práticos.

- Resultado da simulação comparada com as medidas da fonte.
- Resultados das medições com fontes radioactivas.

E através dos resultados obtidos das medições pode-se concluir que a fonte quando ligada a tensão da rede é estável e tem um bom desempenho na medida em que a leitura de contagens na região de *plateau* é semelhante tal como era esperado quando comparado com a teoria. Não foi testado com o conversor boost visto que não havia disponível uma bobina com um núcleo pequeno que pudesse caber dentro da caixa.

5.2. Propostas de Trabalhos Futuros

Como desenvolvimento futuro, sugere-se que em alternativa ao sistema de controlo implementado por intermédio de electrónica analógica, seja realizado com recurso a microcontroladores. Neste caso seria também interessante desenvolver um sistema de comunicação entre o microcontrolador e o computador através da comunicação USB. Depois de garantida a comunicação, sugere-se o desenvolvimento de um programa em LabView para monitorização do sistema. Para além da monitorização do sistema, todos os parâmetros de controlo do sistema poderia ser executados a partir de um computador pessoal.

Propõem-se também o desenvolvimento de um sistema de controlo da corrente pedida pela carga do sistema por forma a evitar que a tensão no condensador à saída do rectificador apresente valores de ripple elevados.

Estas implementações permitiriam que esta fonte tivesse uma utilização mais universal, não limitada somente a detectores GM.

Referências Bibliográficas

- [1] Silva, Fernando; “Electrónica Industrial”. – Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1998, ISBN 972-31-0801-1
- [2] Ribeiro da Silva, M.; “Técnicas de instrumentação nuclear”,1999.
- [3] Franklin, E. e Loosemore, W. R.; “A survey equipment using low-voltage halogen-quenched Geiger-Muller counters”, 1951.
- [4] Gervásio, E.; “Projecto e implementação de um sistema de alimentação para um transformador de alta tensão”, Dissertação de Mestrado, 2011, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [5] Redondo, Luís; “Apontamentos sobre Semicondutores de Potência para Engenharia Electrotécnica”, ISEL, Lisboa, 2008.
- [6] Rashid, Muhammad; Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications – Elsevier, 2011, ISBN: 978-0-12-382036-5
- [7] Mohan, Ned; “Power Electronics: Converters, Applications, and Design” – Wiley, 2003, ISBN 0-471-22693-9
- [8] “Phase Control IC TCA 785”, Technical Data, Siemens - Infineon
- [9] "PSTT PC/20" – Active trigger units for thyristors", Technical Data, PowerSEM.
- [10] "HCPL-2232", Technical Data, Hewlett-Packard.

Anexos

ANEXO A – Parâmetros do ficheiro m para simulação Matlab/Simulink

ANEXO B – Código em C do comando do conversor Boost

ANEXO C – Código em C do comando do Inversor

ANEXO D – Código em C do comando do Timer

ANEXO E – Layouts e imagens das PCB

ANEXO F – Fonte de alimentação em teste com o detector GM

Anexo A

Parâmetros do ficheiro m para simulação Matlab/Simulink

```
%Parametros dos Tiristores
```

```
Ron = 0.001;  
Lon = 0;  
Vf = 0.6;  
Rs = 20;  
Cs = 250e-9;
```

```
%Valores da Carga
```

```
Rt = 0.4;  
Lt = 1.8e-3;  
Ct = 150e-6;  
Ro = 2200;  
Rm1 = 1e6;  
Rm2 = 111e3;
```

Anexo B

Código em C do comando do conversor Boost

```
#include <18F2331.h>  
  
#include <math.h>  
#include <stdlib.h>  
#fuses H4,NOWDT,NOBROWNOUT,NOLVP, NOPROTECT  
#use delay(clock=40000000)  
  
#define Tp1 PIN_A0  
  
void init(){  
  
    // 1 INPUT  
    // 0 OUTPUT  
    set_tris_a (0b11111110);  
    set_tris_b (0b11111111);  
    set_tris_c (0b11111111);  
  
    output_low(Tp1);  
  
}
```

```

void main(){
init ();
    while(1){

//Tempos de comutação do Inversor.

//Tempo0 (Tempo ON de RA0)
        output_a (9);
        delay_us(38);

//Tempo1 (Tempo OFF de RA0)
        output_a (8);
        delay_us (12);

    }
}

```

Anexo C

Código em C do comando do Inversor

```

#include <18F2331.h>

#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#fuses H4,NOWDT,NOBROWNOUT,NOLVP, NOPROTECT
#use delay(clock=4000000)

#define Tp1  PIN_A0
#define Tp2  PIN_A1

void init(){

    // 1 INPUT
    // 0 OUTPUT
    set_tris_a (0b11111100);
    set_tris_b (0b11111111);
    set_tris_c (0b11111111);

    output_low(Tp1);
    output_low(Tp2);

}

```

```

void main(){
init ();
    while(1){

//Tempos de comutação do Inversor.

//Tempo0 (Tempo ON de RA0)
    output_a (9);
    delay_us(10);

//Tempo1 (Tempo OFF de RA0)
    output_a (8);
    delay_us (2,5);

//Tempo2 (Tempo ON de RA1)
    output_a (10);
    delay_us(10);

//Tempo3 (Tempo OFF de RA1)
    output_a (2);
    delay_us(2,5);

    }
}

```

Anexo D

Código em C do comando do Timer

```

#include <18F2331.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

#fuses H4, NOWDT, NOPROTECT, NOBROWNOUT, NOLVP
#use delay(clock=4000000)

#define Ta1 PIN_B0 //Botao
#define Tp1  PIN_B1 //Controlo do monoestavel, estado 1 ou estado 2
#define Tp2  PIN_B3 //Controlo do Timer

void init(){

    // 1 INPUT
    // 0 OUTPUT

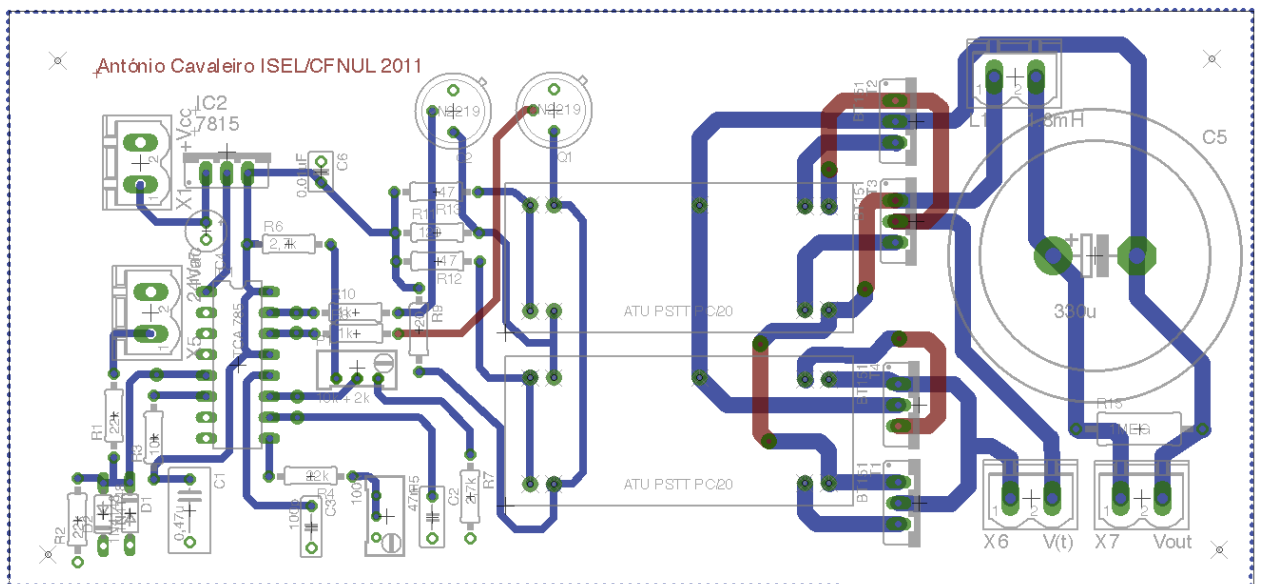
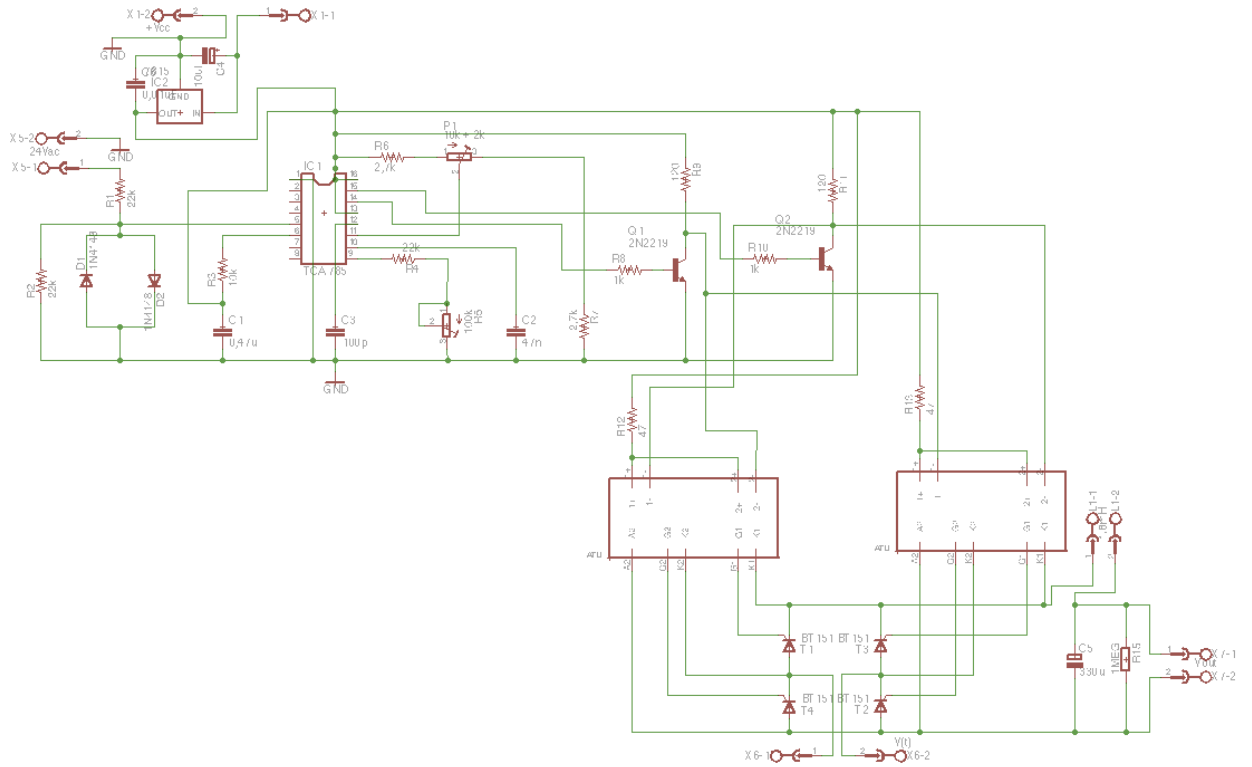
    set_tris_a (0b11000000);

```

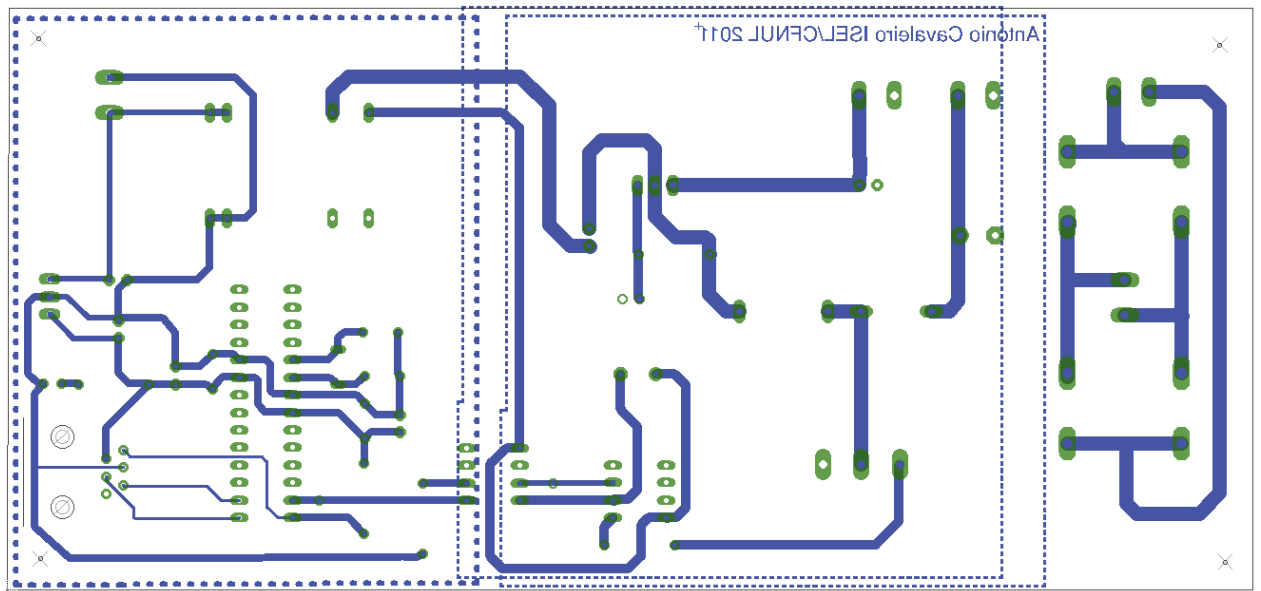
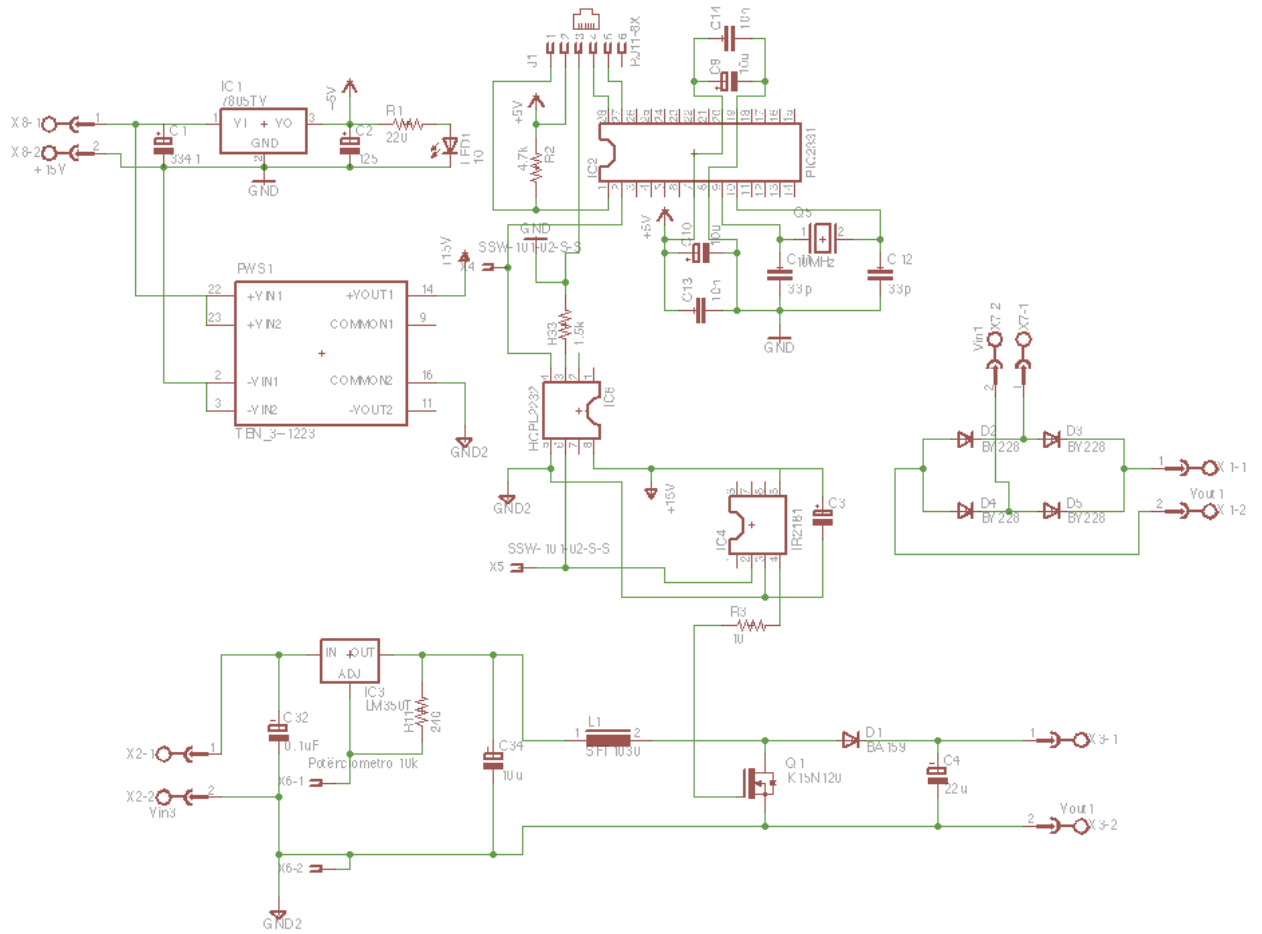

Anexo E

Layouts e imagens das PCB

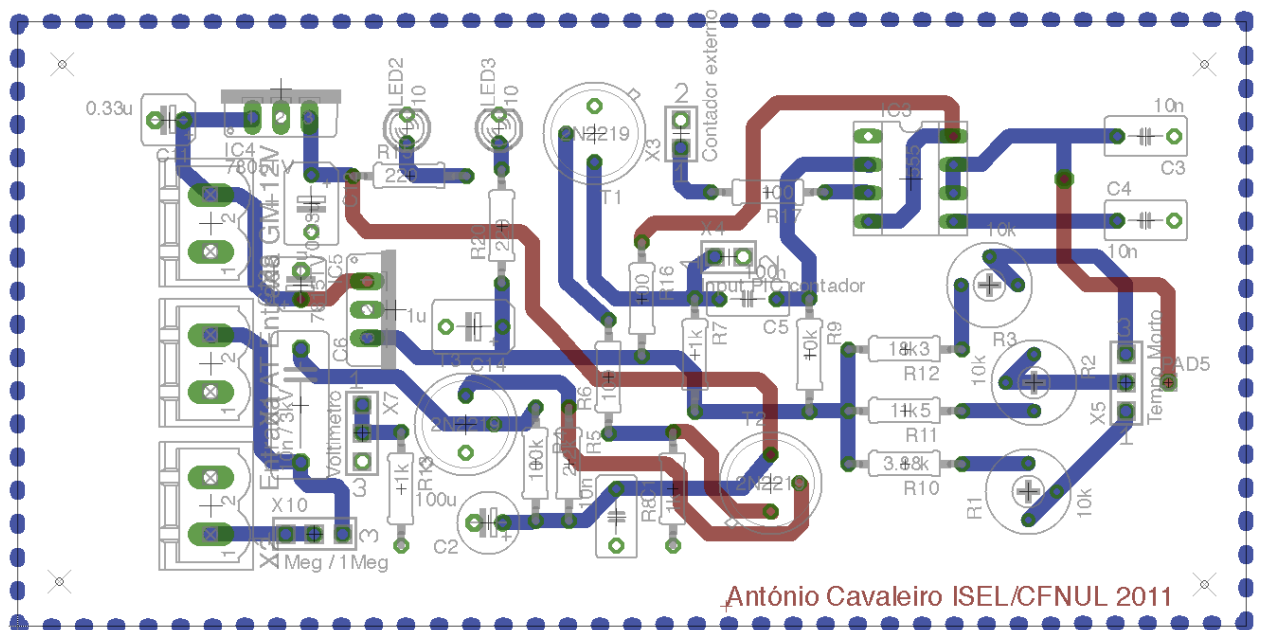
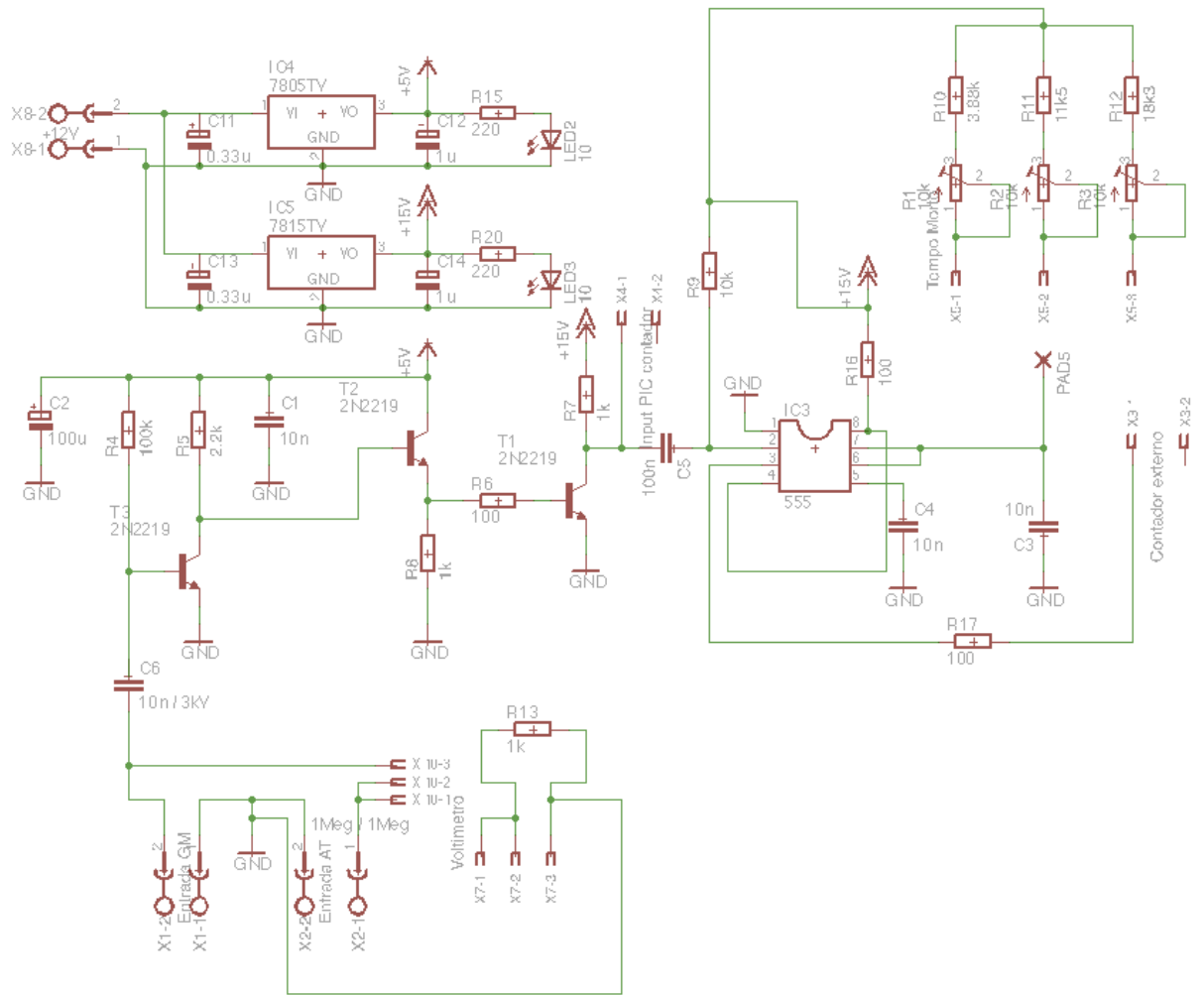
Rectificador controlado:



Conversor Boost e ponte de diodos



Separador de AT-Sinal



ANEXO F

Fonte de alimentação em teste com o detector GM

