

# Agradecimentos

Esta dissertação é o concluir do percurso realizado no ISEL durante o qual várias pessoas foram importantes, que directa ou indirectamente deram o seu contributo para o mesmo, a elas deixo o meu agradecimento. Em especial:

Ao Professor Doutor Luís Redondo pela orientação, disponibilidade e apoio fundamental, sem o qual o desenvolvimento desta dissertação teria sido uma tarefa muito mais difícil.

Ao Professor Miguel Chaves pela ajuda, disponibilidade e simpatia demonstrada durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas Ricardo Pereira, João Mendes, Nuno Santos, Jerónimo Afonso, César Ferrolho e Filipe Pinto pela agradável convivência e apoio.

À minha irmã Dora Gervásio e ao meu cunhado Pedro Duarte pela motivação e apoio incansável ao longo de todo este percurso.

A todos, o meu muito obrigado!



## Resumo

Neste trabalho pretende-se estudar, dimensionar e implementar experimentalmente de um sistema de alimentação para transformadores de alta tensão a alta frequência. Este sistema será constituído por dois elementos principais, um rectificador monofásico em ponte totalmente controlado e por um inversor de tensão.

Inicialmente realizou-se um estudo sobre as diferentes topologias possíveis para o rectificador considerando diferentes tipos de carga. Realizou-se, também, um estudo sobre o circuito de geração dos impulsos de disparo dos tiristores, executado com base num circuito integrado TCA 785, dimensionou-se os elementos constituintes do circuito de disparo, e de um sistema de controlo da tensão de saída do rectificador.

Posteriormente estudou-se o funcionamento do inversor de tensão, definindo-se os modos de operação e dimensionou-se um circuito ressonante tendo em conta os parâmetros construtivos do transformador que se pretende utilizar.

Finalmente procedeu-se à implementação prática dos sistemas previamente dimensionados e simulados e à apresentação dos respectivos resultados.

**Palavras-Chave:** Rectificador totalmente controlado, TCA 785, Inversor de tensão.



## **Abstract**

In this work we intend to study, measure and implement an experimental system for high voltage transformers at high frequency. This system will consist of two main elements, a single phase bridge rectifier and a voltage inverter.

Initially we carried out a study on the different possible topologies for the rectifier and for different types of load. There was also a study on the circuit

There was also a study about the circuit generation of trigger pulses of the single phase thyristors bridge performed by an integrated circuit TCA 785, a scaling of elements of the trigger circuit, as well as the design and dimensioning of a system for monitoring the output voltage of the rectifier.

Later we studied the operation of the voltage inverter, set the operating modes and a resonant circuit scale based on the constructive parameters of the transformer to use.

Finally we proceeded to the practical implementation of systems pre-sized and simulated and the presentation of its results.

**Keywords:** Single phase bridge rectifier, TCA785, Voltage inverter.



# ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Índice .....	vii
Lista de figuras .....	x
Lista de tabelas .....	xvi
Lista de abreviaturas .....	xvii
1. Introdução Geral .....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objectivos .....	2
1.3 Estrutura da Dissertação .....	2
2. Estudo sobre o Sistema de Alimentação do Transformador de AT .....	4
2.1 Elementos Constituintes do Sistema .....	4
2.2 Conversores AC/DC .....	5
2.2.1 Rectificador Monofásico Não Controlado em Ponte Completa ...	6
2.2.2 Rectificador Monofásico Semi-Controlado.....	6
2.2.3 Rectificador Monofásico Totalmente Controlado.....	11
2.3.1 Circuito de geração de impulsos para disparo de tiristores .....	19
2.3.2 Circuito de disparo .....	23
2.3.3.1 Sistema de controlo .....	26
2.3.3.2 Integrador de Miller .....	30
3. Dimensionamento e Implementação Prática do Rectificador e Inversor Monofásico.....	42

3.1	Descrição do Sistema Desenvolvido .....	42
3.2	Dimensionamento do circuito de disparo .....	43
3.3	Dimensionamento do circuito de controlo da tensão no rectificador...43	
3.3.1	Compensador do sistema de controlo .....	46
3.3.2	Transdutor de tensão .....	47
3.4	Dimensionamento do Circuito Ressonante .....	49
3.5	Implementação do Rectificador e Circuitos de Comando e Controlo.51	
3.6	Implementação do Inversor de Tensão .....	52
4.	Simulação e Resultados Experimentais .....	56
4.1	Introdução .....	56
4.2.1	Simulação do Rectificador em Cadeia Aberta .....	56
4.2.2	Simulação do Rectificador em Cadeia Fechada .....	60
4.3	Simulação do Inversor de Tensão .....	63
4.4	Resultados Experimentais .....	65
4.4.1	Rectificador totalmente controlado em cadeia aberta .....	65
4.4.2	Rectificador totalmente controlado em cadeia fechada .....	67
4.4.3	Inversor de tensão monofásico em ponte .....	68
5.	Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros .....	72
5.1	Conclusões .....	72
5.2	Propostas de Trabalhos Futuros .....	73
	Referências Bibliográficas.....	74
	Anexos.....	75
	Anexos A.....	76
	Anexos B.....	81



## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Estrutura do sistema em estudo .....	4
Figura 2.2 – Rectificador monofásico: (a) sem filtro (b) filtro capacitivo (c) filtro indutivo. ....	5
Figura 2.3 – Formas de onda da tensão na entrada e saída do rectificador monofásico não controlado sem filtro .....	6
Figura 2.4 – Formas de onda da tensão na entrada e saída do rectificador monofásico não controlado com filtro capacitivo.....	7
Figura 2.5 – Formas de onda da tensão na entrada e saída do rectificador monofásico não controlado com filtro indutivo.....	7
Figura 2.6 – Ponte rectificadora monofásica semi-controlada: (a) sem filtro (b) filtro capacitivo (c) filtro indutivo.....	8
Figura 2.7 – Formas de onda da tensão e corrente de entrada e saída do rectificador monofásico semi-controlado sem filtro para um ângulo de $90^\circ$ .....	9
Figura 2.8 – Formas de onda da tensão e corrente de entrada e saída do rectificador monofásico semi-controlado com filtro capacitivo para um ângulo de $90^\circ$ .....	9
Figura 2.9 – Formas de onda da tensão e corrente de entrada e saída do rectificador monofásico semi-controlado com filtro indutivo para um ângulo de $90^\circ$ .....	10
Figura 2.10 – Ponte rectificadora monofásica totalmente controlada: (a) sem filtro (b) filtro capacitivo (c) filtro indutivo.....	11

Figura 2.11 – Formas de onda da tensão e corrente de entrada e saída do rectificador monofásico totalmente controlado sem filtro para um ângulo de $120^\circ$ .....	12
Figura 2.12 – Formas de onda da tensão e corrente de entrada e saída do rectificador monofásico totalmente controlado com filtro capacitivo para um ângulo de $120^\circ$ .....	12
Figura 2.13 – Formas de onda da tensão e corrente de entrada e saída do rectificador monofásico totalmente controlado com filtro indutivo para um ângulo de $120^\circ$ .....	13
Figura 2.14 – Rectificador monofásico em ponte com carga resistiva.....	14
Figura 2.15 – Formas de onda de um rectificador totalmente controlado com carga resistiva.....	15
Figura 2.16 – Formas de onda de um rectificador totalmente controlado com carga indutiva.....	17
Figura 2.17 – Esquema de comando de um tiristor utilizando transformador de impulso.....	18
Figura 2.18 – Aspecto típico de um transformador de impulso.....	18
Figura 2.19 – Circuito de geração de sinais de disparo dos tiristores.....	20
Figura 2.20 – Diagrama de blocos representativo do TCA 784.....	21
Figura 2.21 – Diagrama temporal dos sinais do TCA.....	22
Figura 2.22 – Diagrama de blocos de princípio para geração de sinais de disparo de pontes rectificadoras monofásicas.....	22
Figura 2.23 – Circuito de disparo dos tiristores com isolamento galvânico por transformadores de impulsos.....	23
Figura 2.24 – Formas de onda mais significativas do circuito de disparo.....	24
Figura 2.25 – Conjunto rectificador, filtro RLC e carga $R_0$ .....	26

Figura 2.26 – Integrador de Miller.....	30
Figura 2.27 – Aproximação assintótica da resposta em frequência do ganho do integrador de Miller.....	31
Figura 2.28 – Inversor Monofásico em Ponte com carga resistiva.....	32
Figura 2.29 – Tensão e corrente na carga para o circuito da figura 2.28.....	33
Figura 2.30 – Etapas de funcionamento para carga indutiva.....	34
Figura 2.31 – Formas de onda para o circuito da figura 2.30.....	34
Figura 2.32 – PWM sinusoidal bipolar.....	36
Figura 2.33 – PWM sinusoidal unipolar.....	37
Figura 2.34 – Sinais de comando do inversor implementado.....	38
Figura 2.35 – Primeira Etapa.....	39
Figura 2.36 – Segunda Etapa.....	40
Figura 2.37 – Terceira Etapa. ....	40
Figura 2.38 – Quarta Etapa.....	41
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do circuitos implementados.....	43
Figura 3.2. Transdutores de tensão LV 25 - P.....	47
Figura 3.3. Esquema de princípio do sensor de tensão.....	48
Figura 3.4 – Esquema equivalente do transformador com circuito ressonante.....	49
Figura 3.5 – Constituição do conversor AC/DC implementado.....	51
Figura 3.6 – Constituição do inversor de tensão implementado.....	52
Figura 3.7 – Ambiente de trabalho do MPLAB IDE v8.60.....	53
Figura 3.8 – Programador ICD2 da Microchip.....	53

Figura 3.9 – Esquema dos Acopladores Ópticos HCPL-2232.....	54
Figura 4.1 – Modelo construído em MATLAB/SIMULINK para simulação do rectificador.....	57
Figura 4.2 – Modelo construído em MATLAB/SIMULINK para reprodução de um sinal de comando $U_c$ em cadeia aberta.....	57
Figura 4.3 – Simulação dos sinais do circuito de comando do rectificador a tiristores e da tensão de alimentação.....	58
Figura 4.4 – Simulação da tensão no condensador C e da corrente de carga $i_0$ .....	59
Figura 4.5 – Simulação da tensão no condensador C e do sinal de comando $U_c$ .....	60
Figura 4.6 – Modelo para reprodução de um sinal de comando $U_c$ em cadeia fechada.....	60
Figura 4.7 – Simulação dos sinais do circuito de comando do rectificador a tiristores em cadeia fechada e da tensão de alimentação ( $t=1s$ ).....	61
Figura 4.8 – Simulação dos sinais do circuito de comando do rectificador a tiristores em cadeia fechada e da tensão de alimentação ( $t=300ms$ )...	61
Figura 4.9 – Simulação da tensão no condensador C e da corrente de carga $i_0$ em cadeia fechada.....	62
Figura 4.10 – Simulação da tensão no condensador C e do sinal de comando $U_c$ em cadeia fechada.....	63
Figura 4.11 – Modelo construído em MATLAB/SIMULINK para simulação do inversor de tensão.....	63
Figura 4.12 – Simulação dos sinais de comando aplicados aos semicondutores do inversor de tensão.....	64
Figura 4.13 – Simulação de tensão e corrente de saída do inversor para uma carga resistiva.....	64

Figura 4.14 – Tensão dente de serra obtida através da tensão de amostragem da rede.....	65
Figura 4.15 a) – Sinais de comando $U_C$ e rampa de sincronismo em $t=0$ .....	66
Figura 4.15 b) – Sinais de comando $U_C$ , rampa de sincronismo, impulsos de disparo dos tiristores e corrente na carga.....	66
Figura 4.16 – Sinal de saída do TCA 785 e tensão ( $V_{GK}$ ) aplicada em cada tiristor.....	67
Figura 4.17 a) – Tensão no barramento DC e corrente de carga para $R_L=2K\Omega$ .....	68
Figura 4.17 b) – Tensão no barramento DC e corrente de carga para $R_L=1K\Omega$ .....	68
Figura 4.18 a) – Sinais de saída do microcontrolador.....	69
Figura 4.18 b) – Sinais $V_{GS}$ de cada Mosfet.....	69
Figura 4.19 a) – Tensão de saída do inversor com carga $R_L=1K\Omega$ .....	70
Figura 4.19 b) – Tensão máxima de saída do inversor com carga $R_L=1K\Omega$ ....	70
Figura 4.20 a) – Tensões na entrada do circuito ressonante e saída do transformador.....	71
Figura 4.20 b) – Tensões máximas na entrada do circuito ressonante e saída do transformador.....	71
Figura B.1 – Layout do circuito de comando e controlo do rectificador monofásico em ponte.....	81
Figura B.2 – PCB do circuito de comando e controlo do rectificador monofásico em ponte.....	82
Figura B.3 – Layout do circuito de comando e potência do inversor monofásico em ponte.....	83

Figura B.4 – PCB do circuito de comando e potência do inversor monofásico  
em ponte..... 83

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Parâmetros necessários para o dimensionamento do circuito de comando.....	43
Tabela 3.2 – Relação entre capacidade de $C_{12}$ e largura de impulso.....	45
Tabela 3.3 – Tabela com parâmetros de carga.....	46
Tabela 4.1 – Tabela com parâmetros utilizados na simulação e na prática.....	58

## Lista de Abreviaturas

R - Resistência

L - Indutância

C - Capacidade

AC – *Alternating Current*

DC – *Direct Current*

MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

PCB – *Printed Circuit Board*

PIC – *Programmable Integrated Circuit*

PID – Compensador proporcional integral derivativo

PNP – Dispositivo de três camadas semicondutoras (transistor PNP)

PWM – *Pulse Width Modulation*

SPWM – *Sinusoidal Pulse Width Modulation*

TRIAC – Dispositivo do tipo tiristor de condução bilateral

$I_{GK}$  – Valor mínimo da corrente, no sentido porta-cátodo, que ainda dispara o tiristor

$I_H$  – Corrente de sustentação ou manutenção de um tiristor

$I_L$  – Corrente de lançamento de um tiristor

$V_{GK}$  – Valor mínimo de tensão porta cátodo que ainda dispara o tiristor