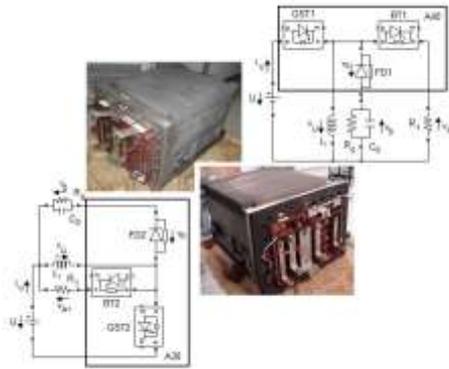




INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



Conversor de tracção do material circulante ML90 do Metropolitano de Lisboa

Bruno da Silva Campos de Assis Paixão

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Prof. Paulo José da Costa Branco
Orientadores: Prof. José Fernando Alves da Silva
Vogais: Prof. João José Esteves Santana
Eng. Cândida Borges

Junho de 2010

Agradecimentos

Agradeço a todos os que, de forma directa ou indirecta, me ajudaram na realização e conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos os trabalhadores da Secção de Electrónica e Instrumentação do Metropolitano de Lisboa, E.P.E, pelo acolhimento e disponibilidade de ajuda durante o tempo passado nas instalações e em particular à Eng. Cândida Borges e ao Eng. José Pina pela forma como me incentivaram a melhorar o trabalho desenvolvido.

Agradeço ao professor Fernando Silva, pela forma como me foi acompanhando e promovendo a minha vontade de aumentar os conhecimentos e melhorar o trabalho realizado.

Agradeço aos meus colegas, Marco Faustino, Filipe Silva e Pedro Frade, pela amizade criada ao longo do curso e com isso, o espírito de inter-ajuda essencial para a minha melhoria nos estudos e à Katila Mendes pela ajuda durante a realização do trabalho.

Agradeço à minha namorada, Maria Inês Marques, pela estabilidade que me deu, pelo incentivo na melhoria contínua do meu processo de estudo e por nunca ter desistido de me alegrar, mesmo quando as coisas não corriam bem.

Agradeço aos meus avós, pais e irmãos que, todos os dias quando vinha frustrado por não avançar no trabalho, me davam ânimo para não desistir e à minha bisavó, que com a sua vida me ensinou o que é coragem, força de vontade e dedicação. Principalmente a ela dedico este trabalho.

Resumo

O alvo de estudo deste trabalho foram os equipamentos do controlo central e de tracção pertencentes às carruagens motoras ML90 do Metropolitano de Lisboa, E.P.E. com vista à criação de um programa de testes. Esse programa pretende dotar o laboratório da Secção de Electrónica e Instrumentação de uma ferramenta capaz de despistar avarias nos módulos do conversor principal (Módulo A10, Modulo A30 e Módulo A40).

A solução desenvolvida utiliza, como gerador de sinais para os módulos de comando de porta dos tiristores GTO, a unidade de controlo de tracção da motora. O teste é feito utilizando um programa já existente (produzido pelo fabricante Siemens), através de um Hyper-Terminal, adaptado para poder comandar um módulo do conversor separadamente.

De forma a antecipar os resultados que iriam ser obtidos, foram criados modelos dos módulos do conversor cc-cc em “Matlab/Simulink” e efectuados testes em funcionamento normal e em avarias típicas, para se estudarem as características de funcionamento quando existem elementos com defeito.

Para ultrapassar as limitações existentes no laboratório, foi usada uma tipologia do tipo redutor-amplificador, permitindo criar correntes e tensões mais próximas das encontradas pelos módulos nas suas montagens originais.

O programa criado para a realização dos testes encontrados através dos diversos ensaios e simulações foi produzido em “LabView” e tentou ser o mais automático possível, tornando assim os testes aos módulos mais eficientes.

Palavras-chave

Conversor cc-cc, Conversor de tracção, Programa de Testes, Módulos.

Abstract

The aim of this study was the equipment of central control and traction motor ML90 carriages belonging to the Metropolitano de Lisboa, E.P.E. to establish a testing program. This program aims to equip the laboratory of the Section of Electronics and Instrumentation of a tool able to evade damage to the converter main modules (Module A10, Module A30 and Module A40).

The solution developed uses, as a signal generator to the command module port of the GTO thyristor, the control unit of traction motor. The test is done using an existing program (produced by the manufacturer Siemens), using a Hyper-Terminal, adapted to control a power converter module separately.

To anticipate the results that would be obtained, were created models of the modules of the converter dc-dc in "Matlab / Simulink" and conducted tests on normal and typical failures, to examine the operating characteristics when there are defective elements.

In order to overcome the limitations of the laboratory, were used a type of elevator-type gearbox, allowing the creation of currents and voltages closer to those found by the modules in their original places.

The program created for the tests found through various experiments and simulations were produced in "LabView" and tried to be as automatic as possible, thereby testing the modules more efficient.

Keywords

Converter dc-dc, converter for traction, Testing Program, Modules.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. MOTIVAÇÃO	1
1.3. OBJECTIVOS	1
1.4. MODELO ML90	2
1.5. ESTRUTURA DO RELATÓRIO	3
2. MÓDULOS A30 E A40 - APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO	4
2.1. DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS A30 E A40	4
2.1.1. <i>Módulo A30</i>	4
2.1.2. <i>Módulo A40</i>	5
2.2. ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA O CONTROLO DOS SEMICONDUTORES	6
2.2.1. <i>Unidades centrais de controlo</i>	6
2.2.2. <i>Módulo de Gate A10</i>	7
2.2.3. <i>Unidades de conexão dos impulsos actuadores A50 e A60</i>	7
3. MONTAGEM CC-CC REDUTOR-AMPLIADOR	9
3.1. SIMPLIFICAÇÕES PARA DIMENSIONAR OS ELEMENTOS DA MONTAGEM REDUTORA-AMPLIADORA	9
3.2. DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC DO TIPO REDUTOR-AMPLIADOR - PLANO TEÓRICO	9
3.2.1. <i>Período de funcionamento dos tiristores</i>	10
3.2.2. <i>Estados do circuito redutor-amplificador</i>	10
Estado 1 – GTO em condução com os restantes semicondutores ao corte	10
Estado 2 – Díodo à condução com os restantes semicondutores ao corte	11
Estado 3 – Díodo e tiristor convencional à condução com GTO ao corte	11
3.2.3. <i>Relações de transferência do conversor</i>	12
3.2.4. <i>Determinação dos componentes do conversor</i>	13
Bobine L_i	13
Condensador C_0	15
3.3. DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC DO TIPO REDUTOR-AMPLIADOR - PLANO REAL	15
3.3.1. <i>Cálculo do factor de ciclo do tiristor GTO</i>	15
3.3.2. <i>Cálculo da indutância L_i</i>	17
3.3.3. <i>Determinação do condensador C_0</i>	17
3.4. DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC DO TIPO REDUTOR-AMPLIADOR – PLANO EXPERIMENTAL	18
3.4.1. <i>Tensão de saída e tensões máximas nos semicondutores</i>	18
3.4.2. <i>Corrente média nas cargas</i>	18
3.4.3. <i>Indutância L_i</i>	19

3.4.4.	<i>Condensador C_0</i>	19
4.	CIRCUITOS DE PROTECÇÃO	20
4.1.	FONTE	20
4.2.	MÓDULO A30.....	20
4.3.	MÓDULO A40.....	24
5.	SIMULAÇÃO E ENSAIO	25
5.1.	SIMULAÇÃO	25
5.2.	ENSAIO	27
5.3.	RESULTADOS – SIMULAÇÃO E ENSAIO	28
5.3.1.	<i>Fonte de tensão</i>	28
5.3.2.	<i>Sinais de disparo dos semicondutores</i>	29
5.3.3.	<i>Módulo A30</i>	29
5.3.3.1.	Testes Rápidos	29
5.3.3.2.	Testes Avançados.....	30
5.3.3.3.	Avarias	31
5.3.4.	<i>Módulo A40</i>	33
5.3.4.1.	Testes Rápidos	33
5.3.4.2.	Testes Avançados.....	34
5.3.4.3.	Avarias	35
6.	PROGRAMA DE TESTES	38
6.1.	PROGRAMA GERAL - FLUXOGRAMA	38
6.2.	TESTES RÁPIDOS - FLUXOGRAMA.....	39
6.3.	TESTES AVANÇADOS - FLUXOGRAMA.....	40
6.4.	CODIFICAÇÃO DO PROGRAMA DE TESTES	41
6.4.1.	<i>Menus, Sub-menus e passagem automática entre eles</i>	42
6.4.2.	<i>Janelas de interacção com o utilizador</i>	43
6.4.3.	<i>Janela de controlo de execução</i>	44
6.4.4.	<i>Aquisição de sinal</i>	45
6.4.5.	<i>Relatório</i>	46
7.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	49
7.1.	CONCLUSÃO.....	49
7.2.	SUGESTÕES	50
8.	BIBLIOGRAFIA	51
ANEXO I - SISTEMA DE TRACÇÃO-TRAVAGEM / CIRCUITO DE POTÊNCIA		52
I.1	ESQUEMA DE PRINCÍPIO	52
I.1.1	<i>Captação de corrente 11X1...11X4</i>	52
I.1.2	<i>Disjuntor Principal 12Q1</i>	53
I.1.3	<i>Curto-circuitador 11X21...11X24</i>	53
I.1.4	<i>Filtro de Linha e Outros Componentes do Circuito</i>	53
I.1.5	<i>Condensador de linha 13A1.C</i>	54
I.1.6	<i>Auto-indução de linha 13L1</i>	54
I.1.7	<i>Díodo de potência 13A1.V1</i>	54
I.1.8	<i>Díodo de potência 13A1.V2</i>	55
I.1.9	<i>Transdutor 44T1</i>	55
I.1.10	<i>Conversor de Tracção 14A1</i>	55

I.2	CONVERSOR CC-CC PRINCIPAL GST1/GST2 (MÓDULOS A30 E A40)	55
I.3	CONVERSOR CC-CC DE TRAVAGEM BT1/BT2 (MÓDULOS A30 E A40)	55
I.4	CIRCUITO INTERMÉDIO 14L1	56
I.5	ONDULADOR DE CORRENTE IMPRESSA WR	56
ANEXO II - CARACTERÍSTICAS DOS TIRISTORES GTO GST		57
II.1	CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DO TERMINAL DE COMANDO DE PORTA	58
II.2	CARACTERÍSTICAS LIMITE	59
II.2.1	<i>Limitações em tensão anódica: Tensões máximas</i>	59
II.2.2	<i>Limitações em corrente: Correntes máximas</i>	60
II.2.3	<i>Limitações em potência e temperatura de funcionamento</i>	60
II.2.4	<i>Limitações do terminal de comando (Porta)</i>	60
II.2.5	<i>Limitação em dv_{AK}/dt</i>	60
ANEXO III - CARACTERÍSTICAS DOS TIRISTORES BT		61
ANEXO IV - CARACTERÍSTICAS DOS DÍODOS FD		62
ANEXO V – MANUAL DO UTILIZADOR		63

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema de Ligação entre o CCU, TCU e os módulos.....	2
Figura 2 - Conversor de Tracção do ML90 (Simplificado).....	4
Figura 3 - Módulo A30: a) Aspecto do módulo b) Esquema interno com os semicondutores principais	4
Figura 4 - Intervalos de condução dos GST e FD2	5
Figura 5 - Módulo A40: a) Aspecto do módulo b) Esquema interno com os semicondutores principais	5
Figura 6 - Exemplo de intervalos de condução dos semicondutores principais do módulo A40	5
Figura 7 - Armário que contém a CCU e a TCU.....	6
Figura 8 - Módulo de Gate A10	7
Figura 9 - Unidade de conexão de impulsos actuadores A50	8
Figura 10 - Circuito de conexão de impulsos.....	8
Figura 11 - Montagens dos módulos A30 e A40 como conversores cc-cc do tipo redutor-amplificador	9
Figura 12 - Circuito redutor-amplificador com o diódo e tiristor ao corte e o GTO em condução	10
Figura 13 - Circuito redutor-amplificador com diódo em condução e os restantes semicondutores ao corte	11
Figura 14 - Circuito redutor-amplificador com GTO ao corte e restantes semicondutores em condução	11
Figura 15 - Circuito redutor-amplificador para o A30 simplificado	12
Figura 16 - Formas de onda ideais do conversor redutor-amplificador.....	14
Figura 17 – Esquema da montagem redutora-amplificadora utilizada para os testes	15
Figura 18 - Configuração dos condensadores no circuito	17
Figura 19 - Circuito de protecção da fonte de tensão.....	20
Figura 20 - Montagem cc-cc redutora-amplificadora com o módulo A30 e respectivos circuitos de protecção. 21	
Figura 21 - Circuito de protecção dos GTO's e seu funcionamento	21
Figura 22 – Tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção dos GTO's.....	22
Figura 23 - Circuito de protecção do Tiristor e seu funcionamento.....	22
Figura 24 - Tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção do Tiristor	23
Figura 25 - Circuito de protecção do Díodo e seu funcionamento	23
Figura 26 - Tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção do Díodo	23
Figura 27 - Montagem cc-cc redutora-amplificadora com o módulo A30 e respectivos circuitos de protecção. 24	
Figura 28 - Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A30 (Testes rápidos)	25
Figura 29- Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A30 (Testes avançados)	26
Figura 30 - Esquema da simulação em "Matlab/Simulink" para o A40 (Testes rápidos)	26
Figura 31 - Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A40 (Testes Avançados)	26
Figura 32 - a) Cabos que ligam a TCU ao módulo A10. b) Cabo que liga a TCU ao PC.	27
Figura 33 - Tensão V_f e corrente I_f no ensaio e na simulação	28
Figura 34 - Tensão VGK do GST2', Tensão VGK do GST2".....	29
Figura 35 - Corrente nos GTO's, Díodo (ao corte) e Tiristor	29
Figura 36 - Corrente no Díodo (à condução)	29
Figura 37 - Tensão aos terminais dos GTO's (V_{3-4}) e corrente do ponto 4 do módulo.....	30
Figura 38 - Tensão aos terminais do diódo (V_{3-2}) e corrente no ponto 2 do módulo.....	31
Figura 39 - Tensão e corrente aos terminais dos GTO's (circuito de protecção em circuito aberto)	32

Figura 40 - Tensão e corrente aos terminais dos GTO's (circuito de protecção em curto-circuito).....	32
Figura 41 - Tensão e corrente aos terminais do diódo (circuito de protecção em circuito aberto).....	32
Figura 42 - Tensão e corrente aos terminais do diódo (circuito de protecção em curto-circuito).....	32
Figura 43 - Tensão e corrente aos terminais do tiristor (circuito de protecção em circuito aberto).....	33
Figura 44 - Tensão e corrente aos terminais do tiristor (circuito de protecção em curto-circuito).....	33
Figura 45 - Corrente nos GTO's, Diódo (ao corte) e Tiristor.....	33
Figura 46 - Corrente no Diódo (à condução).....	34
Figura 47 - Tensão aos terminais dos GTO's (V_{3-4}) e corrente do ponto 4 do módulo.....	34
Figura 48 - Tensão aos terminais do diódo (V_{3-2}) e corrente no ponto 2 do módulo.....	35
Figura 49 - Tensão e corrente aos terminais dos GTO's (circuito de protecção em circuito aberto).....	36
Figura 50 - Tensão e corrente aos terminais dos GTO's (circuito de protecção em curto-circuito).....	36
Figura 51 - Tensão e corrente aos terminais do diódo (circuito de protecção em circuito aberto).....	36
Figura 52 - Tensão e corrente aos terminais do diódo (circuito de protecção em curto-circuito).....	36
Figura 53 - Tensão e corrente aos terminais do tiristor (circuito de protecção em circuito aberto).....	37
Figura 54 - Tensão e corrente aos terminais do tiristor (circuito de protecção em curto-circuito).....	37
Figura 55 - Fluxograma Geral do Programa de Testes.....	38
Figura 56 - Fluxograma Testes Rápidos.....	39
Figura 57 - Fluxograma Testes Avançados.....	40
Figura 58 - Janela do Diagrama de Blocos do LabVIEW.....	41
Figura 59 - Janela do Painel Frontal do LabVIEW.....	42
Figura 60 - Blocos que permitem a criação dos menus do programa de testes.....	42
Figura 61 - Blocos que permitem passagem automática entre menus.....	42
Figura 62 - Blocos para as Janelas Informativas e de Decisão.....	43
Figura 63 - Bloco para a construção da Janela de Informação.....	43
Figura 64 - Janelas Lógicas na hipótese TRUE e FALSE.....	44
Figura 65 - Janela Sequencial.....	44
Figura 66 - Pilha de Informação.....	44
Figura 67 - Bloco para aquisição de sinal e decisão sobre o teste.....	45
Figura 68 - Blocos para a criação do relatório de testes.....	46
Figura 69 - Blocos para a escolha do nome do ficheiro, localização e cabeçalho/rodapé.....	46
Figura 70 - Blocos de programação do programa de teste.....	48
Figura 71 - Esquema do sistema de tracção/travagem do material circulante ML90.....	52
Figura 72 - Actuação do filtro de linha.....	54
Figura 73 - Inversão de polaridade.....	54
Figura 74 - Aspecto físico do GTO testado.....	58
Figura 75 - Evolução temporal das correntes e tensões aos terminais de um tiristor GTO.....	59
Figura 76 - Aspecto físico do Tiristor convencional testado.....	61
Figura 77 - Aspecto físico do diódo testado.....	62
Figura 78 - Menu inicial do programa de testes.....	63
Figura 79 - Janela inicial onde é pedido informações para o teste.....	63

Figura 80 - Relatório do programa de testes 92

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características técnicas do GTO TOSHIBA SG3000GXH24.....	57
Tabela 2: Características técnicas do tiristor convencional SIEMENS BStR63133.....	61
Tabela 3: Características técnicas do díodo SIEMENS SSiR67110.....	62

Lista de Abreviaturas

A	- ânodo
BT1,2	- tiristor convencional (Módulo A30 / A40)
C0,C	- condensador
CCU	- unidade central de controlo (“Central Control Unit”)
CC-CC	- corrente contínua – corrente contínua
CH	- canal (“Channel”)
D1,2,	- diódo
DC	- corrente contínua (“Direct Current”)
FD1,2	- diódo (Módulo A30 / A40)
G	- terminal de porta (“Gate”)
GST1,2	- tiristor de corte comandado pela porta (“Gate Turn-Off Thyristor”)
K	- cátodo
Li	- bobine
máx	- máximo
min	- mínimo
PC	- computador pessoal (“Personal Computer”)
PWM	- modulação de largura de impulso (“Pulse Width Modulation”)
R0,Rf,RD...	- resistência
RMS	- valor quadrático médio ou valor eficaz (“Root Mean Square”)
TCU	- Unidade de Controlo de Tracção (“Traction Control Unit”)
U	- fonte
°	- ângulo em graus eléctricos (ex. 45°)

Lista de Símbolos

$C, 1, 2, \dots$	- valor da capacidade do um condensador
f	- frequência
f_{PWM}	- frequência de operação de dispositivos semicondutores de potência
i	- corrente
I_0	- corrente média na carga
I_{C0av}	- valor médio da corrente no condensador
i_{Li}	- valor instantâneo da corrente
I_{Liav}	- valor médio da corrente na bobine
$I_{Limáx}$	- valor máximo da corrente em L_i
$I_{Limín}$	- valor mínimo da corrente em L_i
I_{FGM}	- corrente de porta admissível directa
I_{TGQM}	- valor máximo de pico da corrente directa bloqueável pela porta
I_{TQGM}	- corrente de pico ao corte
I_{TRMS}	- valor eficaz de pico de corrente
I_{TSM}	- valor eficaz de pico de corrente não repetitivo
I_{Uav}	- corrente média na fonte
I^2t	- característica de choque térmico
L_i	- indutância da bobine
P_0	- potência entregue a carga
P_{FG} médio	- potência média de porta directa
P_i	- potência entregue pela fonte
P_{RG} médio	- potência média de porta inversa
T_j	- limites de temperatura de operação da junção
T_{stg}	- limites de temperatura de armazenamento
V_0	- valor médio da tensão v_0
V_{DRM}	- máximo valor de pico repetitivo de tensão directa
V_{Li}	- valor da tensão aos terminais da bobine
V_{Liav}	- valor médio da tensão aos terminais da bobine
V_{R0av}	- valor médio da tensão na resistência R_0
V_{RGM}	- tensão de porta inversa máxima
V_{RRM}	- máximo valor de pico repetitivo de tensão inversa
δ, θ	- factor de ciclo("duty-cycle"). É a razão entre o tempo de condução do dispositivo e o seu período de funcionamento
γ	- função do estado de condução ou corte de um conjunto de semicondutores

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A tese de mestrado foi realizada nas instalações do Metropolitano de Lisboa, E.P.E, no Parque de Material e Oficinal da Pontinha (PMOIII), utilizando para o efeito o laboratório e o material existente na Secção de Electrónica e Instrumentação.

O trabalho dá continuidade a vários trabalhos que se iniciaram em 2003/2004 pelo Metropolitano de Lisboa e pelo Instituto Superior Técnico na detecção de avarias nos conversores de potência do material circulante do Metropolitano. Mais especificamente, este trabalho dá continuidade ao trabalho desenvolvido pelo colega Rui Domingues - Ensaio de módulos de potência do conversor tracção do material circulante ML90 do Metropolitano de Lisboa, criando um programa de testes para a montagem efectuada.

A realização dos trabalhos tem contado com a orientação do Professor Fernando Silva, da área científica de Energia do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico, e o acompanhamento nas instalações do Metropolitano de Lisboa, da Engenheira Cândida Borges da Secção de Electrónica e Instrumentação do Metropolitano de Lisboa.

1.2. Motivação

A motivação para a realização deste trabalho, do ponto de vista da empresa, prende-se com a possível redução do número de equipamentos a enviar para o laboratório do fabricante Siemens, na Alemanha, para a sua reparação. Para tal, são projectados e criados sistemas de teste para os vários equipamentos das carruagens ML90 de forma a equipar a Secção de Electrónica e Instrumentação do Metropolitano de Lisboa de meios que permitam efectuar um diagnóstico rápido de avarias.

Para o estudante, a motivação na realização do trabalho reside no facto deste permitir o contacto com uma empresa com forte componente tecnológica, podendo assim aplicar na prática os conhecimentos teóricos obtidos ao longo da formação académica, desenvolvendo um projecto que terá benefícios para a empresa em questão.

1.3. Objectivos

Neste trabalho pretende-se desenvolver um programa de testes para os módulos de potência A30 e A40 do conversor de tracção das carruagens da série ML90. O objectivo do programa é verificar se os módulos apresentam um funcionamento correcto e, caso contrário, determinar os componentes que estão a causar a avaria. Os objectivos serão alcançados com a realização dos seguintes passos:

- Estudar, através de simulação e no laboratório, as unidades de comando dos módulos A30 e A40, montados como conversores redutores-amplificadores. Os sinais a serem enviados às unidades que comandam os módulos são obtidos pela interligação com a Unidade de Controlo de Tracção, TCU (“Traction Control Unit”).

- Ensaiar os módulos do conversor de corrente contínua e os seus componentes (tiristores GTO, díodos e tiristores convencionais) de forma a detectar possíveis avarias.
- Criar um programa de testes semi-automático, seguindo um protocolo de testes já existente, para tornar mais eficaz e célere o despiste de avarias por parte de um técnico.
- Criar um manual de utilizador de apoio ao programa para servir de guia no desenrolar dos testes efectuados.

1.4. Modelo ML90

No modelo em estudo, o ML90, o conversor do tipo cc-cc (contínuo-contínuo) reversível em tensão é constituído por um chopper de dois quadrantes composto por GTO's (Gate-Turn-OFF) enquanto o ondulator reversível é composto por tiristores convencionais (Anexo I).

O controlo do conversor cc-cc é efectuado por modulação de largura de impulso (PWM – "Pulse With Modulation"), permitindo ao conversor a passagem da tensão contínua da linha para o valor de corrente contínua desejada. O controlo do ondulator é efectuado por uma unidade de 6 impulsos e a velocidade da máquina determinada através da variação da frequência da componente fundamental das tensões/correntes trifásicas. Estes processos de controlo são efectuados através de microprocessadores que estão colocados nas cartas (módulos) da TCU [3].

A TCU efectua o tratamento dos valores que recebe, a partir dos sensores, a cada instante, enviando um sinal ao módulo A10. O módulo A10 é constituído pela unidade A1 (onde é recebido os sinais) e as unidades de comando de porta A2 e A3 (onde são gerados os impulsos de disparo de controlo dos tiristores GTO) [3,4]. Os sinais enviados pelo A10 e pelo A50 ou A60 (directamente da TCU) entram no conversor cc-cc reversível. Este é composto pelos módulos A30 e A40 que funcionam de forma complementar (Figura 1).

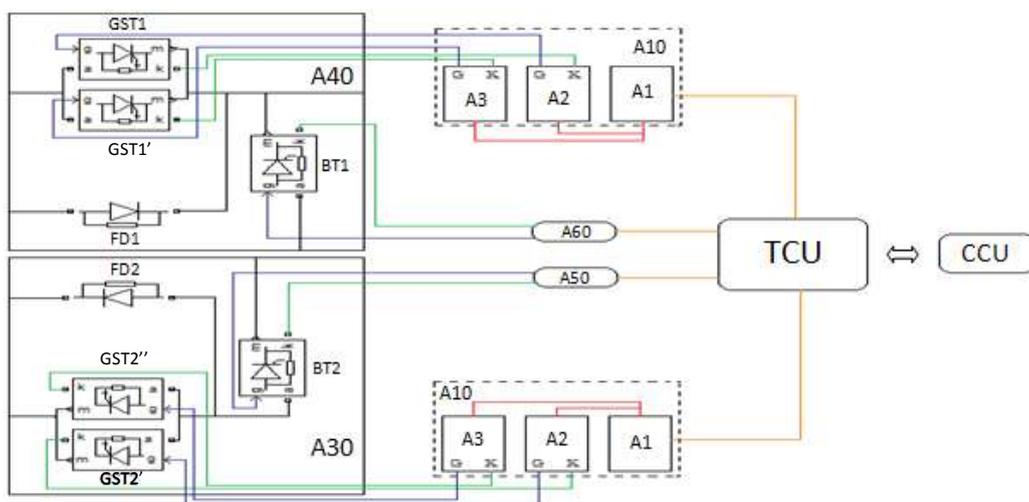


Figura 1 - Esquema de Ligação entre o CCU, TCU e os módulos.

1.5. Estrutura do Relatório

O relatório encontra-se dividido em 8 capítulos que pretendem descrever os passos de todo o projecto, desde o material que se vai testar até ao programa de teste realizado.

Aos capítulos existentes juntam-se alguns anexos dos quais se pode obter uma informação mais aprofundada sobre os elementos em estudo, montagens e o próprio programa.

Capítulo 1 – Introdução. É efectuada a apresentação do trabalho e quais os objectivos da sua realização.

Capítulo 2 – Módulos A30 e A40 - Apresentação e Descrição. Consiste numa pequena descrição da constituição dos módulos e as montagens necessárias para a interligação com os restantes equipamentos (A10, A50 e A60, TCU e CCU).

Capítulo 3 – Montagem CC-CC Redutor-Amplificador. São descritas as simplificações e os cálculos utilizados para o dimensionamento da montagem CC-CC do tipo redutor-amplificador adaptada no trabalho.

Capítulo 4 – Circuitos de Protecção. Após a apresentação dos módulos e da montagem utilizada nos testes, são apresentados os circuitos de protecção existentes nos módulos e o seu funcionamento das várias situações ao longo de um período de tempo.

Capítulo 5 – Simulação e Ensaio. São apresentados os circuitos de simulação e de ensaio, assim como a demonstração e comparação dos resultados.

Capítulo 6 – Programa de Testes. É feita a descrição de como foi construído o programa e a estrutura do mesmo

Capítulo 7 – Conclusão. Neste capítulo é realizada uma conclusão baseada nos resultados obtidos assim como são sugeridas algumas ideias para a melhoria deste projecto.

Capítulo 8 – Bibliografia. Inclui as referências de todas as obras, trabalhos e locais consultados para a realização desta tese.

Anexos

2. Módulos A30 e A40 - Apresentação e Descrição

Os módulos A30 e A40 funcionam de forma complementar formando, no seu conjunto, um conversor cc-cc reversível de dois quadrantes (Figura 2).

Este conversor tem o objectivo de controlar o circuito intermédio do conversor de tracção do ML90 (Anexo I).

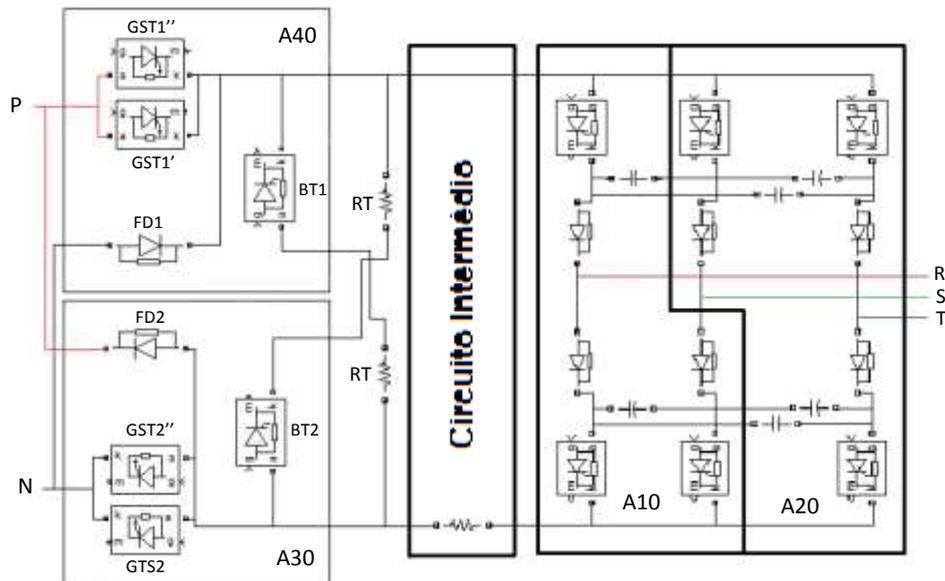


Figura 2 - Conversor de Tracção do ML90 (Simplificado)

2.1. Descrição dos módulos A30 e A40

2.1.1. Módulo A30

O módulo A30 (Figura 3) tem como componentes principais os GTO's GST2, o diodo FD2 e o tiristor BT2.

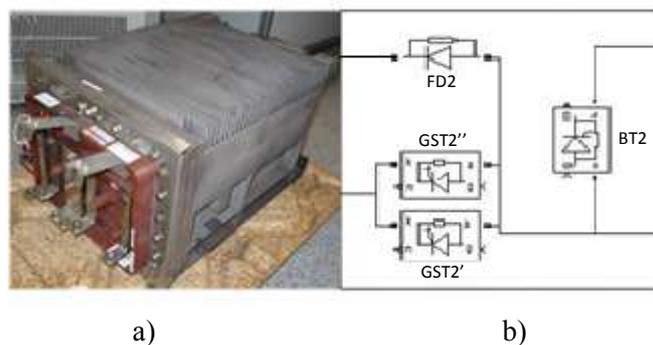


Figura 3 - Módulo A30: a) Aspecto do módulo b) Esquema interno com os semicondutores principais

Os dois primeiros formam uma parte do conversor cc-cc de dois quadrantes que serve de controlo à corrente no circuito intermédio (Figura 2), enquanto o terceiro componente integra o 'chopper' de travagem reostática.

No conversor cc-cc de dois quadrantes existem dois GTO's GST em paralelo para que a transferência de potência do conversor seja dividida por ambos os semicondutores. Este facto leva a

que a frequência de comutação total seja de 250Hz, 125Hz para cada GST, desfasados de 180° (Figura 4). Este funcionamento origina um menor tremor na corrente que leva a uma menor variação do binário electromagnético por parte da máquina assíncrona, poupando-lhe o desgaste a nível mecânico.

O díodo FD2 entra em funcionamento na altura em que nenhum dos GTO's está em funcionamento, fechando assim o circuito.

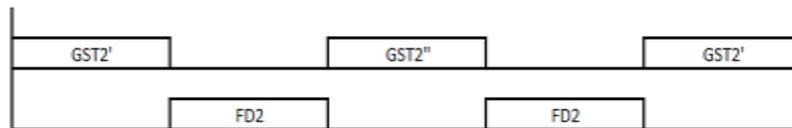


Figura 4 - Intervalos de condução dos GST e FD2

No conversor de tracção podemos ver o sistema de travagem regenerativa, que permite o funcionamento tipo gerador, enviando energia para a rede quando a carruagem trava. Quando a energia injectada na rede é superior ao possível, a energia remanescente é dissipada através do chopper de travagem reostática, no qual se encontra o tiristor BT2 e a resistência de travagem RT.

2.1.2. Módulo A40

O segundo braço do conversor cc-cc é formado pelo módulo A40. A constituição deste módulo (Figura 5) é igual ao do módulo A30, apresentando uma configuração simétrica.

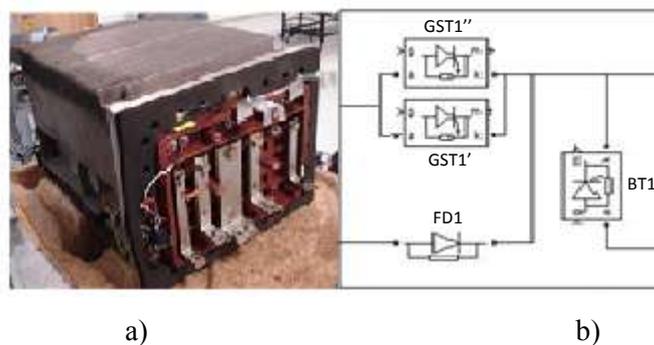


Figura 5 - Módulo A40: a) Aspecto do módulo b) Esquema interno com os semicondutores principais

Os dois GTO's do módulo A40 (GST1'e GST1'') e o díodo FD1 têm um disparo igual ao do módulo A30 (Figura 6).

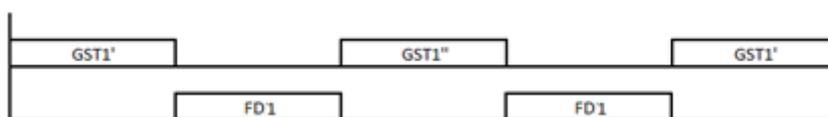


Figura 6 - Exemplo de intervalos de condução dos semicondutores principais do módulo A40

2.2. Elementos necessários para o controlo dos semicondutores

No ML90, existem vários equipamentos que efectuam o controlo dos semicondutores existentes no módulo A30 e A40.

Os três equipamentos que efectuam esse controlo são:

- As unidades centrais de controlo (CCU e TCU);
- Módulo de gate A10;
- Unidades de conexão dos impulsos actuadores A50 e A60.

2.2.1. Unidades centrais de controlo

O processamento de toda a informação existente no comboio é efectuado nas unidades centrais de controlo (Figura 7) - CCU (Central Control Unit) e TCU (Traction Control Unit).

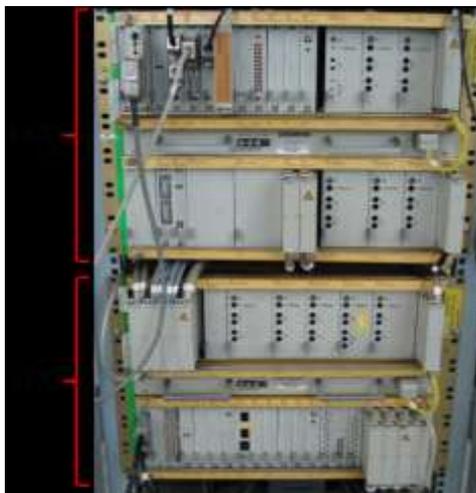


Figura 7 - Armário que contém a CCU e a TCU

A TCU é constituída por cartas de memórias, conversores analógicos/digitais e vice-versa, unidades de processamento e de alimentação, entre outras. A TCU é controlada através do CCU, sendo deste que recebe os sinais para o seu funcionamento. O controlo dos conversores de potência é efectuado a partir de microprocessadores existentes nas cartas desta unidade, de uma forma digital, através de um “Software” que se encontra guardado nas suas memórias. Este “Software” foi efectuado numa linguagem de programação denominada SIBAS[®] CAD¹.

A informação que chega às unidades centrais de controlo é proveniente dos vários sensores e comandos que existem ao longo das carruagens (painel do maquinista, sensores de velocidade, posição, portas, etc). Essa informação é processada pela CCU e TCU e enviada para o módulo de gate A10 ou para as unidades A50/A60 sob a forma de sinais que, após devidamente modulados, são enviados aos semicondutores.

¹ Sistema multiusuário baseado em bancos de dados online. É uma ferramenta importante para fins administrativos e de processamento de dados distribuídos. Foi inventado pela Norsk Data em 1975.

2.2.2. Módulo de Gate A10

Ao contrário dos tiristores convencionais, os GTO's têm a possibilidade de serem desligados. Como tal implica um grande esforço por parte do sistema, existe, associado aos módulos A30 e A40, um módulo totalmente dedicado a essa função, o módulo de gate A10 (Figura 8). Esse módulo é constituído pelos submódulos A1, A2 e A3 que serão descritos de seguida.



Figura 8 - Módulo de Gate A10

A ligação do TCU ao módulo de gate A10 é assegurada pelo módulo A1 através de avisos enviados por “push-pull” a 100mA. Este é um módulo de duplo comando que recebe os avisos de ligar e desligar de cada grupo de GTO's, GST1'/GST1" ou GST2'/GST2", caso se esteja a comandar o módulo A40 ou A30, respectivamente. Os avisos são convertidos, por cada um dos osciladores de compasso, numa sequência modulada de impulsos, que servem para a transmissão do sinal (lig./desl.) a enviar aos GTO's e para a alimentação de energia das peças de alta tensão A2 e A3.

Para além das funções de comunicação entre o TCU e os módulos de tracção, o módulo A1 apresenta as seguintes funções lógicas e de protecção:

- Desconexão de subtensão;
- Bloqueio dos comandos de ignição dos tiristores com eventual ordem de desligar, caso 24 V de alimentação de energia sejam insuficientes;
- Confirmação de erro no comando da TCU, em caso de A2 e A3 emitirem um sinal de erro.

As peças de alta tensão A2 e A3 encontram-se ao potencial do cátodo do GTO ao qual estão ligados. A ligação das peças de alta tensão ao módulo A1 é efectuada através de um transformador, associado a um rectificador de carga para a alimentação de energia da unidade de desmodulação.

2.2.3. Unidades de conexão dos impulsos actuadores A50 e A60

As unidades de conexão dos impulsos actuadores A50 e A60 (Figura 9) dão forma aos avisos de excitação enviados pela TCU para os tiristores convencionais. Estas unidades permitem que os tiristores sejam correctamente ligados conforme a especificação enviada: impulsos com um

alongamento de cerca de $50\mu s$, com um valor de cerca de 20V no início da pulsação e um pico negativo de -60 V no fim.

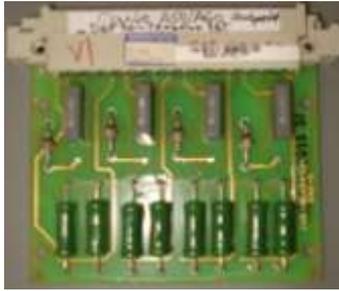


Figura 9 - Unidade de conexão de impulsos actuadores A50

As unidades A50 e A60 têm na sua constituição quatro circuitos iguais ao representado na Figura 10 e cada um deles fornece os sinais de disparo de um tiristor. A unidade A50 liga os três tiristores do módulo de potência pertencente ao ondulator de corrente e ao tiristor BT2 do A30, enquanto a unidade A60 liga os três tiristores do A20 (também pertencente ao ondulator de corrente) e ao tiristor BT1 do A40. Como as unidades A50 e A60 apresentam a mesma constituição, podem ser utilizados de forma trocada sem que isso provoque uma avaria no funcionamento.

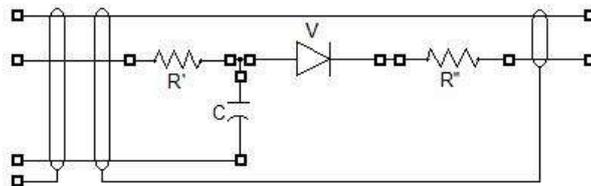


Figura 10 - Circuito de conexão de impulsos

3. Montagem CC-CC Redutor-Amplificador

Para o teste ao módulo de potência A30/A40 foi necessário criar um circuito que crie no módulo, a ilusão de este estar ligado no seu local original na carruagem. Desta forma e atendendo às limitações existentes no laboratório face à realidade da carruagem, decidiu-se adoptar uma montagem cc-cc do tipo redutor-amplificador. Esta configuração permite uma melhor adaptação aos módulos A30 e A40 e também que os semicondutores sejam comutados a uma tensão superior aos 70V disponibilizados pela fonte existente no laboratório. Este aumento de tensão provocado pela montagem cc-cc redutor-amplificador é essencial para a verificação do bom funcionamento dos semicondutores, uma vez que estes, em funcionamento normal na carruagem, suportam uma tensão de 750V. Teoricamente, é possível obter este valor em laboratório mas devido a limitações do material disponível, os testes serão efectuados com valores entre os 350 e os 400V.

3.1. Simplificações para dimensionar os elementos da montagem redutora-amplificadora

De forma a facilitar os cálculos para os componentes a usar na montagem redutora-amplificadora, foram efectuadas simplificações, como por exemplo as idealidades dos componentes e o regime permanente dos circuitos.

A montagem redutora-amplificadora a ser efectuada para o estudo dos módulos A30 e A40 está apresentada na Figura 11. Como se pode observar, o circuito (um para cada módulo) cumpre todas as restrições topológicas:

- As bobinas (elementos que se comportam como fontes de corrente) não são interrompidas
- Os condensadores (elementos que se comportam como fontes de tensão) não são curto-circuitados.

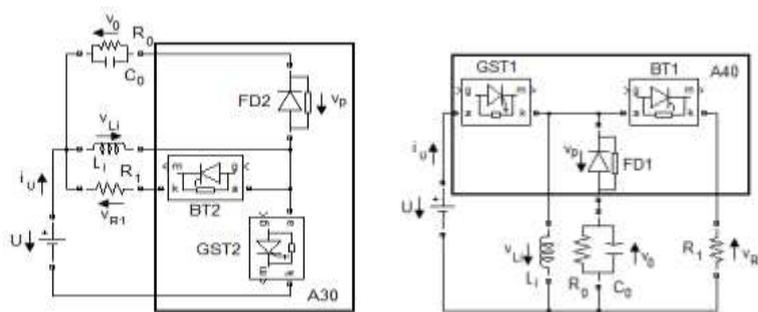


Figura 11 - Montagens dos módulos A30 e A40 como conversores cc-cc do tipo redutor-amplificador

3.2. Dimensionamento do conversor CC-CC do tipo redutor-amplificador - Plano Teórico

Para os cálculos teóricos, o funcionamento dos GTO's em paralelo, com uma frequência de 125Hz e uma defasagem de 180° será considerado como sendo apenas um a funcionar com o dobro da frequência, ou seja, 250Hz. Esta simplificação, como se poderá ver nos cálculos futuros, irá tornar o estudo do circuito mais intuitivo, sendo os resultados mais fáceis de se obter.

3.2.1. Período de funcionamento dos tiristores

Nos módulos em estudo, podemos encontrar dois tipos diferentes de tiristores (os convencionais e os GTO's) que terão um período de funcionamento diferente no funcionamento do mesmo.

Partindo do funcionamento do GTO e começando em $t=0$, temos que o GTO é posto em condução no início dos tempos e durante t_{on} sendo passado ao corte na restante parte do período. O factor de ciclo inerente a este funcionamento é de $\delta=t_{on}/T$, com uma frequência $f_{PWM}=1/T$.

No caso do tiristor convencional temos que de $t=0$ até t' , em que $\delta T \leq t' \leq T$, este encontra-se ao corte, entrando em condução a partir do instante $t=t'$ até $t=T$, estando em condução durante t'_{on} , ou seja, com factor de ciclo $\theta=t'_{on}/T$.

Assim, e considerando as simplificações indicadas a usar no estudo, temos que os intervalos de condução e corte são:

GTO:

- Conduz de $0 \leq t \leq \delta T$
- Corta de $\delta T \leq t \leq T$

Tiristor convencional:

- Corta de $0 \leq t \leq (1-\theta)T$
- Conduz de $(1-\theta)T \leq t \leq T$

3.2.2. Estados do circuito redutor-amplificador

De forma a calcular os valores dos componentes do circuito redutor-amplificador, são efectuadas as várias hipóteses (estados) de funcionamento que o circuito pode ter, conforme o estado de condução ou corte em que se encontram os semicondutores.

Em cada estado será indicado a malha do circuito que está em funcionamento e retirar as fórmulas possíveis para os cálculos que são necessários efectuar.

Estado 1 – GTO em condução com os restantes semicondutores ao corte

Na Figura 12 pode-se observar o esquema do redutor-amplificador com o GTO em condução no intervalo $0 \leq t \leq \delta T$. Para uma melhor percepção do circuito, os semicondutores ideais são representados por interruptores.

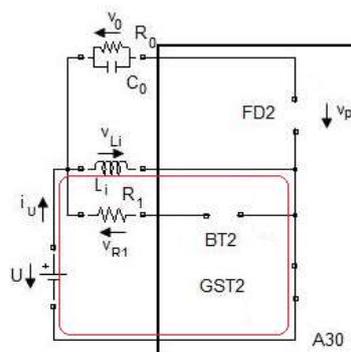


Figura 12 - Circuito redutor-amplificador com o diodo e tiristor ao corte e o GTO em condução

Observando a malha a vermelho da Figura 12, verifica-se que, para o regime permanente e não lacunar, tem-se:

$$v_{Li} = U \quad (1)$$

Estado 2 – Díodo à condução com os restantes semicondutores ao corte

A Figura 13 esquematiza o momento em que o díodo se encontra em condução e o GTO e tiristor convencional encontram-se ao corte. Este caso acontece no intervalo $\delta T \leq t \leq (1-\theta)T$.

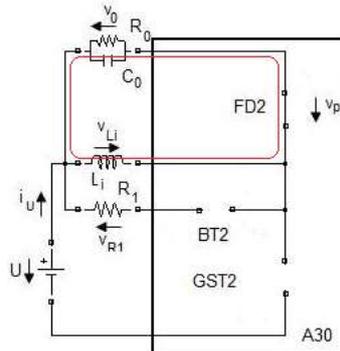


Figura 13 - Circuito redutor-amplificador com díodo em condução e os restantes semicondutores ao corte

Novamente observando a malha a vermelho da Figura 13, pode-se verificar que, para o regime permanente, tem-se:

$$v_{Li} = -v_0 \quad (2)$$

Como $\Delta V_0 \ll V_0$, temos que a tensão aos terminais da carga é V_0 , ficando:

$$v_{Li} = -V_0 \quad (3)$$

Estado 3 – Díodo e tiristor convencional à condução com GTO ao corte

No intervalo $(1-\theta)T \leq t \leq T$ o circuito redutor-amplificador apresenta o díodo e o tiristor convencional à condução, estando apenas o GTO ao corte. O esquema do circuito nesse intervalo de tempo encontra-se representado na Figura 14.

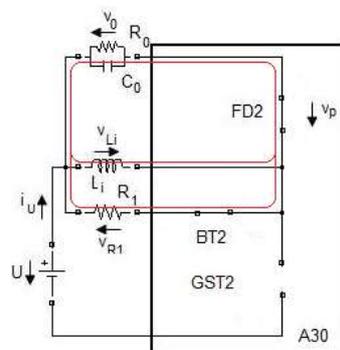


Figura 14 - Circuito redutor-amplificador com GTO ao corte e restantes semicondutores em condução

Olhando novamente para a malha que se forma com esta configuração verifica-se que, para o regime permanente, obtém-se:

$$v_{Li} = -V_0 \quad (4)$$

3.2.3. Relações de transferência do conversor

A introdução do tiristor na montagem de teste, veio introduzir uma dificuldade suplementar no cálculo das relações de transferência do conversor. O objectivo destes cálculos é o de determinar os valores mínimos de indução da bobine L_i e da capacidade do condensador C_0 , para um tremor máximo. Como o intuito é testar os módulos A30 e A40 e não criar um redutor-amplificador perfeito, foi adoptado o pior caso ($\theta=1-\delta$), permitindo assim que o tiristor convencional seja disparado no momento em que o diodo começa a conduzir. Esta hipótese para o tiristor leva à simplificação do circuito (Figura 15).

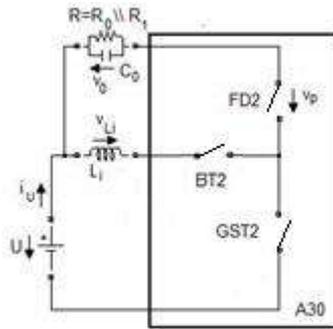


Figura 15 - Circuito redutor-amplificador para o A30 simplificado

Utilizando as expressões (1), (3) e (4), anteriormente calculadas, tem-se:

$$v_{Li}(t) = \begin{cases} +U & 0 < t < \delta T \\ -V_0 & \delta T < t < T \end{cases} \quad (5)$$

A expressão para o cálculo do valor médio vem da integração ao longo do tempo da expressão anterior, ou seja:

$$v_{Liav} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{Li}(t) dt \quad (6)$$

Substituindo a equação (5) na (6), tem-se:

$$v_{Liav} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\delta T} U \cdot dt + \int_{\delta T}^T -V_0 \cdot dt \right] \quad (7)$$

Como, em regime permanente, o valor médio da tensão aos terminais da bobine L_i é nulo ($v_{Liav}=0$), fica-se com:

$$v_{Liav} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\delta T} U \cdot dt + \int_{\delta T}^T -V_0 \cdot dt \right] = 0 \quad (8)$$

Resolvendo a equação (8), obtém-se

$$\frac{V_0}{U} = \frac{\delta}{1-\delta} \Leftrightarrow V_0 = \frac{\delta}{1-\delta} \cdot U \quad (9)$$

Da equação (9) e sabendo que o δ varia no intervalo]0;1], a tensão V_0 é sempre positiva, mas de polaridade contrária a U . O valor médio da tensão V_0 pode, teoricamente, assumir valores no intervalo]0;+∞[, de onde se conclui:

$$V_0 = \begin{cases} < U & 0 < \delta < 0,5 \\ > U & 0,5 < \delta \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

O valor médio da corrente I_0 na carga determina-se directamente a partir da equação do valor médio da tensão V_0 , donde resulta:

$$I_0 = \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta}{1-\delta} \quad (11)$$

De forma a manter os cálculos o mais simples possível, são admitidas perdas nulas nos elementos do circuito (GST2, FD2, BT2, L_i , C_0) e o rendimento unitário, levando a que a potência debitada pela fonte U (P_i) seja igual à dissipada na carga P_o ($P_i=P_o$).

$$U \cdot I_{U_{av}} = V_0 \cdot I_0 = U \cdot \frac{\delta}{1-\delta} \cdot I_0 \quad (12)$$

Seguindo a dedução anterior ($P_i=P_o$) e juntando a informação das equações (11) e (12), tem-se:

$$P_i = U \cdot I_{U_{av}} = U \cdot \delta \cdot I_{Li} = \frac{U^2}{R} \cdot \frac{\delta^2}{(1-\delta)^2} \quad (13)$$

3.2.4. Determinação dos componentes do conversor

Bobine L_i

Analisando o circuito em condução permanente e supondo que V_0 é constante e que existe uma variável γ definida por:

$$\gamma = \begin{cases} 1 \rightarrow GST1 \text{ CORTE} \wedge FD1 \text{ CONDUIZ} (\delta T < t < T) \\ 0 \rightarrow GST1 \text{ CONDUIZ} \wedge FD1 \text{ CORTE} (0 < t < \delta T) \end{cases} \quad (14)$$

A equação diferencial que descreve a dinâmica temporal da corrente $i_{Li}(t)$, pode ser escrita:

$$\frac{di_{Li}}{dt} = \frac{(1-\gamma) \cdot U - \gamma \cdot V_0}{L_i} \quad (15)$$

Ao integrar a equação (15) e conjugando com a variável γ (14), obtém-se a solução:

$$i_{Li}(t) = \frac{(1-\gamma) \cdot U}{L_i} \cdot t - \frac{V_0}{L_i} \cdot \gamma \cdot (t - \delta T) + i_{Li}(\gamma t_{on}) \quad (16)$$

Onde $i_{Li}(\gamma t_{on})$ representa o valor inicial em cada subintervalo.

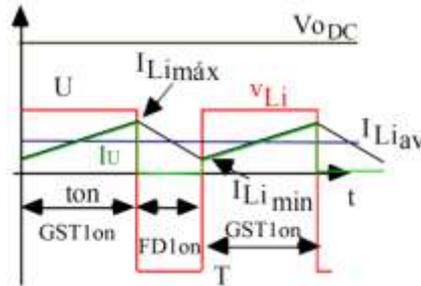


Figura 16 - Formas de onda ideais do conversor redutor-amplificador

Através da Figura 16 [10], pode-se verificar que a corrente i_{Li} em $t=t_{on}$ ($i_{Li}(t_{on})=I_{Limax}$) sofreu um acréscimo Δi_{Li} em relação à corrente $i_{Li}(\gamma t_{on})=I_{Limin}$, e que, de acordo com (16) quando $\gamma=0$, se tem:

$$\Delta i_{Li} = \frac{1}{L} \cdot \left[\int_0^{\delta T} U \cdot dt \right] = -\frac{1}{L} \cdot \left[\int_{\delta T}^T -V_0 \cdot dt \right] = \frac{U}{L_i} \cdot \delta T = \frac{V_0}{L_i} \cdot (1-\delta)T \quad (17)$$

Pode-se calcular o I_{Limin} (I_{Limax}), subtraindo (somando) a I_{Liaav} metade da variação total da corrente (Δi_{Li}). O valor de I_{Liaav} pode ser obtido, através da aplicação da lei dos nós às correntes (em valores médios) do nó do ânodo de FD1, sabendo que o valor médio da corrente I_{C0av} no condensador é nulo, pois V_0 admite-se constante:

$$I_{Liaav} = I_{Uav} + I_0 = I_0 \cdot \frac{\delta}{1-\delta} + I_0 = \frac{I_0}{1-\delta} = \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta}{(1-\delta)^2} \quad (18)$$

Então, para $i_{Li}(t)$, função do estado dos dispositivos semicondutores de potência do circuito, suposta sempre positiva, obtém-se a expressão:

$$i_{Li}(t) = \frac{(1-\gamma) \cdot U}{L_i} \cdot t - \frac{\gamma \cdot U \delta}{L_i \cdot (1-\delta)} \cdot (t - \delta T) + \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta}{(1-\delta)^2} + (2\gamma - 1) \cdot \frac{U}{2L_i} \cdot \delta T \quad (19)$$

As equações (5) e (19), v_{Li} e i_{Li} respectivamente, encontram-se representadas na Figura 16, bem como a tensão v_0 . Como esta última não será rigorosamente constante, a corrente $i_{Li}(t)$, não terá um andamento perfeitamente linear como o apresentado.

De (17) pode-se calcular o coeficiente de auto-indução da bobine L_i que garante uma variação (ou tremor) da corrente igual a um Δi_{Li} pretendido:

$$L_i = \frac{U}{\Delta i_{Li}} \cdot \delta T = \frac{V_0}{\Delta i_{Li}} \cdot (1-\delta)T = \frac{U}{\Delta i_{Li} \cdot f_{PWM}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{U}{V_0}} \quad (20)$$

Condensador C_0

Quando o GTO se encontra em condução ($0 < t < \delta T$), a resistência R de carga é alimentada directamente pelo condensador. Supondo que $\Delta V_0 \ll V_0$ tem-se:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = -C_0 \cdot \frac{d}{dt} V_0 \quad (21)$$

Supondo que V_0 varia lentamente ao longo do período T , a sua derivada é aproximadamente constante, ou seja, $C_0 \cdot \frac{dv_0}{dt} \approx C_0 \cdot \frac{\Delta v_0}{\Delta t}$. Como $\Delta t = \delta T$, vem $C_0 \cdot \frac{\Delta v_0}{\delta T} = -\frac{V_0}{R}$.

Obtém-se assim a expressão:

$$C_0 = \frac{\delta T}{R} \cdot \left| \frac{V_0}{\Delta V_0} \right| \quad (22)$$

Usando a relação de transferência do conversor redutor-amplificador (9), temos que:

$$C_0 = \frac{\delta^2 T}{(1 - \delta) R \Delta V_0} U \quad (23)$$

3.3. Dimensionamento do conversor CC-CC do tipo redutor-amplificador - Plano Real

Para o dimensionamento real do conversor, é colocado um circuito de protecção da fonte constituído por um diodo, uma resistência e um condensador. O esquema dessa montagem pode ser observado na Figura 17.

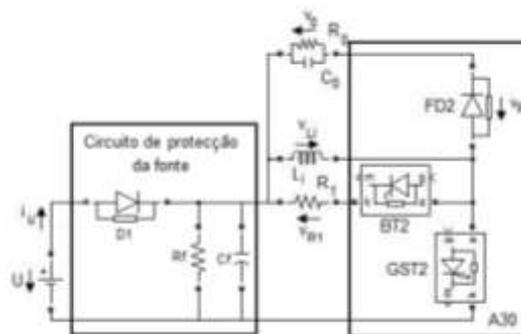


Figura 17 – Esquema da montagem redutora-amplificadora utilizada para os testes

O circuito é alimentado através da fonte de alimentação DELTA ELEKTRONIKA SM7020-D, tendo como entrada 320V/8A e saída variável de (0V a 35V)/20A e (35V a 70V)/10A, com uma frequência de trabalho de 250Hz. Esta frequência corresponde ao funcionamento dos dois tiristores GTO a funcionar (cada um com uma frequência de 125Hz) desfasados de 180°.

3.3.1. Cálculo do factor de ciclo do tiristor GTO

A fonte disponível para os testes debita 10A. A presença do condensador de linha C no circuito, permite que a tensão se mantenha quando a corrente pedida à fonte é maior que 10A,

fornecendo a corrente adicional e fazendo com que a potência máxima da fonte seja aproveitada, ou seja, que $I_{U_{av}}=10$ e $U=70$.

Em relação às resistências, foram seleccionadas as de maior valor para o R_0 , de forma a se obter as menores correntes possíveis, criando assim tensões mais elevadas na carga, obtendo uma potência de 700W. Com a chegada de novas resistências (180Ω e 150Ω) ao laboratório, obtiveram-se os valores de $R_0=180\Omega+150\Omega=330\Omega$ e $R_1=30\Omega$.

Partindo dos dados anteriores e das equações (11) e (12) para determinar o factor de ciclo do GTO(δ) tem-se:

$$I_{U_{av}} = \frac{\delta}{1-\delta} \cdot I_0 \Leftrightarrow I_{U_{av}} = \frac{U}{R} \cdot \left(\frac{\delta}{1-\delta}\right)^2 \Leftrightarrow 10 = \frac{70}{27,5} \cdot \left(\frac{\delta}{1-\delta}\right)^2 \Rightarrow \delta = 0,66$$

Através do resultado anterior e da equação (10) pode-se calcular a tensão de saída:

$$V_0 = \frac{\delta}{1-\delta} U = \frac{0,66}{1-0,66} \cdot 70 \approx 140V$$

De forma a que os restantes semicondutores do circuito tenham tempo de condução, o factor de ciclo do tiristor convencional é escolhido como sendo metade do período deixado pelo GTO, ou seja, $\theta=(1-\delta)/2=0,17$.

O díodo FD2 vai conduzir no intervalo $\delta T \leq t \leq T$, enquanto que o tiristor convencional BT2 conduz no intervalo de $(1-\theta)T \leq t \leq T$, sendo que, para este caso e uma vez que a tensão aplicada aos terminais vai ser sempre V_0 , os valores de corrente média nas cargas serão:

$$I_{R0_{av}} = \frac{V_0}{R_0} = \frac{140}{330} \approx 0,42A$$

$$I_{R1_{av}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{R1}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_{(1-\theta)T}^T \frac{V_0}{R_0//R_1} \cdot dt = \theta \cdot \frac{V_0}{R_0//R_1} = 0,17 \times \frac{140}{\frac{330 \times 30}{330 + 30}} \approx 0,87A$$

Aplicando a lei das malhas ao circuito da Figura 17, verifica-se que as tensões máximas que o GTO e o díodo têm de suportar correspondem ao valor máximo da soma da tensão de entrada com a tensão de saída, ou seja:

$$V_{DRM} = U + V_0 = 70 + 140 = 210V$$

$$V_{RRM} = U + V_0 = 210V$$

Da mesma forma tem-se para o tiristor convencional:

$$V_{DRM} = V_0 = 140V$$

$$V_{RRM} = U = 70V$$

A partir dos resultados obtidos pode-se então calcular o valor da indutância L_i e do condensador C_0 .

3.3.2. Cálculo da indutância L_i

Para o cálculo de L_i é importante saber a corrente média da bobine. Para a calcular é utilizada a equação (18), de onde se obtém:

$$I_{L_{iav}} = \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta}{(1-\delta)^2} = \frac{70}{27,5} \cdot \frac{0,66}{(1-0,66)^2} \approx 14,5A$$

Supondo como valor de variação da corrente da bobine, 50% do seu valor médio e considerando a equação (20), chega-se ao resultado da indutância:

$$L_i = \frac{U}{\Delta i_{L_i}} \cdot \delta T = \frac{70}{0,5 \times 14,5} \cdot 0,66 \cdot \frac{1}{250} = 0,0254 \approx 25mH$$

Devido à limitação do material existente no laboratório do Metropolitano de Lisboa, a bobine escolhida para o circuito apresenta uma indutância de 26,5mH. Esta pequena alteração de valor acaba por ser benéfico para o circuito uma vez que garante uma variação de corrente mais pequena do que admitido.

3.3.3. Determinação do condensador C_0

Supondo uma variação de 5% da tensão V_0 e através da equação (23), obtém-se:

$$C_0 = \frac{\delta^2 \cdot T}{(1-\delta) \cdot R} \cdot \frac{U}{\Delta V_0} = \frac{0,66^2 \times 1/250}{(1-0,66) \times 27,5} \cdot \frac{70}{0,05 \times 140} = 0,0019 = 1,9mF$$

No laboratório do Metropolitano de Lisboa apenas estão disponíveis condensadores de 4,7mF e 6mF. Mesmo sendo possível utilizar o condensador de 4,7mF, pois já cobria o valor calculado, na montagem em teste será utilizado a configuração de condensadores de 6mF presentes na Figura 18 (paralelo da série de 2 condensadores) de forma a possibilitar um maior aumento da tensão que percorre o circuito sem danificar o material.



Figura 18 - Configuração dos condensadores no circuito

3.4. Dimensionamento do conversor CC-CC do tipo redutor-amplificador – Plano

Experimental

Com o objectivo de fazer aumentar a tensão nos terminais dos semicondutores, foi efectuado, durante o ensaio, variações aos factores de ciclo calculados anteriormente. Deste modo, os novos valores serão o ponto de partida para obter os valores finais de tensões, correntes, indutância L_i e a do condensador C_0 .

- $\delta_{experimental} = 0,85$
- $\theta_{experimental} = 0,10$

A diferença apresentada entre os valores calculados e os experimentais deve-se às diversas simplificações efectuadas no circuito:

- Considerar todos os elementos da montagem como sendo ideais;
- Não levar em consideração, para os cálculos, a existência de circuitos de protecção na fonte de tensão e nos semicondutores do módulo;
- Equações calculadas assumindo o intervalo de funcionamento $\delta T \leq t \leq T$ para o tiristor convencional.

3.4.1. Tensão de saída e tensões máximas nos semicondutores

Através da equação (10) pode-se então calcular a tensão V_0 que efectivamente vai estar no circuito:

$$V_0 = \frac{\delta}{1 - \delta} \cdot U = \frac{0,85}{1 - 0,85} \times 70 \approx 396,7V$$

Com o valor da tensão de saída calculado, pode-se verificar que a tensão máxima aplicada a cada semiconductor é:

$$V_{DRMGST} = U + V_0 = 70 + 396,7 = 466,7V$$

$$V_{RRMFD} = U + V_0 = 466,7V$$

$$V_{DRMBT} = V_0 = 396,7V$$

$$V_{RRMBT} = U = 70V$$

3.4.2. Corrente média nas cargas

$$I_{R0av} = \frac{V_0}{R_0} = \frac{396,7}{330} \approx 1,2A$$

$$I_{R1av} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{R1}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_{(1-\theta)T}^T \frac{V_0}{R_0 // R_1} \cdot dt = \theta \cdot \frac{V_0}{R_0 // R_1} = 0,08 \times \frac{396,7}{\frac{330 \times 30}{330 + 30}} = 1,15A$$

3.4.3. Indutância L_i

Com a alteração dos factores de ciclo dos semicondutores, o valor da indutância calculada anteriormente pode já não garantir as especificações pretendidas.

Assim, para calcular o novo valor de indutância L_i é necessário recorrer à equação (20):

$$L_i = \frac{U}{\Delta i_{Li}} \cdot \delta T$$

Como Δi_{Li} varia com o factor de ciclo devido à corrente média, o novo valor dessa corrente terá de ser calculado através da equação (18):

$$I_{Li_{av}} = \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta}{(1-\delta)^2} = \frac{70}{27,5} \cdot \frac{0,85}{(1-0,85)^2} \approx 96,16A$$

$$L_i' = \frac{U}{\Delta i_{Li}} \cdot \delta T = \frac{70}{0,5 \times 96,16} \cdot 0,85 \cdot \frac{1}{250} = 0,005 = 5mH < L_i$$

Como a bobine anteriormente escolhida, 26,5mH, é maior que os cálculos agora efectuados, não existem problemas em manter a escolha, garantindo melhor ainda que a variação da corrente é pequena.

3.4.4. Condensador C_0

Através da equação (23) e com base nos resultados obtidos para a tensão, tem-se:

$$C_0 = \frac{\delta^2 \cdot T}{(1-\delta) \cdot R} \cdot \frac{U}{\Delta V_0} = \frac{0,85^2 \times \frac{1}{250}}{(1-0,85) \times 27,5} \cdot \frac{70}{0,05 \times 396,7} = 0,0025 = 2,5mF$$

Como foi indicado anteriormente, os condensadores que estão a ser usados são de 6mF, não sendo por isso necessário alterar a configuração, uma vez que o sobredimensionamento deste leva a que o valor do tremor da tensão seja inferior aos 5% estipulados.

4. Circuitos de Protecção

4.1. Fonte

Como indicado anteriormente, tanto a fonte de tensão como os semicondutores do módulo de potência A30 e A40 encontram-se protegidos.

Como a carga associada à fonte é indutiva, surgem correntes de retorno que podem danificá-la, se a atravessarem. Por esse motivo é colocado um circuito de protecção (Figura 19) formado pelo diodo D1 e pela resistência R_f . A função da resistência é fazer dissipar essas correntes, enquanto a do diodo é que não permitir que essas correntes tomem a direcção da fonte. O condensador C_f , existente na figura, apresenta-se como uma tentativa de aproximar o funcionamento do circuito ao funcionamento real dos módulos A30 e A40 no comboio, representando por isso o condensador 13A1.C (Anexo I).

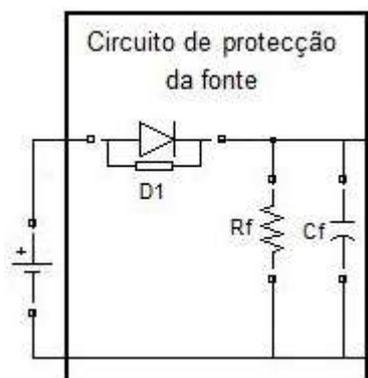


Figura 19 - Circuito de protecção da fonte de tensão

De forma a não influenciar o circuito quando o GTO se encontra a conduzir, a resistência R_f apresenta um valor de 660Ω , fazendo com que a corrente que a percorre não seja muito elevada.

O uso do condensador tem como objectivo manter a tensão aplicada ao circuito num valor constante. Como tal, o valor do condensador C_f deveria ser estipulado pelo valor do 13A1.C, que é de 24mF . Devido ao facto de nas instalações do Metropolitano de Lisboa, E.P.E não existirem condensadores com esse valor, o condensador C_f terá um valor de 47mF . Esta opção, além de ser a que se encontra mais próxima do valor pretendido, trará benefícios para o circuito, pois permite uma variação de tensão mais pequena.

4.2. Módulo A30

O esquema da montagem cc-cc redutora-elevada do módulo A30 e os respectivos circuitos de protecção encontra-se na Figura 20

O módulo A30 apresenta os tiristores GTO (GST2' e GST2'') e o diodo V3 em paralelo. A presença do diodo no módulo permite a continuidade da corrente indutiva nas máquinas assíncronas (Anexo I).

Cada semicondutor do módulo A30 apresenta um circuito de protecção dV_{AK}/dt constituído por condensadores, díodos e resistências. Estes circuitos de protecção, vulgarmente denominados

por “snubber” RC com diodo de roda livre, evitam que os semicondutores fiquem danificados com a variação de tensão gerada pelas passagens condução/corte e corte/condução.

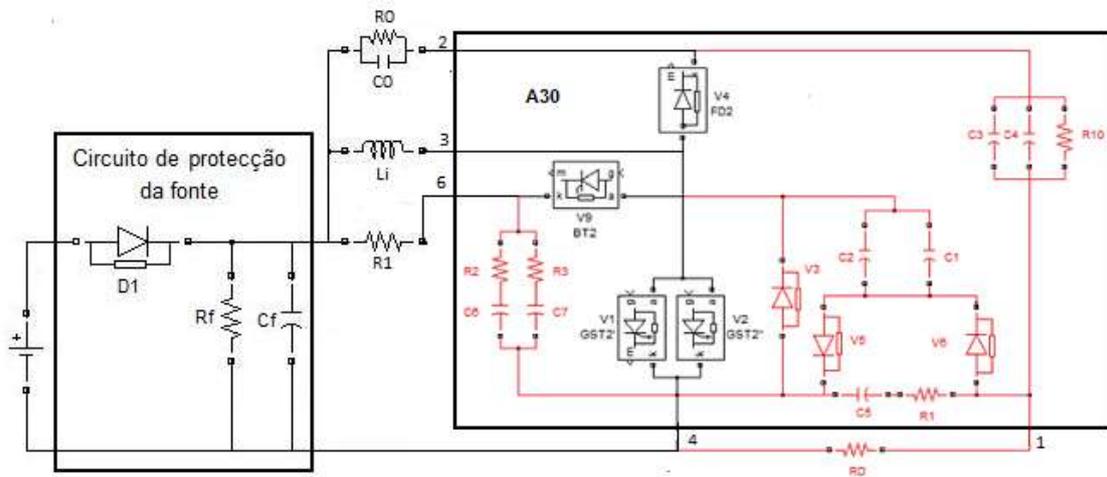


Figura 20 - Montagem cc-cc redutora-amplidora com o módulo A30 e respectivos circuitos de protecção

4.2.1. Circuito de protecção dos GTO's

O circuito de protecção dos GTO's, formado pelos condensadores C1 e C2, os díodos V5 e V6 e a resistência R_D , encontra-se representado a vermelho na Figura 21.

Quando um dos GTO's inicia a comutação condução/corte, a tensão aos seus terminais aumenta, devido a variação brusca da corrente, o diodo V5 entra em condução e os condensadores são carregados com uma tensão $V_{C1C2} = V_{AK_GST2} = V_0 + U$ (Circuito a azul da Figura 21).

Na comutação corte/condução, o diodo V6 entra em condução (devido à tensão dos condensadores C1 e C2) e a energia armazenada nos condensadores é dissipada pelas resistências. A descarga dos condensadores pode provocar a disrupção dos díodos V5 e V6, pelo que é criada uma malha RC, constituída pelo condensador C5 e a resistência R1, para a sua protecção (Circuito a verde na Figura 21).

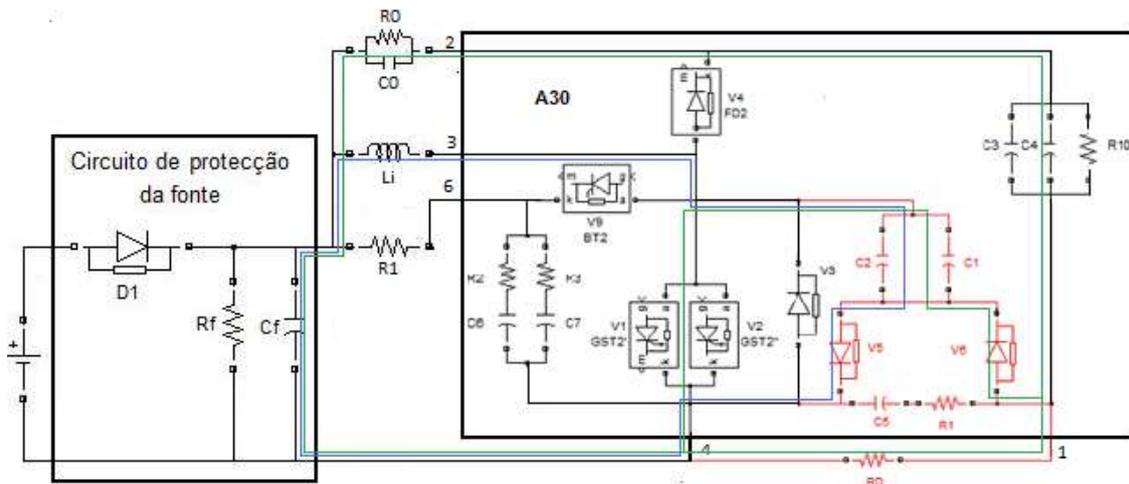


Figura 21 - Circuito de protecção dos GTO's e seu funcionamento

Através da simulação, podemos obter os sinais de tensão e corrente (Figura 22) nesse circuito de protecção.

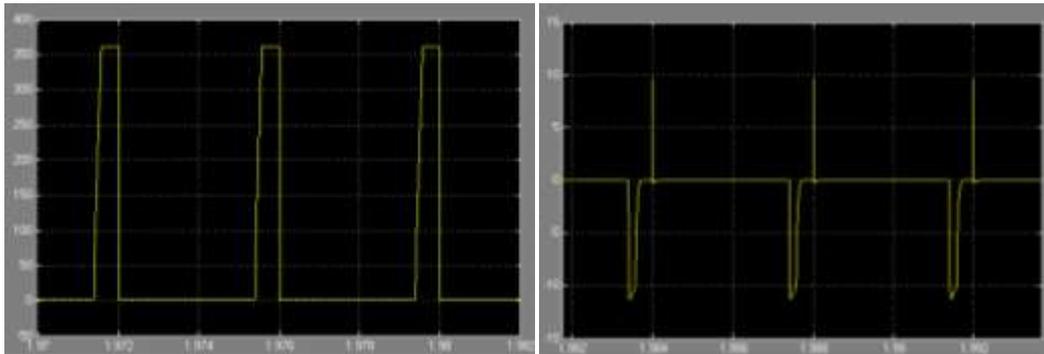


Figura 22 – Tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção dos GTO's

4.2.2. Circuito de Protecção do Tiristor

O circuito de protecção do tiristor, formado pelo paralelo dos condensadores C6 e C7 em série com o paralelo das resistências R2 e R3 (a vermelho na Figura 23), protege-o dos picos de tensão que tem origem nas correntes indutivas dos motores e do ondulador de tensão. Os condensadores são carregados quando é efectuada a comutação corte/condução do tiristor (Circuito a azul da Figura 23), através da corrente da bobine e são descarregados na comutação condução/corte do tiristor (Circuito a verde da Figura 23), passando o GTO à condução.

Através da simulação, podemos obter os sinais de tensão e corrente (Figura 24) nesse circuito de protecção.

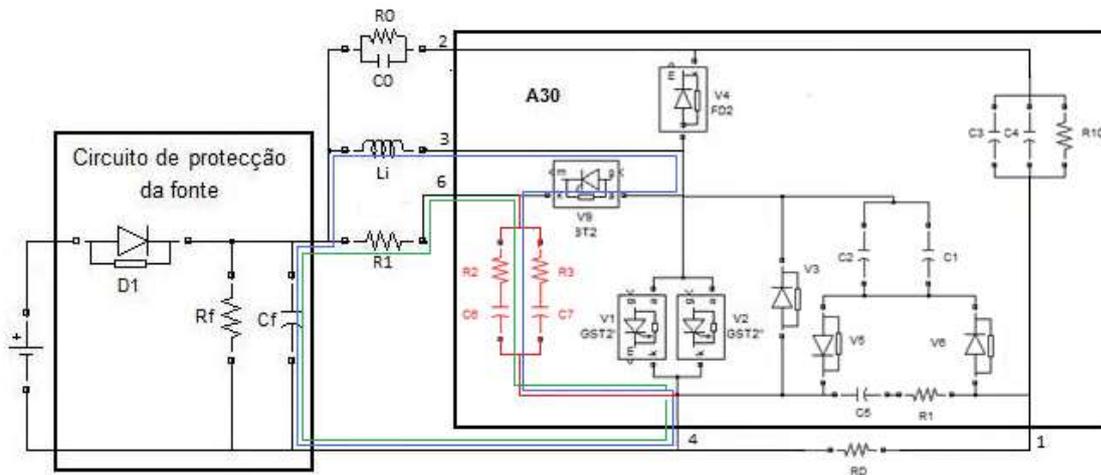


Figura 23 - Circuito de protecção do Tiristor e seu funcionamento

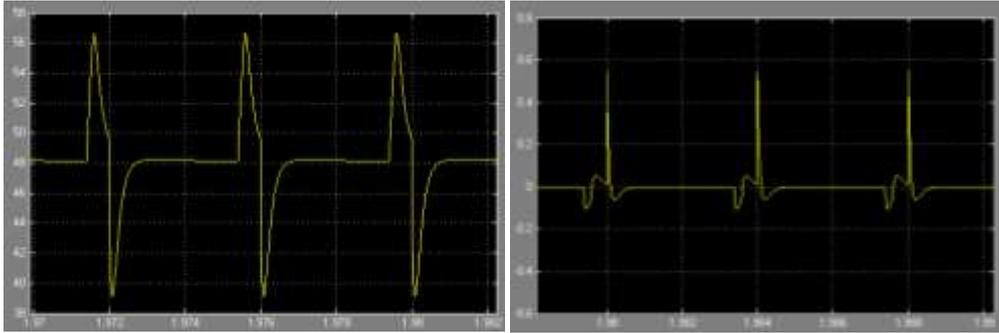


Figura 24 - Tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção do Tiristor

4.2.3. Circuito de Protecção do Díodo

O díodo é protegido através do paralelo dos condensadores C3 e C4 e a resistência R10, representado a vermelho na Figura 25. Na comutação corte/condução do díodo, os condensadores são carregados com uma tensão V_0+U (Circuito a azul da Figura 25), evitando a disrupção do díodo, que pode ser provocada pelas rápidas elevações de corrente. Com a desactivação do módulo, a resistência tem a função de descarregar a tensão acumulada nos condensadores (Circuito a verde da Figura 25).

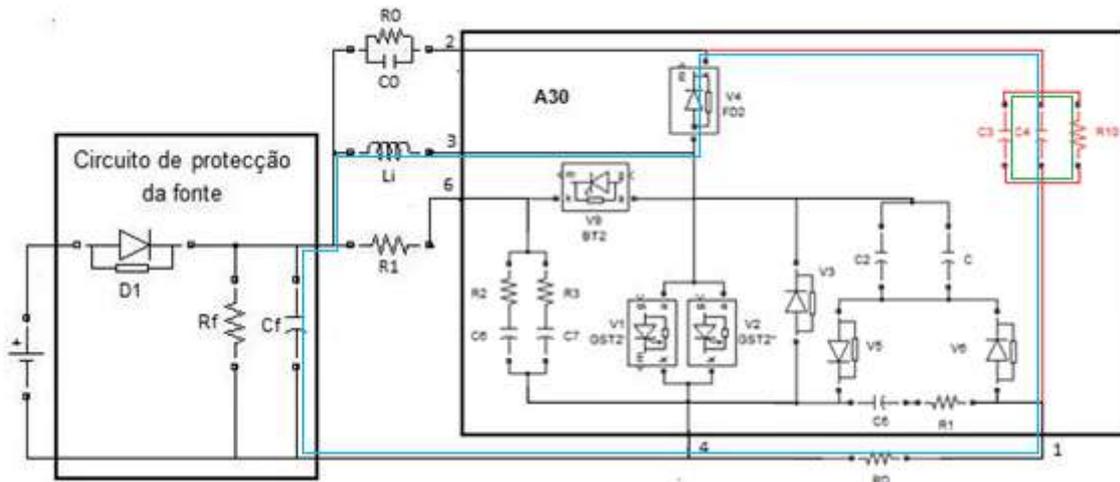


Figura 25 - Circuito de protecção do Díodo e seu funcionamento

Através da simulação, podemos obter os sinais de tensão e corrente (Figura 26) nesse circuito de protecção.

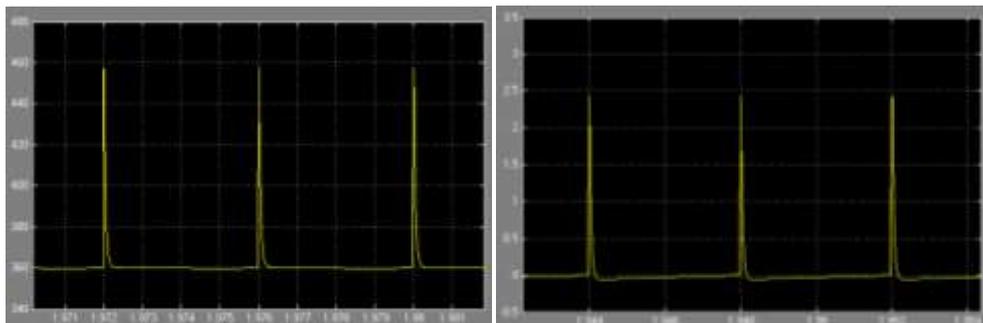


Figura 26 - Tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção do Díodo

4.3. Módulo A40

O módulo A40, pelas razões indicadas no módulo A30, apresenta também circuitos de protecção aos seus semicondutores. Esses circuitos de protecção encontram-se na Figura 27 (vermelho – circuito protecção dos GTO's, verde – circuito de protecção do diodo e azul – circuito de protecção do tíristor) e como se pode observar, a constituição é semelhante ao do módulo A30. Como o funcionamento dos circuitos de protecção é igual, não é efectuado o seu estudo detalhado.

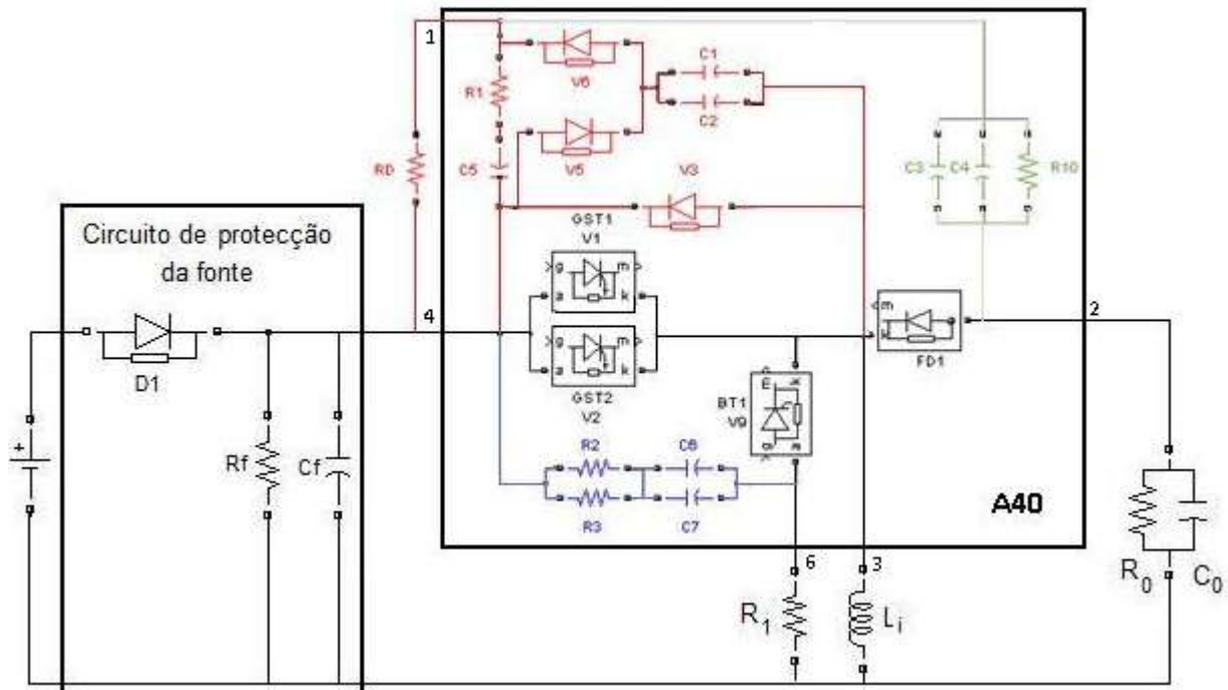


Figura 27 - Montagem cc-cc redutora-ampliadora com o módulo A30 e respectivos circuitos de protecção

5. Simulação e Ensaio

Com o intuito de prever os resultados em laboratório, foram efectuadas simulações aos módulos A30 e A40 a funcionar numa montagem redutora-amplidora. Essas simulações foram importantes para conhecer o comportamento dos módulos, obtendo-se as ondas de tensão e de corrente próximas do que será obtido experimentalmente.

Os ensaios em laboratório mostram diferenças entre os valores das ondas em relação à simulação. Essas diferenças, tanto nas tensões como nas correntes, podem ser explicadas com a idealidade que o modelo matemático do “Matlab/Simulink” impõe, como por exemplo, na fonte de tensão U , onde não é possível limitar a potência fornecida, como acontece na fonte real. Por fim é efectuada uma comparação dos resultados obtidos por cada uma das montagens entre os sinais de simulação e de ensaio.

5.1. Simulação

De forma a perceber os resultados que serão obtidos nos testes, foram criados modelos de teste para o módulo A30 (Figura 28 e 29) e o A40 (Figura 30 e 31).

Seguindo a linha de ensaios realizados e o protocolo do programa de testes para os módulos A30 e A40, foram criados modelos de testes rápidos (Figura 28 e 30), com o objectivo de estudar o funcionamento dos semicondutores quando apresentam uma carga aos seus terminais (verificação das correntes de fuga) e os modelos de testes avançados (Figura 29 e 31) para o estudo dos módulos quando se encontram no circuito do redutor-amplificador (simulação de funcionamento normal).

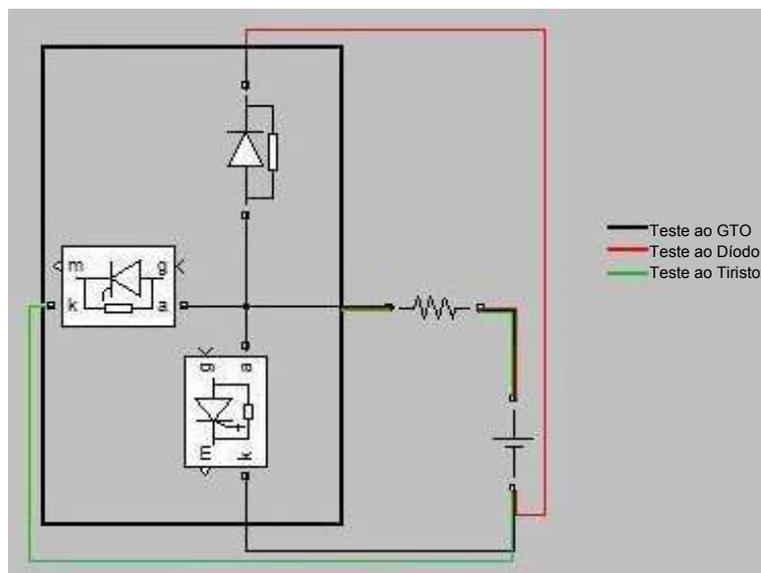


Figura 28 - Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A30 (Testes rápidos)

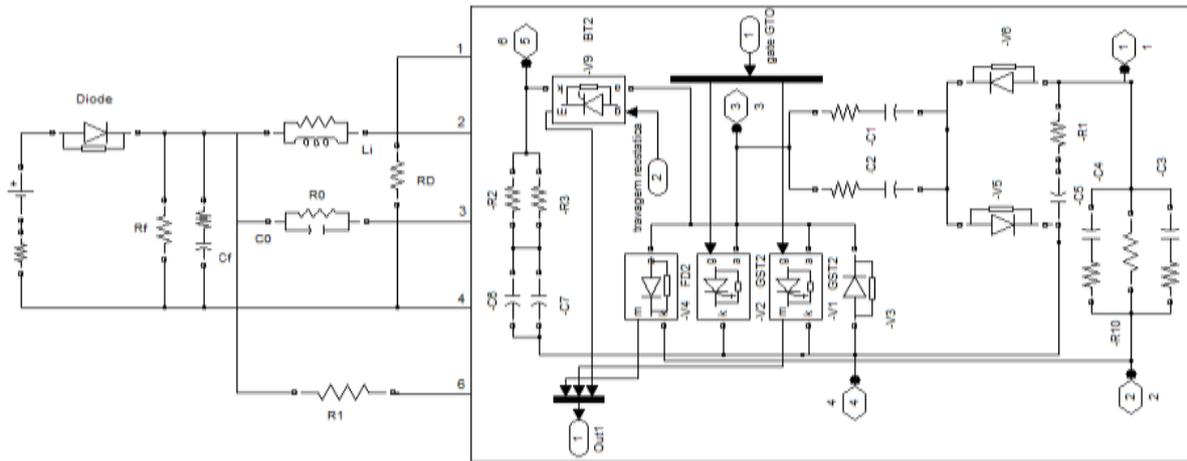


Figura 29- Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A30 (Testes avançados)

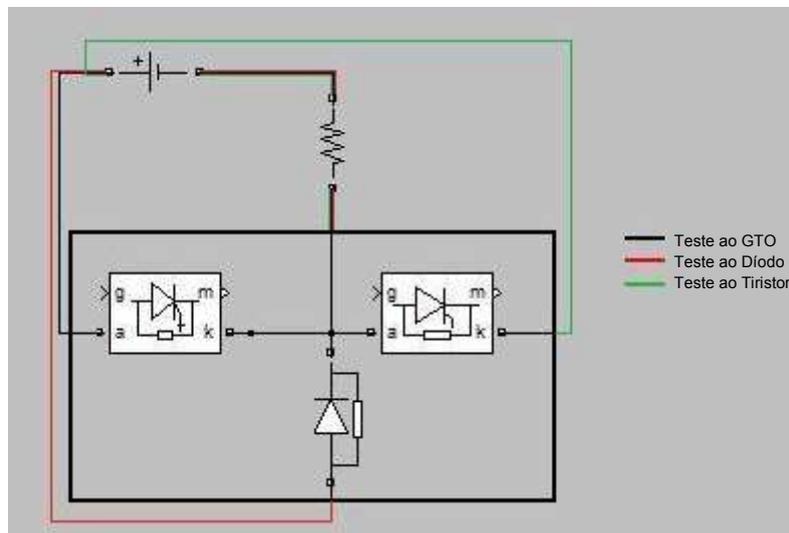


Figura 30 - Esquema da simulação em "Matlab/Simulink" para o A40 (Testes rápidos)

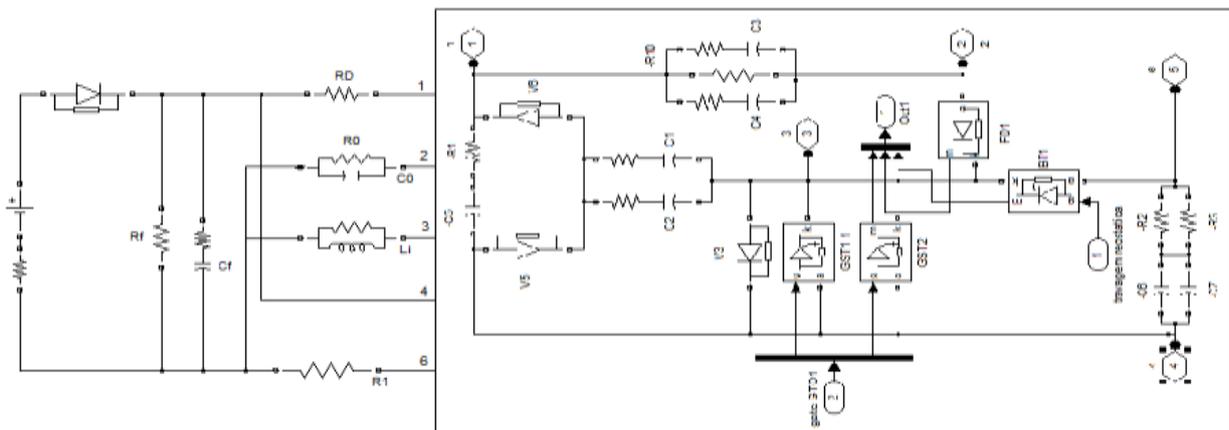


Figura 31 - Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A40 (Testes Avançados)

Com o objectivo de obter as condições anteriormente calculadas (factor de ciclo do GTO de 85% e factor de ciclo do tiristor convencional de 15%) foram colocados dois parâmetros na montagem, P e pt, que efectuam o disparo dos semicondutores correspondentes.

Os valores destas variáveis terão que ser indicados antes da simulação do circuito.

5.2. Ensaio

Para os testes avançados é necessário obter os sinais de disparo dos GTO's. Assim, é utilizada a torre apresentada na secção 2.2.1, constituída pelo CCU e o TCU. Na Figura 32 podem-se ver as ligações:

- TCU ao módulo de gate A10 através da carta C007 e dos cabos X1, X2 e X3;
- TCU à unidade A50 (ou A60) através da carta C023;
- Unidade A50 (ou A60) à gate dos tiristores, através do cabo presente na Figura 32.c;
- TCU ao PC do banco de testes (Figura 32.b)



Figura 32 - a) Cabos que ligam a TCU ao módulo A10. b) Cabo que liga a TCU ao PC. c) Cabo que liga a unidade A50 aos terminais GK do tiristor convencional. d) Raquete de ligações dos sinais que entram e saem da TCU e da CCU. e) TCU. f) Ficha onde liga a unidade A50. g) Cabo que liga a TCU à unidade A50. h) Ficha que liga à carta C007. i) Ficha da carta C023. j) Carta onde liga a ficha do cabo para ligar ao PC

De forma a verificar se os módulos de potência (A30 ou A40) estão a receber os sinais enviados pela TCU, foi criado um programa de testes. Esse programa visa o despiste de problemas (avarias no A10, por exemplo) que surjam na obtenção dos sinais, evitando que os módulos de potência sejam enviados para os laboratórios do fornecedor sem que estejam realmente avariados.

Os passos e comandos necessários para efectuar o teste dos módulos são (depois de todas as ligações efectuadas) descritos no manual do utilizador (Capítulo 6)

5.3. Resultados – Simulação e Ensaio

Com os resultados das simulações efectuadas nos circuitos nas Figuras 28 a 31 e com os dados dos ensaios realizados aos módulos A30 e A40 no laboratório, pode-se comparar os resultados para perceber de que forma de aproxima o modelo de simulações. Irão ser apresentados os sinais comuns aos dois módulos e de seguida os sinais de cada teste.

5.3.1. Fonte de tensão

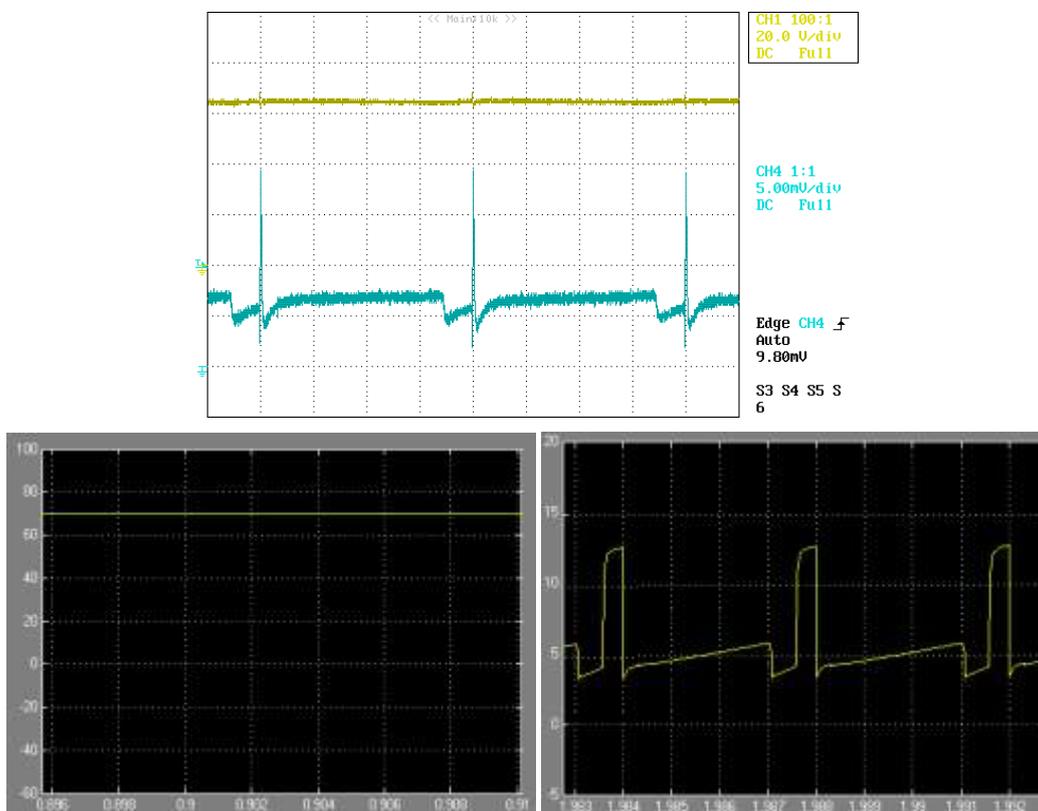


Figura 33 - Tensão V_f e corrente I_f no ensaio e na simulação

Na Figura 33 observa-se a tensão e a corrente aplicada ao circuito redutor-amplificador, sendo a primeira de 70V e a segunda de aproximadamente 17A. Enquanto a tensão apresenta-se contínua, a corrente apresenta um formato trapezoidal, com picos derivados das descargas dos condensadores de protecção existentes nos circuitos (Capítulo 4). Este fenómeno tem origem na descarga dos condensadores C1 e C2, no momento que cada um dos GTOs entra em condução de cerca de 150A (transitório efectuado a aproximadamente 100 μ s).

Como se pode observar, as formas de onda da simulação tem uma forma idêntica às do ensaio, diferenciando-se nos valores de corrente e tensão. Devido ao carácter ideal dos blocos do "Matlab/Simulink", os picos apresentados na simulação são ligeiramente maiores.

5.3.2. Sinais de disparo dos semicondutores

Na Figura 34 pode-se observar os sinais de disparo dos tiristores GTO (enviados pelo módulo A10)

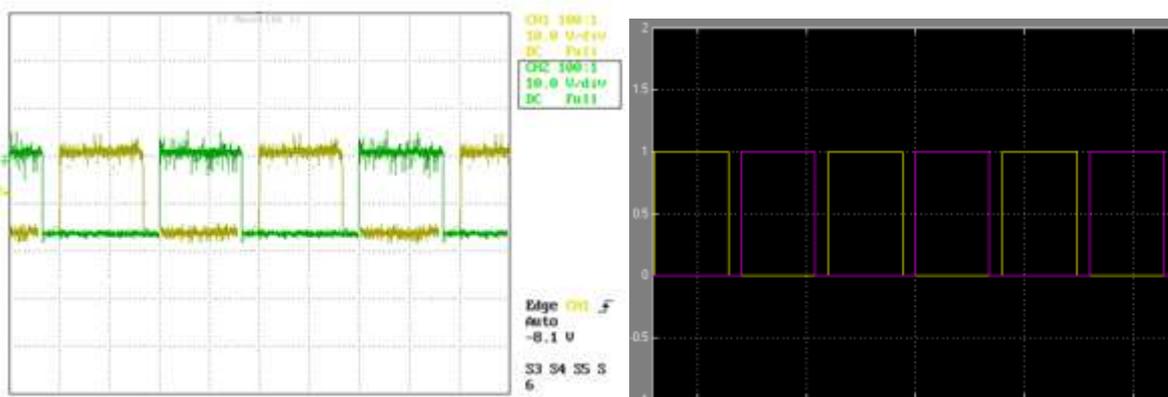


Figura 34 - Tensão VGK do GST1', Tensão VGK do GST2''

5.3.3. Módulo A30

5.3.3.1. Testes Rápidos

Os objectivos dos testes rápidos são de perceber se algum dos semicondutores apresenta correntes de fuga superiores aos que devem apresentar aquando no seu funcionamento normal.

Nos testes realizados com a fonte de tensão a 70V e a resistência a 70Ω, obtiveram-se os resultados das Figuras 35 e 36.

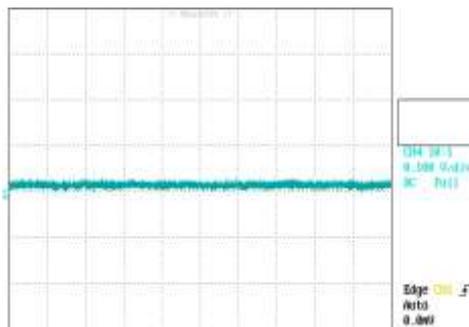


Figura 35 - Corrente nos GTO's, Díodo (ao corte) e Tiristor

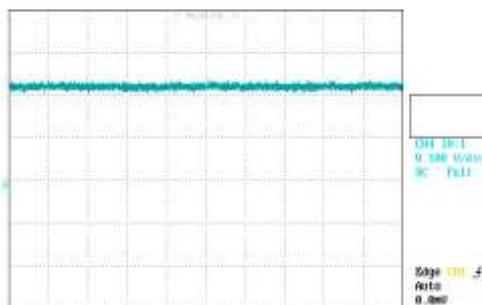


Figura 36 - Corrente no Díodo (à condução)

Em caso de avaria causada por um curto-circuito em algum dos semicondutores, a corrente nos GTO's, no Díodo ao corte ou no Tiristor, teriam o valor da corrente do Díodo à condução.

5.3.3.2. Testes Avançados

Na Figura 37 pode-se verificar a tensão aos terminais dos tiristores GTO e a corrente que sai do ponto 4 do módulo. Pela figura vê-se que a tensão dos GTO's ultrapassa os 350V, apresentando-se com um valor aproximadamente de 380V, quando estes se encontram ao corte. Essa tensão é sempre positiva do ânodo para o cátodo e resulta da soma da tensão da fonte (V_f) com a tensão de saída (V_o). Este tensão, na montagem actual, poderá ser ultrapassado (pode chegar a aproximadamente 430V) mas por uma questão de segurança do equipamento optou-se por realizar os testes a uma tensão mais baixa.

Pode-se observar uma vez mais a semelhança dos sinais entre os ensaios e as simulações, voltando a notar a pequena diferença de valores.

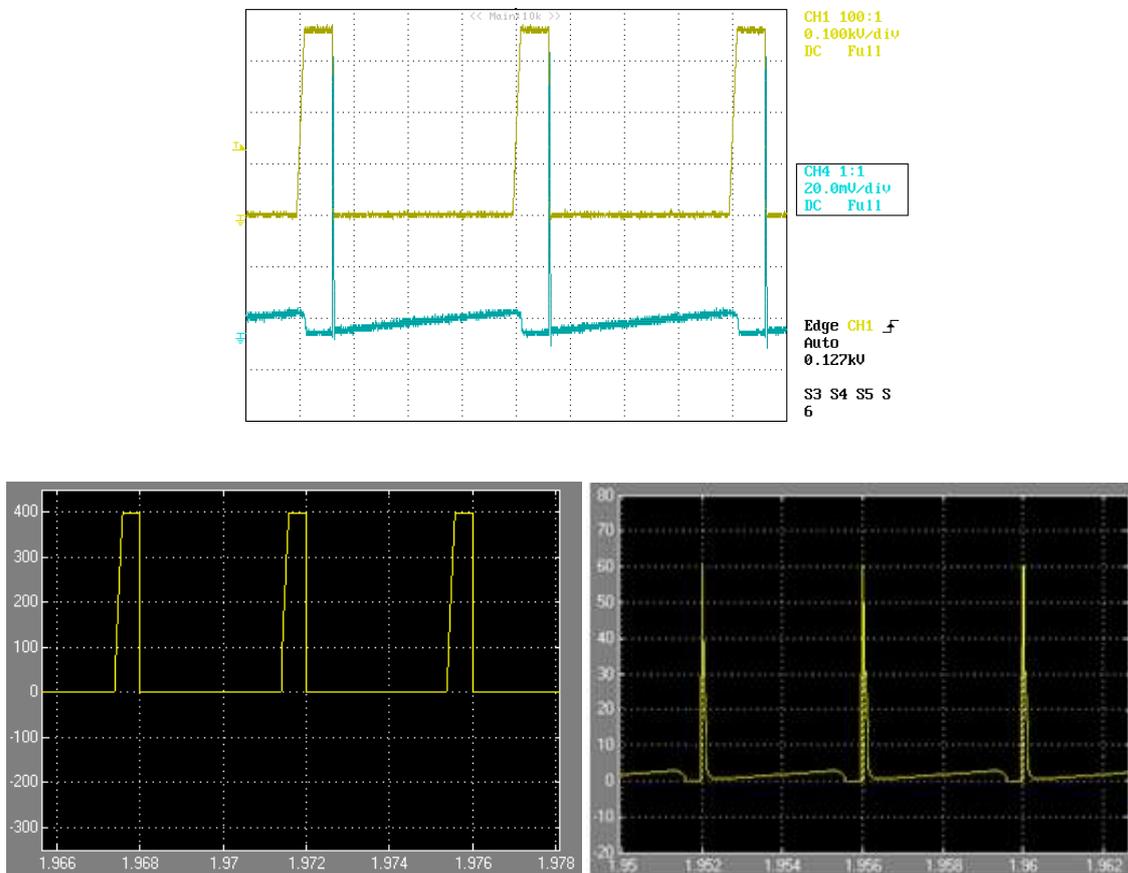


Figura 37 - Tensão aos terminais dos GTO's (V_{3-4}) e corrente do ponto 4 do módulo

A Figura 38 apresenta a tensão aos terminais do díodo FD2 e a corrente no ponto 2 do módulo. Pela figura, pode-se ver que a tensão é idêntica à dos terminais dos GTO's, de uma forma inversa, apresentando os 380V entre o cátodo e o ânodo. A corrente no ponto 2 do módulo é, quase na sua totalidade, a que passa pelo díodo. Quando o díodo entra em condução a corrente apresenta o valor de 14A, diminuindo constantemente até ao valor de 10A antes de passar ao corte, onde toma o valor de 0A. O pico de corrente de -180A apresentado na Figura 38 deve-se à descarga dos

condensadores C3 e C4. A queda brusca de corrente que é observada durante o intervalo de condução do diódo resulta da passagem à condução do tiristor BT2, fazendo com que a corrente da bobine seja dividida pelos dois semicondutores.

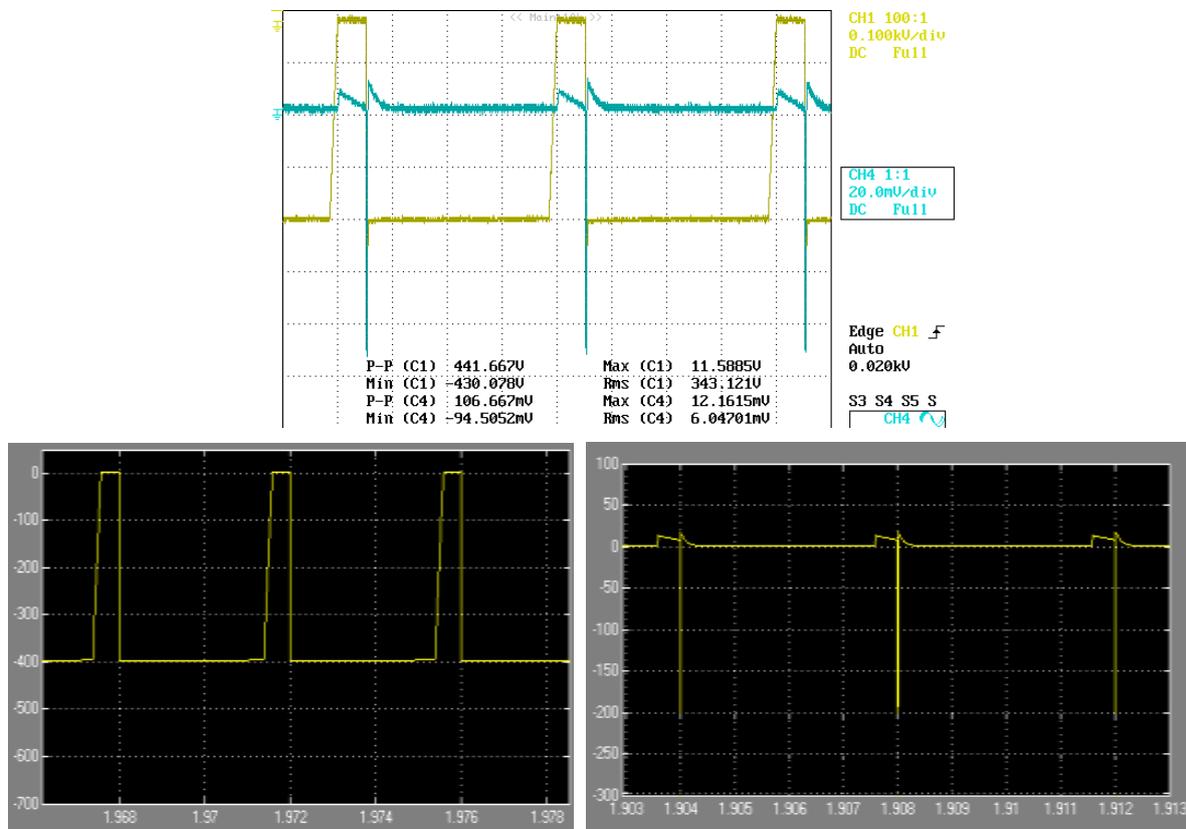


Figura 38 - Tensão aos terminais do diódo (V3-2) e corrente no ponto 2 do módulo

5.3.3.3. Avarias

Apesar de não poder ser confirmado os resultados das simulações seguintes, devido ao facto de não se poder abrir os módulos de potência A30 e A40, foram efectuadas simulações para as avarias de curto-circuito e circuito aberto para os circuitos de protecção dos GTO's, diódo e tiristor.

As simulações poderão dar uma ideia de que sinais se pode encontrar no caso de uma destas avarias acontecer no módulo em teste e serviram de base para os despistes efectuados no programa de testes para a obtenção da causa da avaria.

Os sinais da corrente e da tensão no circuito de protecção dos GTO's quando se encontra em circuito aberto encontram-se na Figura 39 e quando se encontra em curto-circuito na Figura 40.

Os sinais da corrente e da tensão no circuito de protecção do diódo quando se encontra em circuito aberto encontram-se na Figura 41 e quando se encontra em curto-circuito na Figura 42.

Os sinais da corrente e da tensão no circuito de protecção do tiristor quando se encontra em circuito aberto encontram-se na Figura 43 e quando se encontra em curto-circuito na Figura 44.

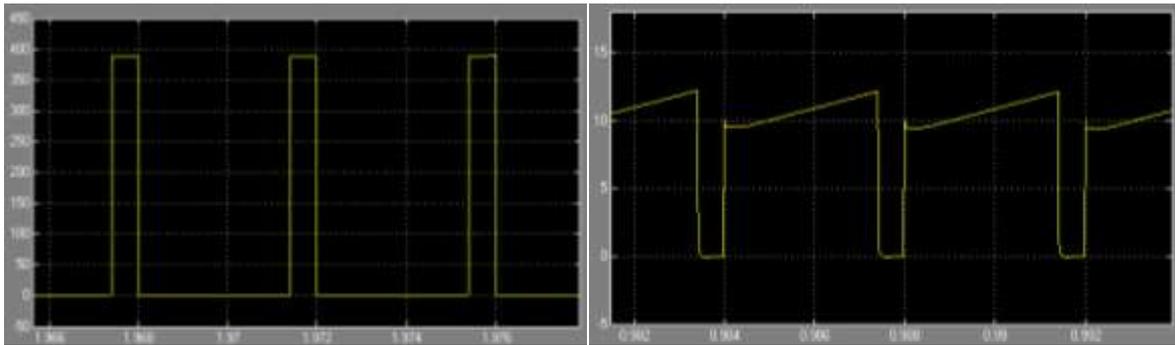


Figura 39 - Tensão e corrente aos terminais dos GTO's (circuito de protecção em circuito aberto)

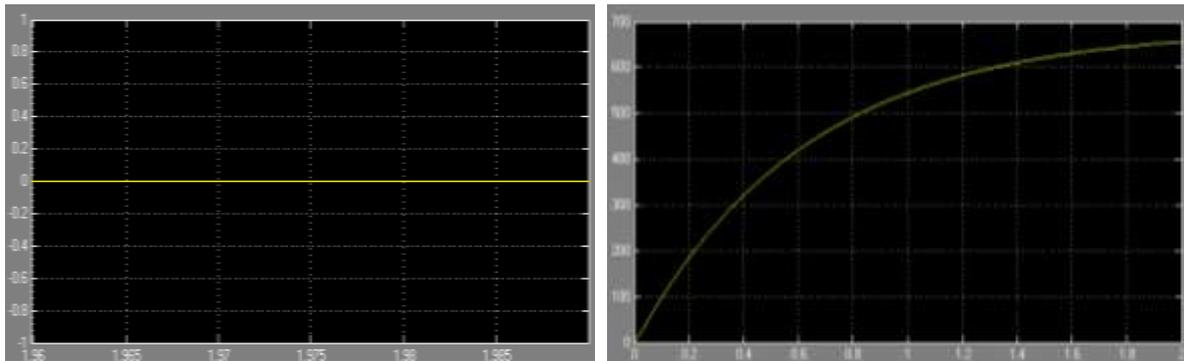


Figura 40 - Tensão e corrente aos terminais dos GTO's (circuito de protecção em curto-circuito)

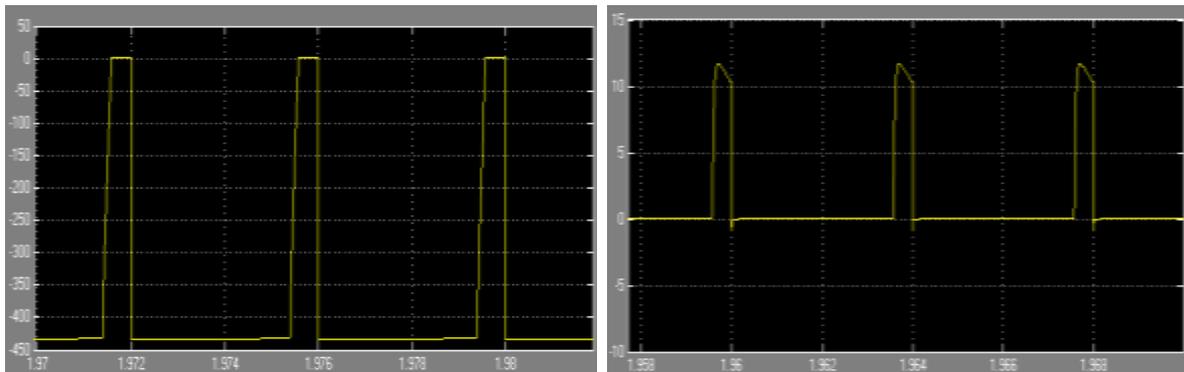


Figura 41 - Tensão e corrente aos terminais do díodo (circuito de protecção em circuito aberto)

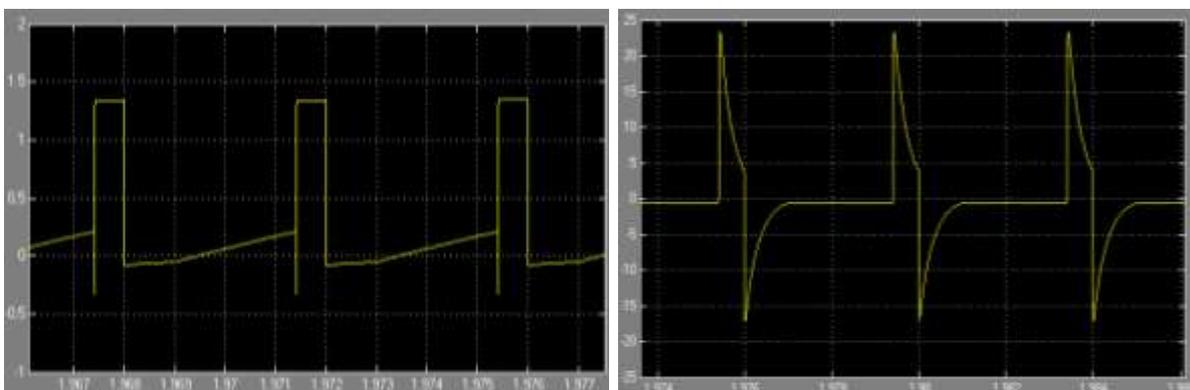


Figura 42 - Tensão e corrente aos terminais do díodo (circuito de protecção em curto-circuito)

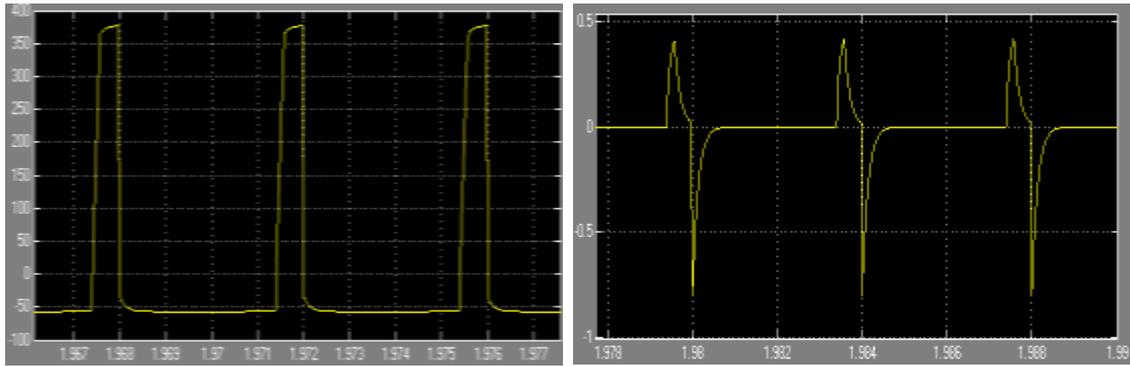


Figura 43 - Tensão e corrente aos terminais do tiristor (circuito de protecção em circuito aberto)

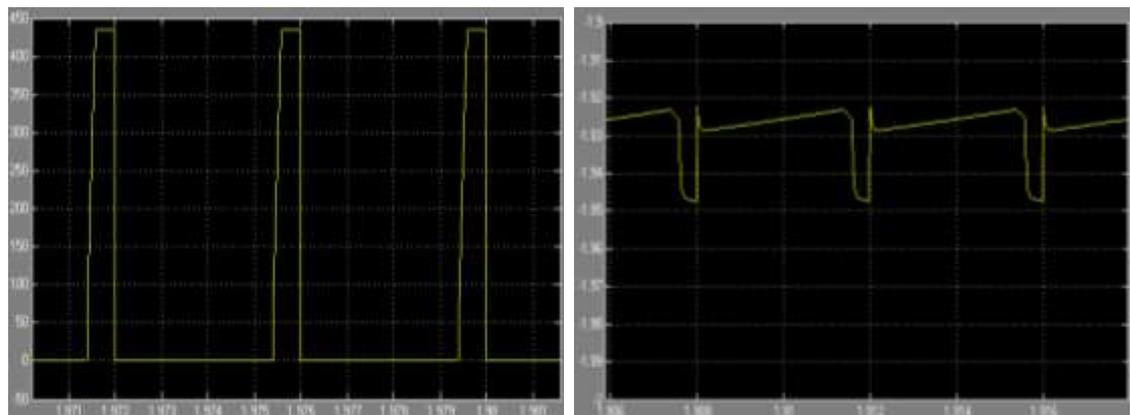


Figura 44 - Tensão e corrente aos terminais do tiristor (circuito de protecção em curto-circuito)

5.3.4. Módulo A40

5.3.4.1. Testes Rápidos

Os objectivos dos testes rápidos são de perceber se algum dos semicondutores apresenta correntes de fuga superiores aos que devem apresentar aquando no seu funcionamento normal.

Nos testes realizados com a fonte de tensão a 70V e a resistência a 70Ω, obtiveram-se os resultados das Figuras 45 e 46.

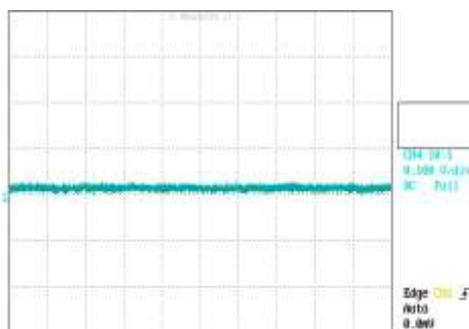


Figura 45 - Corrente nos GTO's, Díodo (ao corte) e Tiristor

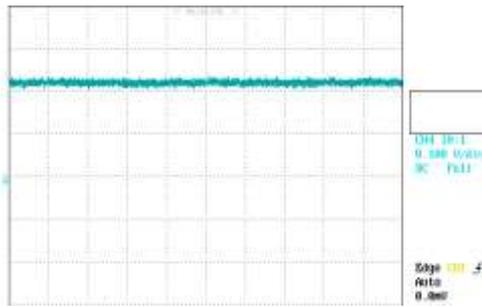


Figura 46 - Corrente no Díodo (à condução)

Em caso de avaria causada por um curto-circuito em algum dos semicondutores, a corrente nos GTO's, no Díodo ao corte ou no Tiristor, teriam o valor da corrente do Díodo à condução.

5.3.4.2. Testes Avançados

Na Figura 47 pode-se verificar a tensão aos terminais dos tiristores GTO e a corrente que sai do ponto 4 do módulo. Pela figura vê-se que a tensão dos GTO's apresenta um valor de aproximadamente 380V, quando estes se encontram ao corte. Essa tensão é sempre positiva do ânodo para o cátodo e resulta da soma da tensão da fonte (V_f) com a tensão de saída (V_0). Este tensão, na montagem actual, poderá ser ultrapassado (pode chegar a aproximadamente 430V) mas por uma questão de segurança do equipamento optou-se por realizar os testes a uma tensão mais baixa.

Pode-se observar uma vez mais a semelhança dos sinais entre os ensaios e as simulações, voltando a notar a pequena diferença de valores.

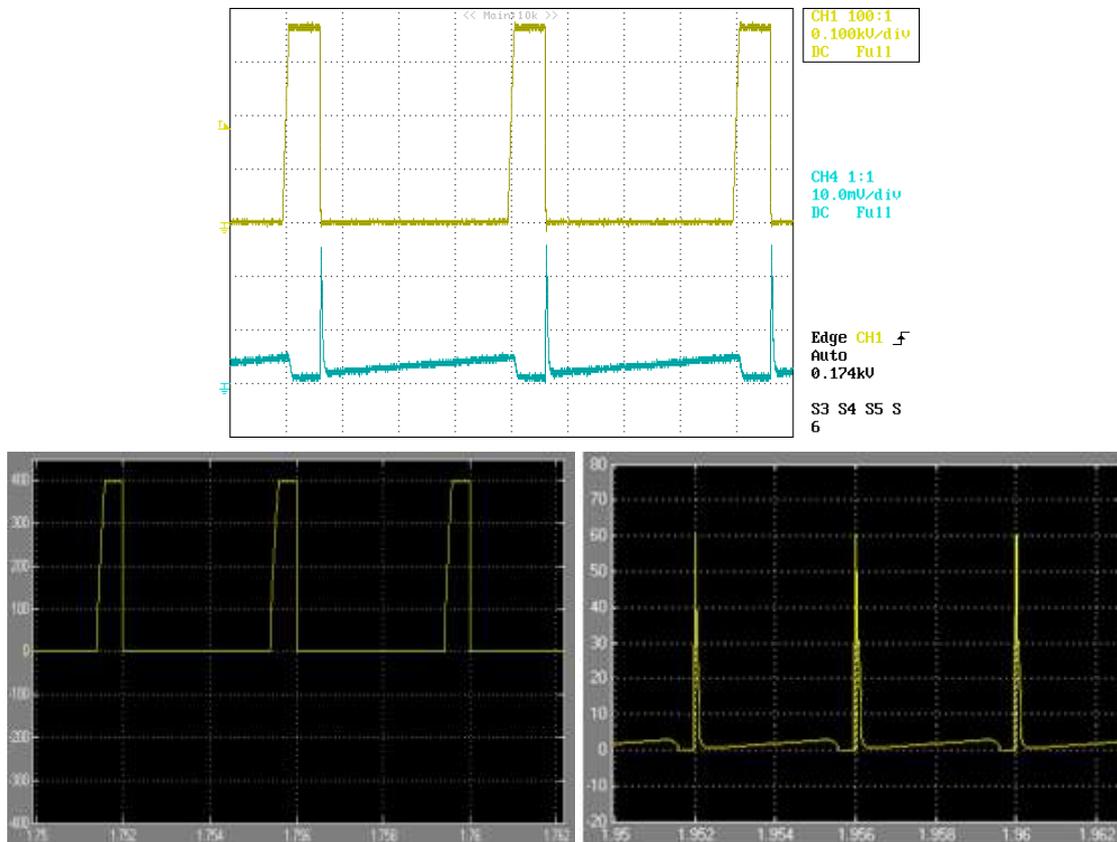


Figura 47 - Tensão aos terminais dos GTO's (V_{3-4}) e corrente do ponto 4 do módulo

A Figura 48 apresenta a tensão aos terminais do diodo FD2 e a corrente no ponto 2 do módulo. Pela figura, pode-se ver que a tensão é idêntica à dos terminais dos GTO's, de uma forma inversa, apresentando os 380V entre o cátodo e o ânodo. A corrente no ponto 2 do módulo é, quase na sua totalidade, a que passa pelo diodo. Quando o diodo entra em condução a corrente apresenta o valor de 14A, diminuindo constantemente até ao valor de 10A antes de passar ao corte, onde toma o valor de 0A. O pico de corrente de -180A apresentado na Figura 48 deve-se à descarga dos condensadores C3 e C4. A queda brusca de corrente que é observada durante o intervalo de condução do diodo resulta da passagem à condução do tiristor BT2, fazendo com que a corrente da bobine seja dividida pelos dois semicondutores.

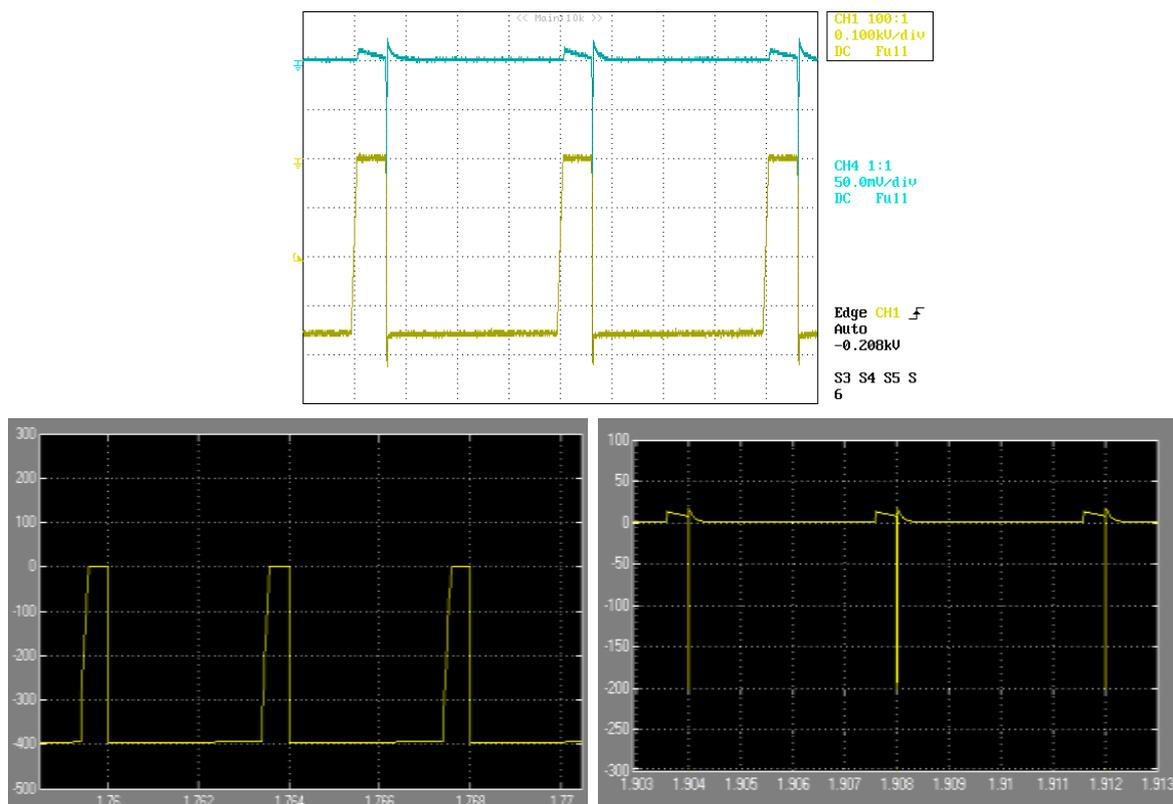


Figura 48 - Tensão aos terminais do diodo (V3-2) e corrente no ponto 2 do módulo

5.3.4.3. Avarias

Apesar de não poder ser confirmado os resultados das simulações seguintes, devido ao facto de não se poder abrir os módulos de potência A30 e A40, foram efectuadas simulações para as avarias de curto-circuito e circuito aberto para os circuitos de protecção dos GTO's, diodo e tiristor.

As simulações poderão dar uma ideia de que sinais se pode encontrar no caso de uma destas avarias acontecer no módulo em teste e serviram de base para os despistes efectuados no programa de testes para a obtenção da causa da avaria.

Os sinais da corrente e da tensão no circuito de protecção dos GTO's quando se encontra em circuito aberto encontram-se na Figura 49 e quando se encontra em curto-circuito na Figura 50.

Os sinais da corrente e da tensão no circuito de protecção do diodo quando se encontra em circuito aberto encontram-se na Figura 51 e quando se encontra em curto-circuito na Figura 52.

Os sinais da corrente e da tensão no circuito de protecção do tiristor quando se encontra em circuito aberto encontram-se na Figura 53 e quando se encontra em curto-circuito na Figura 54.

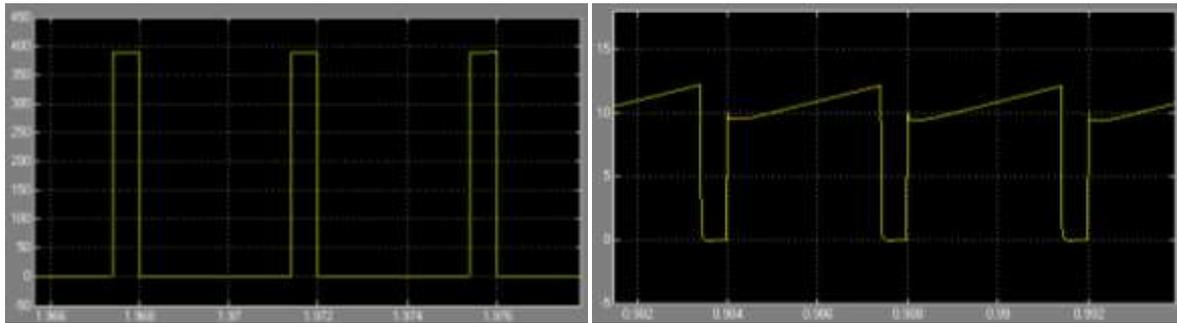


Figura 49 - Tensão e corrente aos terminais dos GTO's (circuito de protecção em circuito aberto)

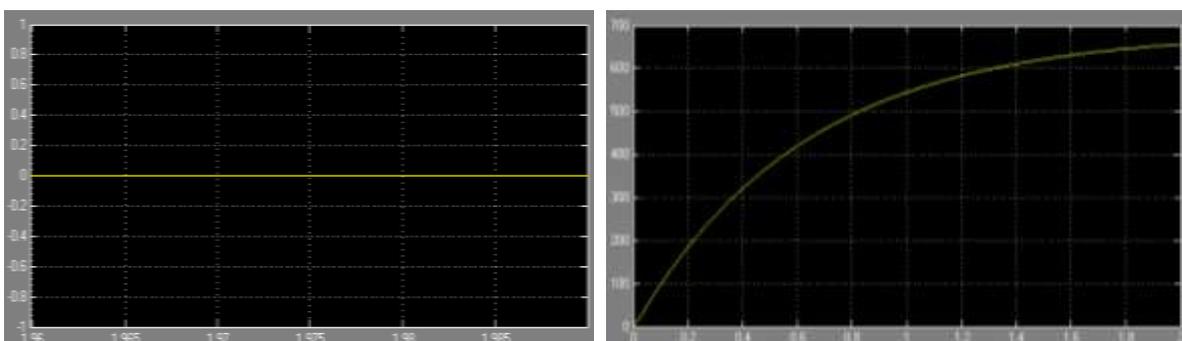


Figura 50 - Tensão e corrente aos terminais dos GTO's (circuito de protecção em curto-circuito)

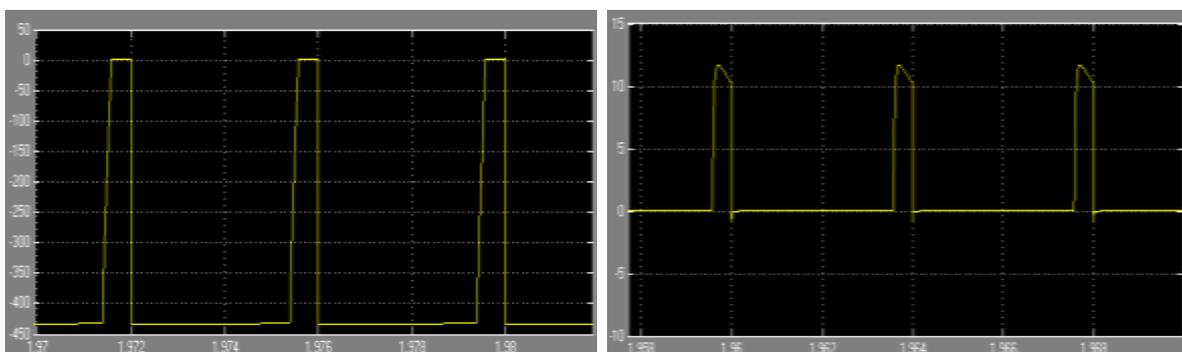


Figura 51 - Tensão e corrente aos terminais do diodo (circuito de protecção em circuito aberto)

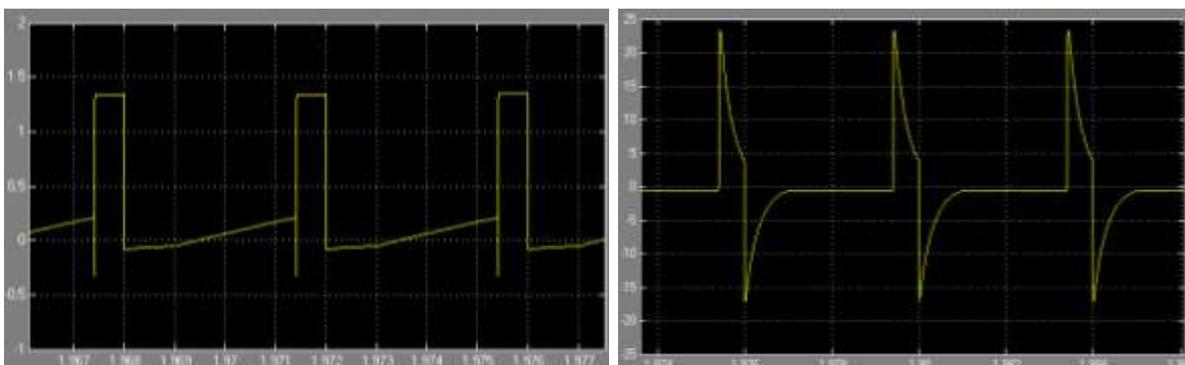


Figura 52 - Tensão e corrente aos terminais do diodo (circuito de protecção em curto-circuito)

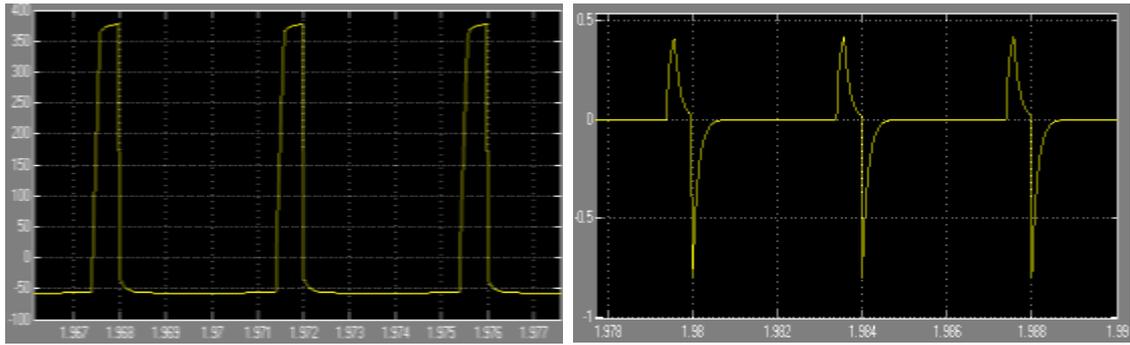


Figura 53 - Tensão e corrente aos terminais do tiristor (circuito de protecção em circuito aberto)

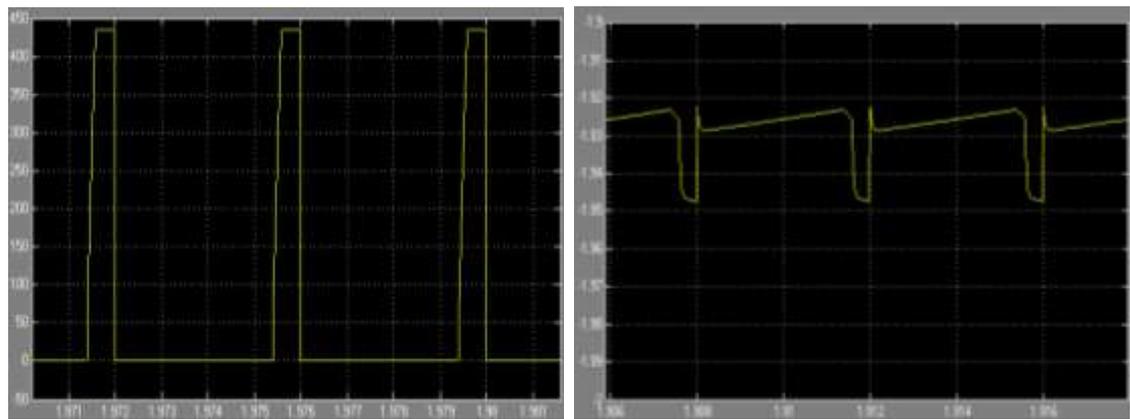


Figura 54 - Tensão e corrente aos terminais do tiristor (circuito de protecção em curto-circuito)

6. Programa de Testes

O resultado final da pesquisa efectuada através das simulações e ensaios é a criação de um programa de testes que, baseado nos sinais retirados aos módulos A30 e A40 em perfeitas condições de funcionamento, permita identificar os módulos de potência que se encontram avariados e saber quais as causas da avaria, antes de estes serem enviados para o laboratório da Siemens, na Alemanha. Assim poderá evitar-se o envio de equipamentos que estejam a funcionar em condições para Alemanha ou, no caso de estar avariado, irem já com a indicação de qual o problema encontrado.

O programa final de testes, desenvolvido em “LabView”, é formado por várias pastas onde estão indicadas as montagens a efectuar, os testes que devem ser feitos e as indicações entre testes. O resultado do programa para cada teste realizado, será um relatório que indica quais os testes que passaram com sucesso e, no caso de haver um com insucesso, qual a origem da avaria.

6.1. Programa Geral - Fluxograma

De forma a sistematizar o programa, encontra-se na Figura 55 um fluxograma geral do funcionamento do mesmo.

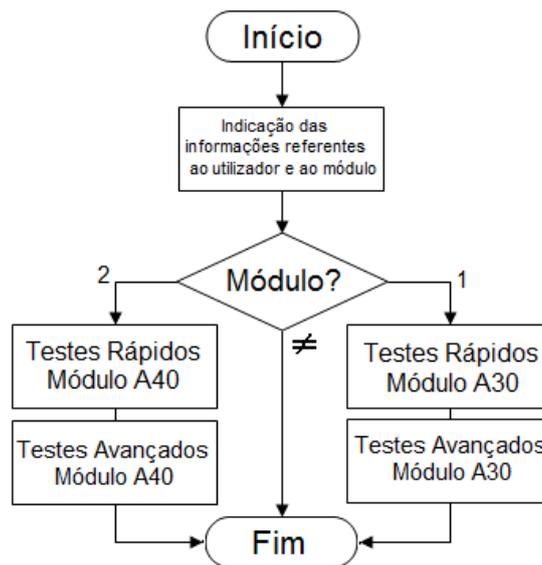


Figura 55 - Fluxograma Geral do Programa de Testes

Após iniciar o programa, o utilizador terá que dar indicações sobre si e sobre o módulo. A escolha do módulo a testar, será efectuada numericamente, ou seja, a resposta 1 = Módulo A30 e 2 = Módulo A40. No caso de a resposta ser diferente de um destes valores, o programa é terminado automaticamente.

Em cada um dos módulos são efectuados testes rápidos e testes avançados (caso não seja detectada uma avaria nos testes anteriores) que estarão esquematizados nos próximos fluxogramas.

Os testes ao módulo A30 ou ao módulo A40 são iguais pelo que se apresentam apenas os fluxogramas detalhados de um dos módulos. É tomando como exemplo para demonstração dos testes, o módulo A30.

6.2. Testes Rápidos - Fluxograma

Na Figura 56 apresenta-se o fluxograma dos testes rápidos.

Como se pode observar no fluxograma, a cada teste efectuado, se houver uma avaria, não é possível continuar com os testes, de forma a não degradar os restantes componentes do módulo.

As alterações da montagem inicial prendem-se com a troca do ponto de ligação da resistência ao módulo, sendo por isso indicado a alteração desse ponto através de uma mensagem automática fornecida pelo programa.

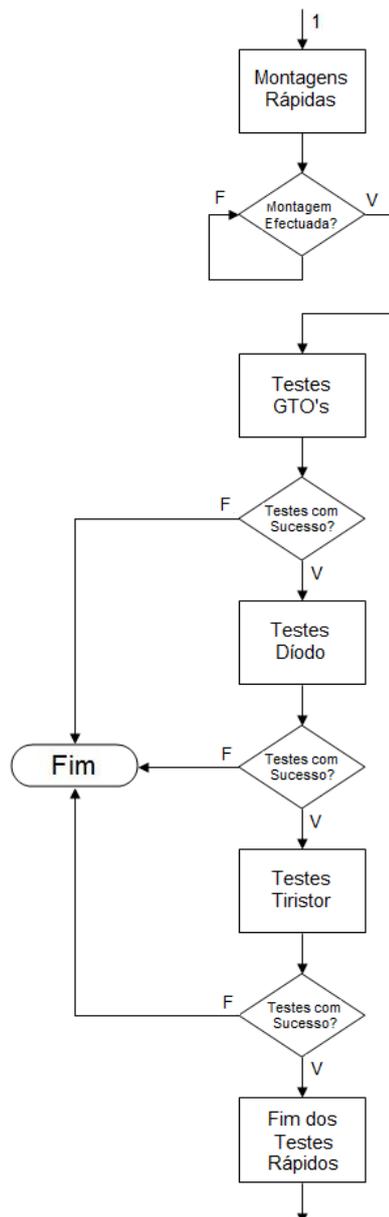


Figura 56 - Fluxograma Testes Rápidos

Com a escolha do módulo A30 para efectuar os testes, o programa segue para a secção de montagens, subsecção montagens rápidas.

Após efectuar a montagem segue para os testes, nos quais, um a um, são efectuadas aquisições de sinais de corrente que são analisadas com os sinais de referência, de forma a perceber se o módulo se encontra avariado no semiconductor do teste em questão.

No caso de falhar em algum dos testes, o programa é terminado, indicando a localização do relatório do teste (para posterior impressão) enquanto se passar aos testes todos, é terminado os testes rápidos e o programa passa para os testes avançados (Ver fluxograma dos testes avançados na Figura 57).

6.3. Testes Avançados - Fluxograma

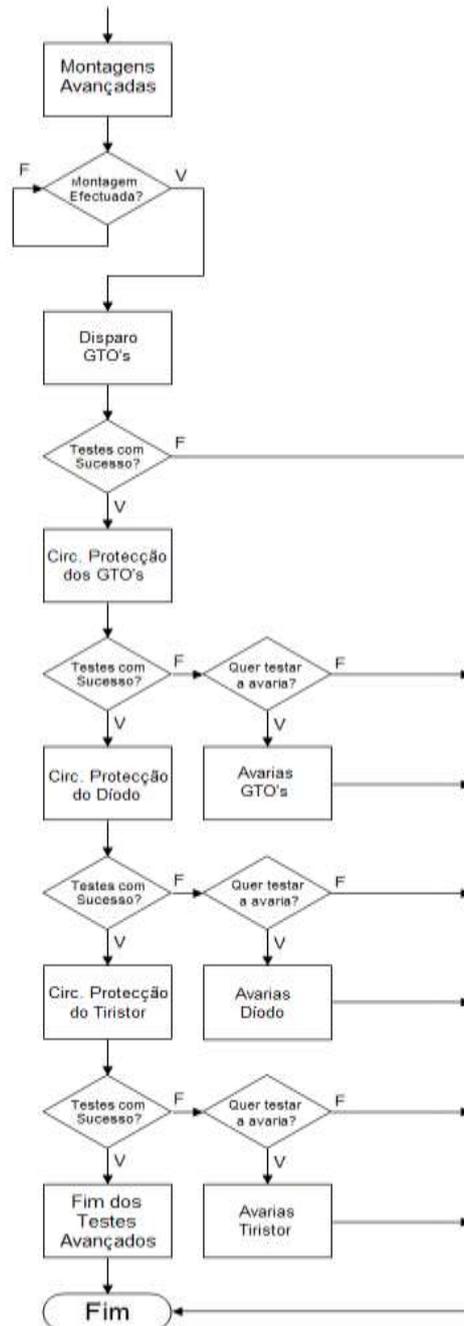


Figura 57 - Fluxograma Testes Avançados

De forma a perceber melhor o funcionamento do programa de testes, foi criado um manual do utilizador que indica todos os passos a realizar para os testes, disparo de sinais, avarias e o relatório final com os resultados dos testes.

6.4. Codificação do Programa de Testes

De forma a explicar como foi construído o programa de testes, irá ser apresentado um breve resumo do programa utilizado e de seguida como foi efectuado cada parte que constitui o programa.

Na Secção de Electrónica e Instrumentação do Metropolitano de Lisboa, E.P.E, os programas efectuados para correr no banco de ensaios são produzidos no programa LabVIEW. O LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), produzido pela National Instruments, é uma plataforma de desenvolvimento de uma linguagem de programação visual denominada "G". Esta é uma linguagem de fluxo de dados e a sua execução é determinada pela estrutura de um diagrama de blocos gráfica, onde as diferentes funções são interligadas por fios que permitem propagar as variáveis ao longo do programa.

O LabVIEW é baseado em sub-rotinas, denominadas instrumentos virtuais (VI's) e cada uma delas apresenta três componentes:

- Painel de Conectores;
- Diagrama de Blocos;
- Painel Frontal.

O Painel de Conectores é usado para representar um VI no diagrama de blocos de outros VI's, permitindo assim "chamar" os indicadores e funções que se encontram nesse VI. No programa desenvolvido, esta funcionalidade não foi usada, tendo sido criado todo o programa no mesmo VI.

O Diagrama de Blocos (Figura 58) onde se encontra o código gráfico permite a criação, por meio de blocos e linguagem, de toda a estrutura do programa, assim como permite a comunicação com diferentes dispositivos de hardware através de diversos interfaces (GPIB, USB, ...) enquanto o Painel Frontal (Figura 59) contém a interface, permitindo a interacção do utilizador com os conteúdos do programa. [12]

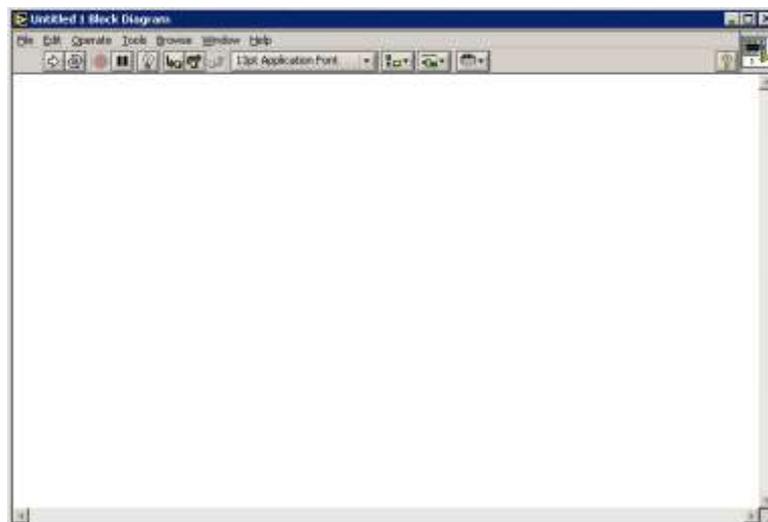


Figura 58 - Janela do Diagrama de Blocos do LabVIEW

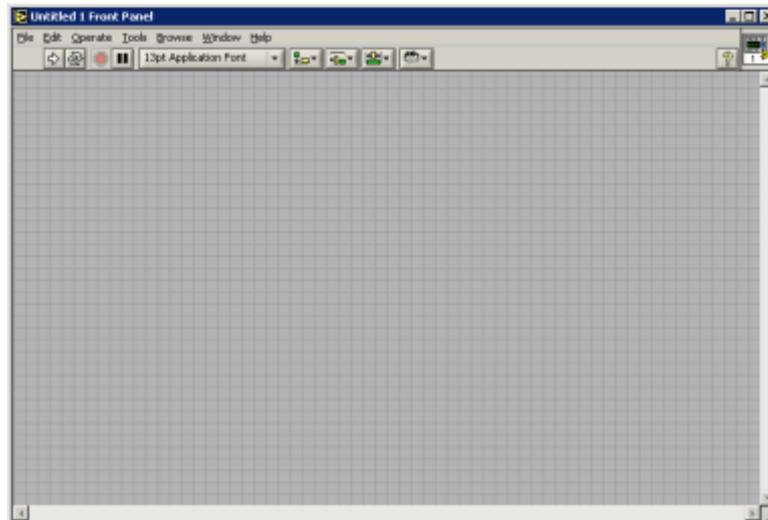


Figura 59 - Janela do Painel Frontal do LabVIEW

6.4.1. Menus, Sub-menus e passagem automática entre eles

O programa assenta em pastas, denominadas por menus e submenus dividindo assim o programa em Início, Testes, Montagens e Help. À excepção do menu Início, todos os outros apresentam sub-menus e alguns deles mais sub-menus, permitindo assim criar dentro de uma pasta, vários ficheiros (os testes a realizar).

Na Figura 60, pode-se ver os blocos que criam cada menu e a forma como eles foram organizados no programa. O primeiro bloco representa o menu principal, os 4 blocos seguintes, os menus que se encontram dentro dos Menus Módulo A30, Módulo A40 e Montagens e os últimos blocos os menus que se encontram dentro desses. O resultado destes blocos pode ser visto na Figura 78, Anexo V.



Figura 60 - Blocos que permitem a criação dos menus do programa de testes

A passagem automática efectuada entre os menus é utilizada no programa para o tornar mais automático.



Figura 61 - Blocos que permitem passagem automática entre menus

6.4.3. Janela de controlo de execução

Durante a programação é necessário recorrer a janelas que permitam:

- Executar funções em caso de sucesso ou insucesso – Janela Lógica;
- Executar em modo sequencial – Janela Sequencial;
- Reduzir o espaço de programação – Pilha de Informação.

A Janela Lógica (Figura 64), composta por duas janelas (TRUE e FALSE), é comandada por uma função lógica que lhe dá a indicação de qual das janelas deverá o programa seguir.

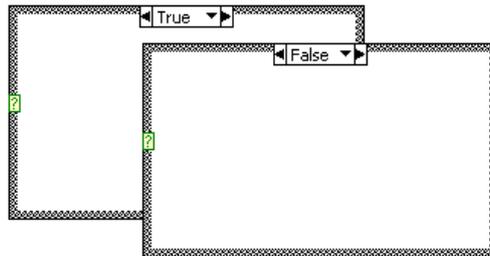


Figura 64 - Janelas Lógicas na hipótese TRUE e FALSE

A Janela Sequencial (Figura 65) é uma janela que permite determinar a ordem sequencial das funções que se quer executar, no caso de se pretender que estas só sejam efectuadas após uma outra terminar.



Figura 65 - Janela Sequencial

A Pilha de Informação (Figura 66) permite a redução do espaço onde é programado criando várias páginas na mesma janela. Essa funcionalidade foi usada para poupar espaço na programação da aquisição dos sinais e questionário sobre o seu resultado, usando a página 0 para a programação do módulo A30 e a página 1 para a programação do módulo A40.

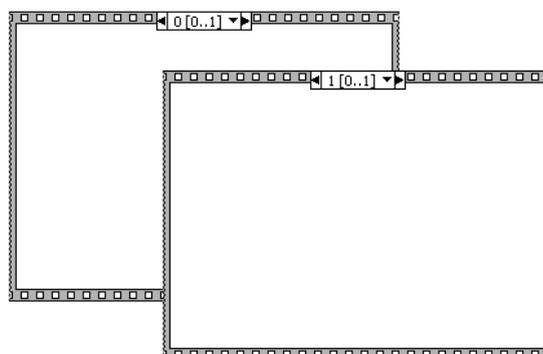


Figura 66 - Pilha de Informação

6.4.4. Aquisição de sinal

Na realização dos testes, existem vários processos que tiveram que ser programados, desde o disparo para a aquisição do sinal até ao questionário sobre o sinal obtido. Cada aquisição de sinal é iniciada através de um botão (Capturar Sinal) que se encontra ligado a uma janela lógica, explicada anteriormente. Essa janela permite que sejam codificados os vários testes em separado, uma vez que só são efectuados quando o botão é carregado. A Figura 67 mostra o botão e o conjunto de blocos que vão do início da aquisição do sinal até à decisão do resultado do teste.

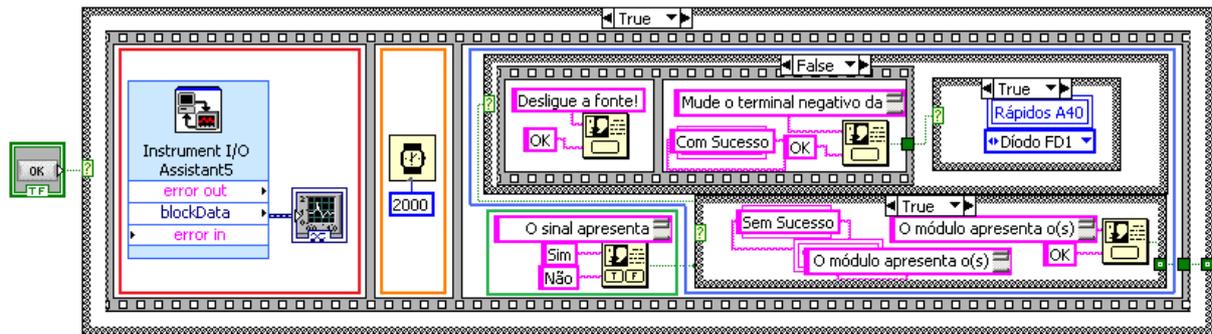


Figura 67 - Bloco para aquisição de sinal e decisão sobre o teste

Observando a Figura 67, o rectângulo vermelho é o bloco onde é programada a aquisição do sinal. O bloco estabelece a ligação com o osciloscópio através de GPIB, podendo assim enviar ordens para o mesmo, garantindo que o sinal é capturado nas condições que se pretendem para cada teste.

Algumas funcionalidades utilizadas pelo programa são:

- Selecção da base de tempo;
- Selecção da escala de tensão;
- Ajuste da posição vertical;

E alguns dos códigos utilizados foram:

- :ASETUP:EXECUTE – faz a selecção da base de tempo e escala de tensão automática para todos os sinais;
- :STOP – faz a paragem dos sinais no osciloscópio;

O rectângulo a laranja serve como compasso de espera para que a aquisição do sinal esteja completa antes que a pergunta sobre o teste (rectângulo a verde) seja efectuada. A azul estão representadas as codificações para as duas respostas possíveis. Na hipótese de a resposta ser verdadeira (Rectângulo "TRUE"), o programa apresenta apenas uma janela informativa a indicar que o programa será fechado e se for falsa (Rectângulo "FALSE"), o programa apresenta outras janelas informativas, referentes ao teste seguinte e após a última janela, a codificação para a passagem automática para o teste seguinte.

6.4.5. Relatório

Com o objectivo de criar um relatório onde fique toda a informação dos testes, informando dos resultados dos testes e da avaria, no caso de estar avariado, foram criadas variáveis que são inicializadas como “Teste não efectuado” e vão sendo actualizadas com “ Com Sucesso” ou “Sem Sucesso” conforme o resultado do teste.

Na Figura 68 pode-se observar os blocos para a criação do relatório e na Figura 69 os blocos para a indicação do local onde o relatório é guardado, o nome do relatório e o cabeçalho/rodapé do relatório. Na Figura 80, Anexo V pode-se ver um exemplo de um relatório criado pelo programa.

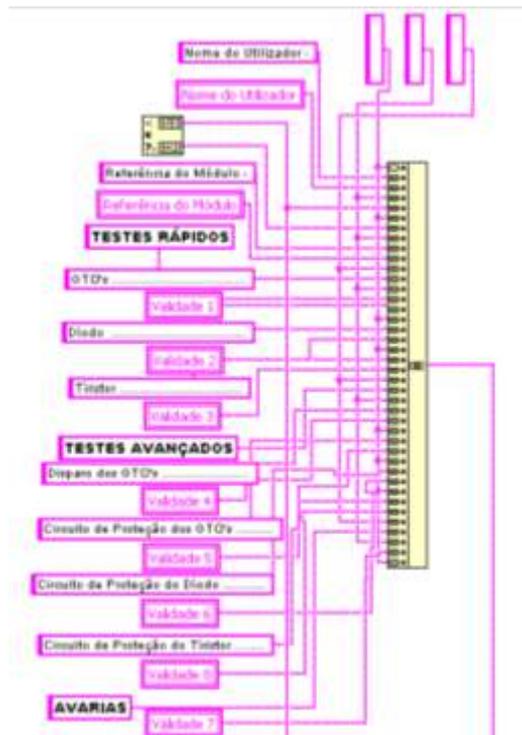


Figura 68 – Blocos para a criação do relatório de testes

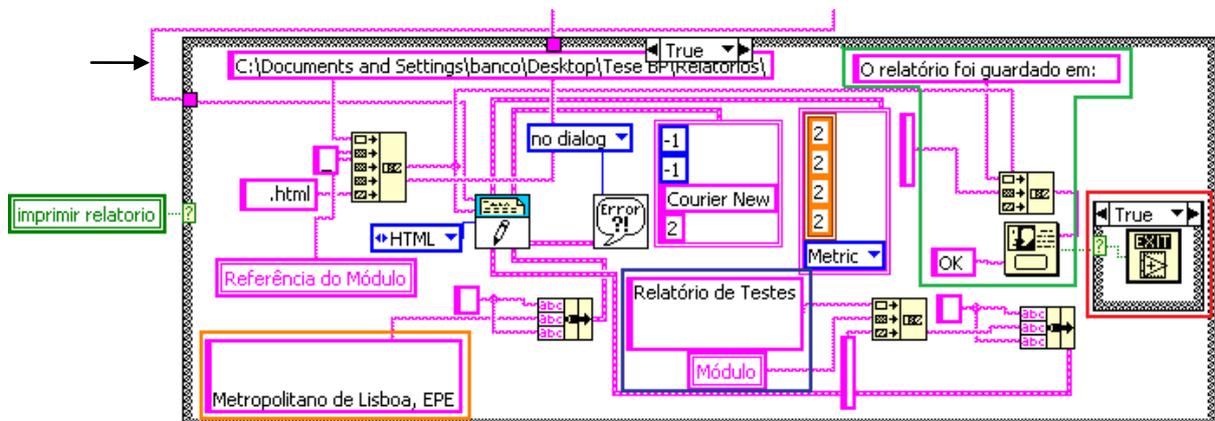


Figura 69 - Blocos para a escolha do nome do ficheiro, localização e cabeçalho/rodapé

Nesta figura pode-se observar, como na Figura 67 com o botão “OK”, que o relatório só é criado após a variável “imprimir relatório” ser 1 (a nível lógico). Após isso acontecer, o relatório criado na Figura 68 entra neste bloco (indicado pela seta preta) ao qual é adicionado o cabeçalho (rectângulo a azul) e o rodapé (rectângulo a laranja).

O local onde o ficheiro é guardado é indicado através da constante que se encontra no cimo da Figura 69 enquanto o nome do ficheiro é criado através da referência do módulo e da data que o teste é efectuado, tornando assim o ficheiro único.

O rectângulo a verde é a mensagem que é enviada ao utilizador, por parte do programa, dando-lhe a informação onde o ficheiro foi guardado e qual o nome do mesmo e o vermelho indica o fim do programa, saindo fora do programa de testes e do programa LabVIEW.

Na Figura 70 pode-se observar todos os blocos de programação que serviram para criar o programa de testes. Cada bloco apresentado nesta figura foi apresentado anteriormente de como programá-lo ou como era constituído.

De forma a perceber melhor a Figura 70, cada bloco de função ou tipo de variáveis encontra-se numerado de 1 a 11, sendo feito de seguida a sua explicação:

1. Conjunto de variáveis onde são guardadas as informações dos resultados dos testes para a construção do relatório e que tipo de módulo (A30 ou A40) está a ser testado;
2. Cada uma das variáveis a azul representa um menu que se encontra no programa, sendo uns sub-menus dos outros;
3. Conjunto dos gráficos onde são guardados os sinais de referência de cada teste;
4. Codificação das passagens automáticas entre menus, disponíveis nas Montagens e Help;
5. Bloco que permite questionar o utilizador sobre o módulo a ser testado e que faz o encaminhamento do programa conforme a sua resposta. Sai do programa no caso da resposta do utilizador não corresponder aos módulos que pode testar;
6. Bloco onde são programados os testes rápidos do A30 e do A40;
7. Bloco onde são programados os testes avançados do A30 e A40;
8. Conjunto de testes onde são efectuadas, após a indicação de avaria do módulo, as questões sobre os sinais para descobrir a causa da avaria do módulo em teste;
9. Bloco onde é condensada a informação de todos os testes, criando o corpo do relatório;
10. Bloco onde é efectuada a criação do cabeçalho e rodapé do relatório, criação do nome do ficheiro e localização onde o ficheiro será gravado. Disponibiliza também a informação ao utilizador da localização do ficheiro e termina o programa;
11. Botão de stop ao programa. É o botão que controla o fluxo de informação passado dentro do rectângulo, permitindo o funcionamento contínuo até que seja pressionado.

7. Conclusão e Sugestões

7.1. Conclusão

Nesta tese de mestrado os objectivos de criar um programa semi-automático de testes aos módulos A30 e A40 do conversor de tracção das motoras do ML90 e de aumentar a tensão disponível no circuito de forma a se aproximar do funcionamento real, foram cumpridos.

Para atingir os objectivos, foi necessário efectuar um estudo de todo o funcionamento do conversor de tracção no comboio e tentar adaptá-lo a montagens possíveis de efectuar no laboratório, usando os recursos existentes.

Concluí-se ser possível o comando dos módulos através da TCU, mediante o uso de um programa de teste criado pelo fabricante, com o intuito de se testar se os módulos que efectuem o disparo dos semicondutores estão em boas condições. Tendo sido este programa usado para poder controlar os intervalos de condução/corte dos tiristores.

Através do manual de testes produzido pelo Rui Domingues na sua tese de mestrado [11], foi possível estabelecer a prioridade de testes e a forma como encadeá-los para criar um programa que testasse todos os semicondutores e módulos do ensaio.

Para atingir esse objectivo principal, recorreu-se a vários trabalhos e manuais do LabView (Programa onde foi criado o programa de testes) para permitir um rápido conhecimento da ferramenta e assim tornar o programa final mais completo e automático possível.

Do ponto de partida deixado pelo meu colega, foi necessário fazer novos estudos e simulações devido à chegada de material novo (Resistências e Bobines com valores superiores aos existentes no laboratório), de forma a perceber como esses novos componentes poderiam ser aproveitados para fazer aumentar ainda mais a tensão do circuito. Essas alterações permitiram uma passagem para um valor intermédio, sendo que nos testes anteriores tinha-se 250V e agora é possível atingir acima dos 400V, ficando mais perto dos 750V encontrados na rede.

Simultaneamente desenvolveu-se um Manual do Utilizador para orientar um técnico no desenrolar do programa, indicando qual a ordem dos testes que o programa deveria seguir e o que o técnico deve encontrar em qualquer altura do programa.

O programa de testes foi concebido de forma a dar um relatório dos testes para ser uma ajuda no despiste, caso esteja avariado, ou uma forma de comprovar que se encontra com um funcionamento correcto.

Resumindo, as contribuições importantes do programa de testes de avarias dos módulos de potência A30 e A40 do conversor de tracção construído são:

- A possibilidade de testar e diagnosticar avarias nos módulos de gate A10, evitando em caso de bom estado o seu envio para a Siemens/Alemanha;
- A possibilidade de detectar avarias nos módulos A30 e A40 evitando o seu envio para a Siemens/Alemanha sem avaria;
- A possibilidade de efectuar o teste aos módulos A10, A30 e A40 de uma forma mais automática, permitindo poupar tempo;
- Criação de um relatório com o resultado dos testes.

7.2. Sugestões

De seguida apresentam-se algumas sugestões, ora para o programa, ora para o uso do mesmo:

- Obter um conversor que permita elevar a tensão e a corrente a que os semicondutores do módulo estão sujeitos para os valores nominais, a partir da fonte já existente;
- Criação de uma fonte de tensão regulável que permitisse obter uma tensão mais próxima dos 750V;
- Criação de um banco de ensaio mais completo, colocando duas TCU e dois conversores de tracção, alimentados por 750V, de forma a se poder testar os dois módulos em simultâneo;
- Estudar custos de reparação dos circuitos de protecção dos semicondutores, para se apurar se é rentável fazer testes regulares aos módulos, para verificação do bom funcionamento dos circuitos de protecção destes (durante a desmontagem para manutenção, por exemplo), caso isso não se verifique, e se for rentável, envia-los para reparação, evitando assim danos mais graves, que por sua vez podem ser mais dispendiosos.
- Efectuar a ligação dos programas de testes do A30 e A40 com o programa de testes ao módulo de gate A10.

8. Bibliografia

- [1] Santana, J. J. E.; “Modelação e Estabilização da Associação Ondulador de Corrente-Máquina Assíncrona”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 1982.
- [2] Siemens; “Conversor de tracção do ML90 750 V”, 1991.
- [3] Metropolitano de Lisboa; “Manual de operação ML90 “, Siemens, Maio 1995.
- [4] Staufenbiel; “MC – Traction Control Unit”, Siemens, Maio 1996.
- [5] Silva, J. F.; “ELECTRÓNICA INDUSTRIAL”, Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- [6] Espadinha, C.; “ML90 – UTILIZAÇÃO do NEUMON PARA TESTES DOS MÓDULOS A10...A40: Ondulador/Chopper, Contactores e Sinalizadores – Recepção/Transmissão de mensagens”, Metropolitano de Lisboa, Julho 2001.
- [7] Siemens; “Esquemas electrónicos TCU – SIBAS 16”, Setembro 2002.
- [8] Fonseca, A., A. Campos; “Ensaio de um módulo de potência do conversor de tracção do material circulante ML95/97/99 do metropolitano de Lisboa”, Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2005.
- [9] Jesus, M.; “Ensaio em bancada dos módulos A10, A20, A30 e A40”, Metropolitano de Lisboa, Outubro 2005.
- [10] Silva, J. F.; “Projecto de Conversores Comutados”, Instituto Superior Técnico, Maio 2006.
- [11] Domingues, Rui Alberto Oliveira; “Ensaio de módulos de potência do conversor tracção do material circulante ML90 do Metropolitano de Lisboa”, Instituto Superior Técnico, Setembro 2008.
- [12] www.ni.com/labview/

Anexo I - Sistema de tracção-travagem / circuito de potência

I.1 Esquema de princípio

De acordo com o esquema da Figura 71, a alimentação é efectuada a partir do carril de energia com um valor nominal 750V +20%, -30%. O retorno é feito através do carril de rolamento, que está ao potencial 0V. A energia absorvida pelo carril irá alimentar os 4 motores trifásicos existentes que se encontram ligados em paralelo [2].

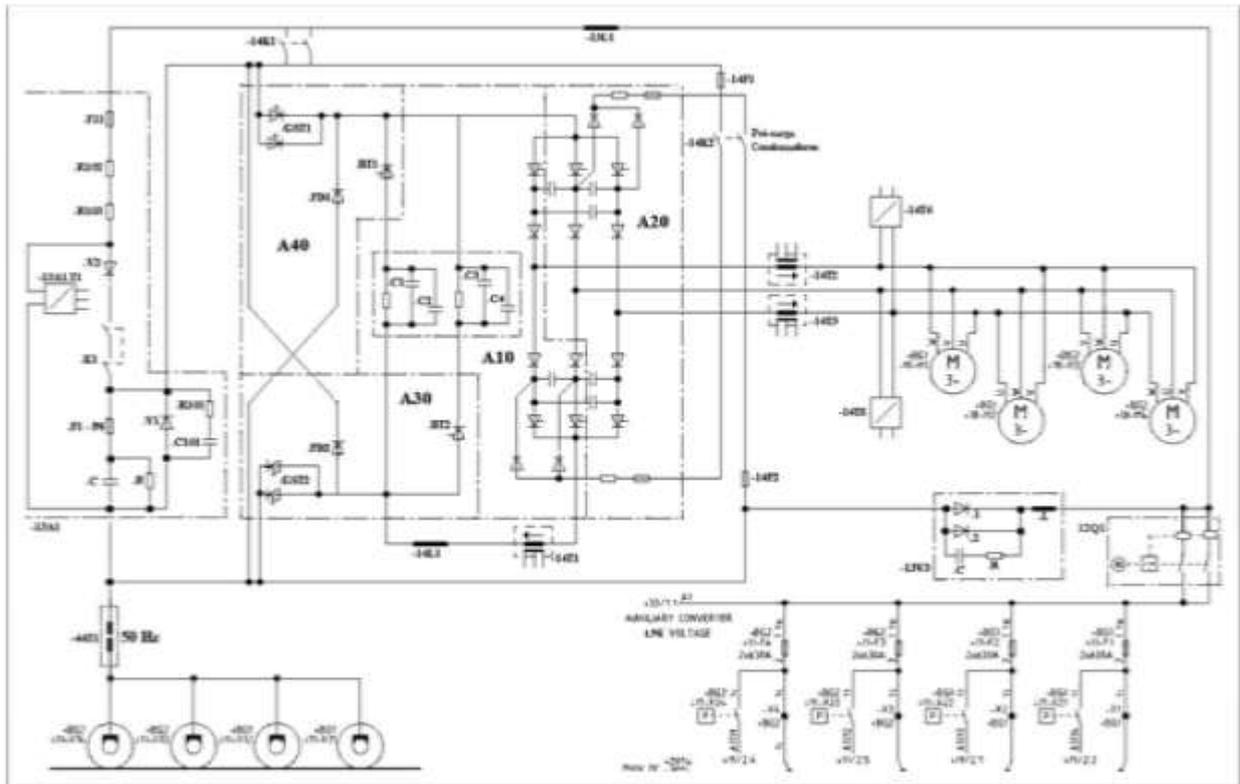


Figura 71 - Esquema do sistema de tracção/travagem do material circulante ML90

I.1.1 Captação de corrente 11X1...11X4

Cada carruagem motora apresenta 4 dispositivos de captação de corrente (sapatas), comandados pneumaticamente, fazem a sua captação de corrente através de patins em grafite. As suas posições são supervisionadas por um fim de curso (microswitch).

Os fusíveis, que têm como função proteger o circuito de alimentação e os cabos contra os curto-circuitos, estão instalados numa caixa situada por cima do dispositivo de captação de corrente e fazem parte da mesma estrutura.

No funcionamento normal existem 2 sapatas num dos lados da carruagem em operação. Em caso de defeito de uma das sapatas, a carruagem consegue manter o seu funcionamento até chegar ao término seguinte.

Especificações técnicas:

- Corrente nominal 280A
- Corrente em sobrecarga 560A
- Fusíveis: 2x630A

1.1.2 Disjuntor Principal 12Q1

Em caso de sobreintensidade, o disjuntor principal, com um poder de corte de 50kA, desliga o sistema de tracção, fazendo o isolamento deste da linha. O disjuntor é constituído por dois dispositivos de protecção:

- Protecção contra curto-circuitos
- Protecção de sobrecorrente

A protecção contra curto-circuito é ajustada para disparar a 3kA. Neste caso de protecção é supervisionado o tempo da subida da corrente de curto-circuito, abrindo os contactos num intervalo de tempo entre 3 e 7ms, após detecção dessa corrente.

A protecção de sobrecorrente é controlada magneticamente e desliga 20ms após ter atingido o valor de ajuste. Neste dispositivo o valor de ajuste varia entre os 2kA e os 4kA.

Especificações Técnicas:

- Corrente nominal 900A / 50°C
- Poder de corte 50kA (para tal existe uma câmara de extinção de arco)

1.1.3 Curto-circuitador 11X21...11X24

Em caso de um defeito grave no comboio o carril de energia terá de ser desligado da tensão e por sua vez ligado à massa (0V). Esta operação é realizada pelo curto-circuitador que, após a sua activação o liga o dispositivo de captação de corrente ao retorno de corrente (0V). Se o comando da subestação não puder ser avisado pelo condutor, no sentido de desligar a tensão, o curto-circuitador pode actuar mesmo em carga. Essa sua actuação coloca a linha em curto-circuito levando a que o disjuntor da subestação seja disparado.

1.1.4 Filtro de Linha e Outros Componentes do Circuito

O filtro de linha está ligado entre a fonte de alimentação e o circuito de tracção, sendo constituído pela auto-indução da linha 13L1 e pelo condensador de linha 13A1.C. Esta unidade LC tem as seguintes funções:

- Efectuar o desacoplamento do conversor cc-cc em relação à alimentação:
O conversor cc-cc exige uma fonte de potência de baixa impedância, a qual tem capacidade de fornecer correntes impulsivas, e à partida, a alimentação pelo carril de energia não tem essa capacidade dada a sua indutância. Por isso, é necessário 1 condensador de elevada capacidade.
- Filtrar frequências, particularmente as de 50 ciclos/s (Hz), uma vez que o sistema de sinalização é comandado por relés alimentados a esta frequência; assim o filtro de linha deverá estar sintonizado para 50 ciclos/s para evitar interferências.

- Evitar sobretensões, dado que a tensão para alimentação do equipamento de tracção da carruagem não pode exceder determinado valor; assim, em caso de variações de carga, ou interrupção do carril de energia, a energia armazenada nas indutâncias tem que ser transferida para o condensador de linha (Figura 72).

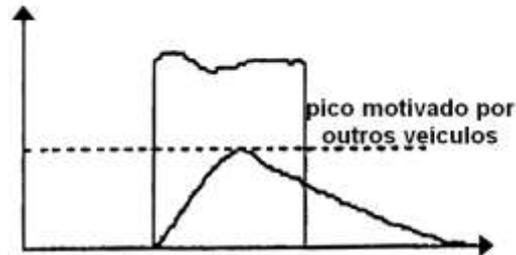


Figura 72 - Actuação do filtro de linha

1.1.5 Condensador de linha 13A1.C

Para garantir uma operação com segurança, o condensador de linha, com uma capacidade de 24mF, está equipado com resistências de descarga que permitem uma diminuição de tensão durante a descarga, de 900V para 60V, em menos de dois minutos.

O condensador de linha terá que ser pré-carregado durante o início da ligação do circuito. O circuito conta com o contactor 13A1.K1, para efectuar o carregamento, duas resistências 13A1.R102 e 13A1.R103, para limitar a corrente durante a pré-carga e o transdutor 13A1.T1, para medir a tensão aos terminais do condensador.

1.1.6 Auto-indução de linha 13L1

Para uma corrente de 800A, o valor de auto-indução de linha é superior a 7mH, sendo do ponto de vista construtivo uma indutância com núcleo de ferro (a indutância está instalada na mesma caixa de aparelhagem que a indutância de alisamento 14L1). Nesta caixa de aparelhagem pode ser encontrado também o díodo de roda livre da indutância de linha (13V3).

Especificações técnicas:

- Corrente nominal 480A

1.1.7 Díodo de potência 13A1.V1

A existência do díodo de protecção do condensador prende-se com as possíveis inversões de polaridade. Por exemplo, no caso de um curto-circuito na linha de 750V, é gerado uma oscilação de corrente e o díodo impede a inversão de polaridade protegendo o condensador (Figura 73).

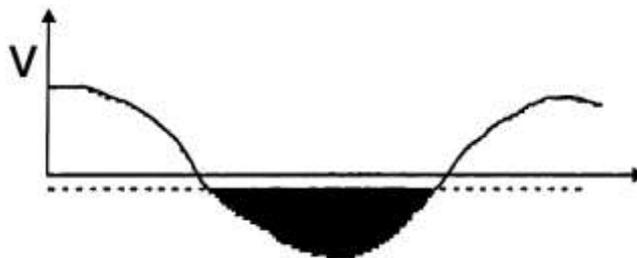


Figura 73 - Inversão de polaridade

1.1.8 Díodo de potência 13A1.V2

O díodo de potência 13A1.V2 tem o papel de impedir que a corrente seja invertida quando existe travagem e 13A1.K1 encontra-se avariado. Esta situação poderia destruir as resistências R102 e R103.

1.1.9 Transdutor 44T1

Transdutor de corrente para supervisão de 50Hz.

1.1.10 Conversor de Tracção 14A1

Para ser possível a utilização dos motores assíncronos trifásicos numa alimentação DC (corrente contínua), é necessário efectuar a conversão da corrente contínua em corrente alternada trifásica durante o período de tracção e inversamente durante o período de travagem. O aparelho utilizado para conseguir esta conversão é designado de conversor de tracção.

Este conversor compreende:

- Conversor cc-cc de dois quadrantes no lado da entrada GST1/GST2 (Módulos A30 e A40)
- Ondulador no lado da saída 14A1.WR (Módulos A10 e A20)

O conversor cc-cc fornece corrente a um circuito intermédio, constituído por uma bobine de alisamento 14L1 (corrente impressa de um modo controlado em cadeia fechada), que por sua vez estabelece uma fonte de corrente.

O ondulador, ligado à saída do conversor cc-cc, tem como função distribuir ciclicamente a corrente impressa aos enrolamentos dos motores de tracção. Desta forma gera-se o sistema trifásico de correntes alternadas, de valor eficaz e frequência variáveis.

1.2 Conversor cc-cc principal GST1/GST2 (módulos A30 e A40)

O conversor cc-cc principal (*'chopper'* principal) controla a corrente intermédia em modo PWM. Utilizando esta forma de modulação, a largura do impulso vai sendo ajustada em relação ao ponto de funcionamento do motor e à tensão de linha, sendo a frequência do impulso constante.

Em modo de tracção, o fluxo de energia segue no sentido da linha para o circuito intermédio (bobine de alisamento) enquanto no modo de travagem com regeneração o fluxo segue no sentido do circuito intermédio para a linha. Num conversor do tipo cc-cc de dois quadrantes existem dois tiristores tipo GTO, permitindo assim uma transição suave na passagem do modo de tracção para o modo de travagem, dado não existir nenhum contactor.

1.3 Conversor cc-cc de travagem BT1/BT2 (módulos A30 e A40)

Quando a carruagem se encontra em modo de travagem é usada de preferência a travagem regenerativa. Neste tipo de travagem a tensão da linha aumenta e, no caso de se atingir a tensão máxima, o conversor de travagem é activada (travagem reostática).

O conversor de travagem consiste apenas num tiristor e numa resistência. O tiristor é ligado pela unidade de controlo e desligado pela comutação do conversor cc-cc principal. A energia de travagem é dissipada na resistência de travagem $17R1$.

Se a linha tiver capacidade para aceitar toda a energia de travagem, o conversor cc-cc de travagem não é activado. Uma situação híbrida de travagem reostática e regenerativa garante que é enviada para a linha a máxima energia possível.

I.4 Circuito intermédio 14L1

Num ondulator alimentado por uma fonte de corrente, a corrente do circuito intermédio flui sempre com o mesmo sentido. Essa tensão muda de polaridade quando se passa do modo tracção para o modo de travagem ou vice-versa.

I.5 Ondulador de corrente impressa WR

Os motores de tracção são alimentados através do ondulator WR com uma corrente de frequência variável, controlada pelo conversor cc-cc principal.

O ondulado é constituído por três braços, cada um ligado às três fases R, S, T (U, V, W) incluindo, em cada braço, dois tiristores e dois díodos e entre cada dois braços condensadores de comutação.

O ondulator tem como sua função transformar a corrente do circuito intermédio, corrente continua I_D , num sistema trifásico de três correntes simétricas, I_U , I_V , I_W , desfasadas de 120° e de frequência variável.

Para que esta transformação seja conseguida, é necessário fazer a ligação simultânea de dois terminais do motor ao circuito intermédio. Essas duas fases envolvidas na corrente de condução são comutadas seis vezes em cada ciclo da frequência fundamental, frequência essa que é dada pela unidade de controlo (TCU). Deste modo o ondulator fornece ao motor, correntes do tipo rectangular com dois blocos de 120° em cada ciclo.

A comutação da corrente entre fases é inicializada pela ignição do tiristor seguinte. A corrente do tiristor que acabou de conduzir tem uma variação muito rápida até à situação em que o tiristor é bloqueado automaticamente.

Anexo II - Características dos tiristores GTO GST

Os tiristores GTO que se encontram montados no módulo A30 e A40 são do modelo SG3, fabricados pela TOSHIBA. As suas características técnicas podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 1: Características técnicas do GTO TOSHIBA SG3000GXH24.

CARACTERÍSTICAS	SÍMBOLO	VALOR
Características estáticas ânodo-cátodo		
Máxima taxa de crescimento de tensão	dV_{AK}/dt máximo	1000V/ μ s
Máxima taxa de crescimento de corrente	di/dt máximo	400A/ μ s
Limitações em tensão anódica máximas		
Máximo valor de pico repetitivo de tensão directa	V_{DRM}	4500V ($V_{GK}=-2V$)
Máximo valor de pico repetitivo de tensão inversa	V_{RRM}	16V
Limitações em corrente máximas		
Corrente de pico ao corte	I_{TQGM}	3000A
Valor eficaz de pico de corrente	I_{TRMS}	1200A ($T_f=76^\circ C$)
Valor eficaz de pico de corrente não repetitivo	I_{TSM}	16000A
Valor máximo de pico da corrente directa bloqueável pela porta	I_{TGQM}	3000A
Limitações do terminal de comando de porta máximas		
Potência média de porta directa	P_{FG} médio	50W
Potência média de porta inversa	P_{RG} médio	15W
Corrente de porta admissível directa	I_{FGM}	100A
Tensão de porta inversa máxima	V_{RGM}	16V
Limitações em temperatura		
Limites de temperatura de operação da junção	T_j	-40~125
Limites de temperatura de armazenamento	T_{stg}	-40~150
Outras características		
Peso	-	1290g
Força de montagem	-	33.3 \pm 4.9 kN

II.1 Características estáticas e dinâmicas do terminal de comando de porta

V_{GF} - Tensão mínima porta cátodo que garante o disparo.

I_{GF} - Corrente de porta mínima que garante o disparo e necessária durante a condução. Esta corrente minimiza a queda de tensão de condução do GTO, fazendo conduzir francamente a junção porta cátodo. A corrente de porta I_{GF} , com um valor de cerca de 10A, quando mantida durante o intervalo de condução, promove uma distribuição equivalente da corrente principal por todos os cátodos, baixando assim a tensão de condução.

I_{GM} - Impulso inicial de corrente de porta na passagem à condução (comutação ao fecho). Este impulso de corrente é necessário até que a corrente principal atinja o valor da corrente de lançamento, deve manter-se com esse valor durante cerca de uma dezena de ms e promove a passagem à condução de todas as ilhas catódicas em simultâneo, mesmo enquanto a corrente principal for inferior à corrente de lançamento, tornando mais rápido o processo de comutação.

dI_G/dt - Taxa mínima de subida da corrente de porta na passagem à condução. O impulso inicial de corrente de porta deve apresentar um tempo de subida curto.

V_{GR} - Tensão porta-cátodo necessária na passagem ao corte. A comutação condução-corte, requer a polarização desta com uma tensão porta cátodo de valor aproximadamente de -15V. Os tempos de comutação e a amplitude máxima da corrente de porta necessária para garantir a comutação, dependem desta tensão porta cátodo aplicada, para além da corrente directa que o tiristor GTO deve comutar.

b_{OFF} - Ganho de corrente na comutação pela porta; é o quociente entre o máximo valor da corrente directa principal que o tiristor GTO é capaz de interromper e a corrente de porta que força essa comutação.

I_{GQ} - Indica a corrente de porta necessária para cortar uma corrente principal próxima do máximo valor de corrente, capaz de ser cortado pelo GTO.

dI_{GQ}/dt - Mínima taxa de variação da corrente de porta na passagem ao corte; Para promover uma passagem ao corte uniforme em todos os cátodos, o impulso negativo da corrente de porta deverá apresentar um valor de dI_{GQ}/dt tão elevado quanto possível.

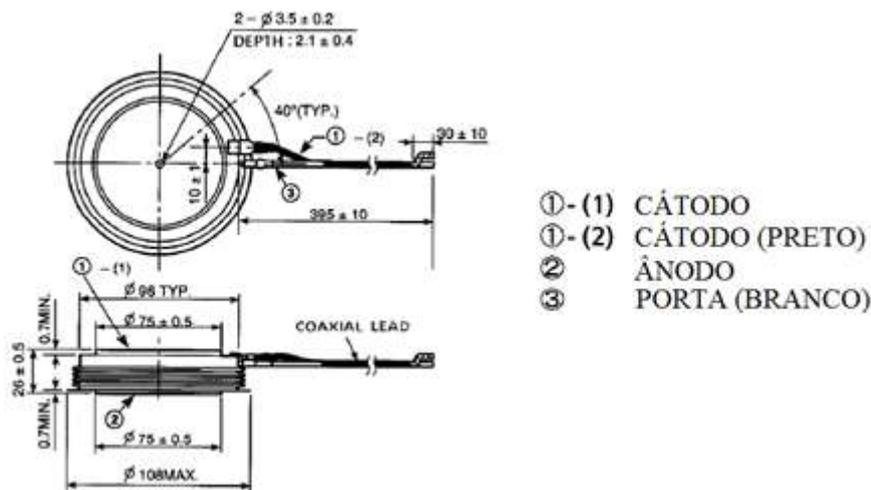


Figura 74 - Aspecto físico do GTO testado

Na Figura 74 pode-se observar o aspecto físico do GTO montado nos módulos de potência testados pelo programa.

A Figura 75 ilustra as características descritas, numa evolução temporal típica das correntes e tensões aos terminais de um tiristor GTO, na comutação condução/corte, que foi retirada de [5], de onde também se retirou a descrição destas características e onde podem ser encontradas descrições mais detalhadas de outras características destes dispositivos.

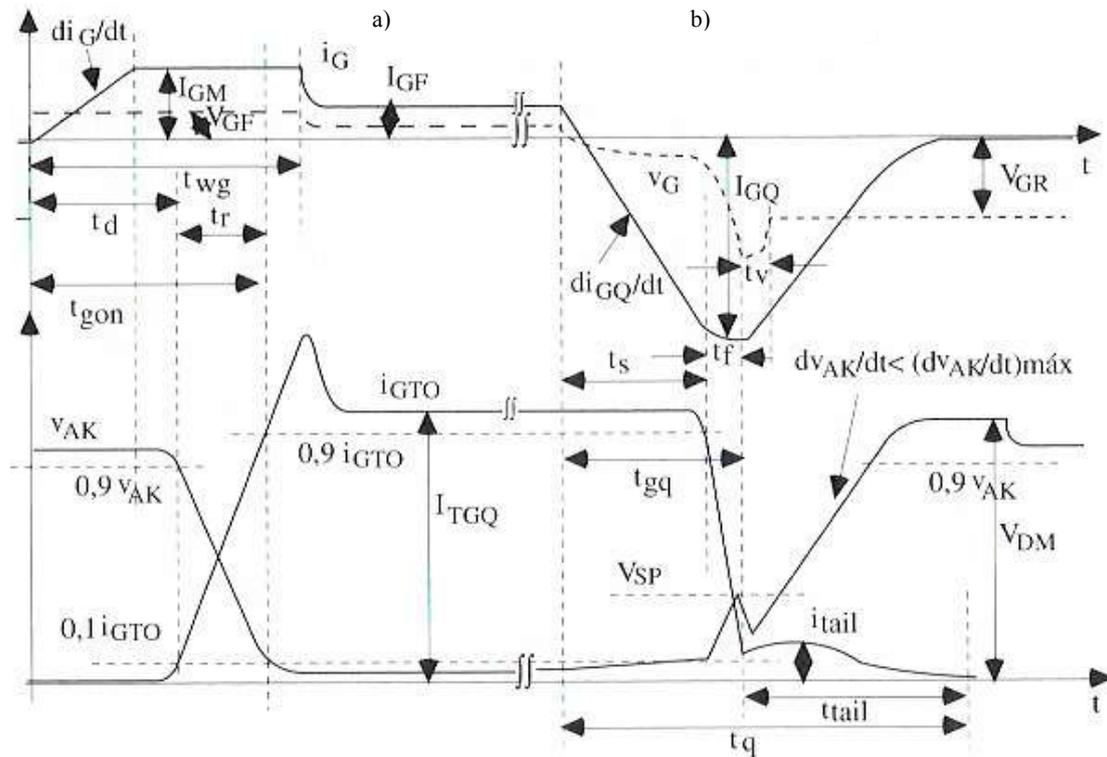


Figura 75 - Evolução temporal das correntes e tensões aos terminais de um tiristor GTO durante os transitórios de passagem à condução a) e de passagem ao corte b) num circuito com carga indutiva, diodo de roda livre e bobine de limitação de di_{GTO}/dt

II.2 Características Limite

As correntes e tensões aos terminais de um tiristor GTO são limitadas devido a fenómenos energéticos, isto é, elevados níveis de tensões e correntes podem levar à fusão do semiconductor, devido às elevadas potências dissipadas e a fenómenos de basculamento ("latchup") profundo, ou seja, as elevadas correntes directas provocam uma diminuição b_{OFF} , aumentando assim a corrente da porta.

II.2.1 Limitações em tensão anódica: Tensões máximas

Os valores limite máximos da tensão ânodo-cátodo são referentes às situações de bloqueio directo e inverso.

V_{DRM} - Máximo valor do pico repetitivo da tensão de bloqueio directo. A tensão directa repetitiva máxima (V_{DRM}) que um tiristor GTO ao corte suporta, sem a ocorrência de avalanche, depende da tensão porta cátodo (V_{GK}) aplicada. O valor de V_{DRM} indicado pelos fabricantes é normalmente medido com uma polarização negativa de porta v_{GK} entre -2V a -5V.

V_{RRM} - Máximo valor do pico repetitivo da tensão de bloqueio inverso. O valor repetitivo da tensão de bloqueio inverso é na melhor das hipóteses 50% de V_{DRM} em tiristores GTO com camada tampão N ou N+. Em tiristores com curto-circuito de ânodo, a tensão V_{RRM} não excede alguns volts.

II.2.2 Limitações em corrente: Correntes máximas

Na Tabela 1 encontram-se também os seguintes valores limite máximos para a corrente de tiristor GTO: I_{TRMS} e I_{TSM} , referentes aos seus valores eficazes e de pico não repetitivo, respectivamente. É ainda especificado o parâmetro I_{TGQ} , máximo valor de pico da corrente directa bloqueável pela porta.

Este valor é normalmente especificado associado, ou a um valor máximo de dv_{ak}/dt , ou a um dado valor da capacidade do circuito RCD de limitação de dv_{ak}/dt , dado que o valor da corrente que um tiristor GTO é capaz de cortar I_{TGQ} , sem que se verifique a sua destruição, depende essencialmente da taxa de variação da tensão directa ânodo-cátodo dV_{AK}/dt e decresce quando este parâmetro aumenta. O valor de I_{TGQ} decresce ainda com o aumento da temperatura do semiconductor.

II.2.3 Limitações em potência e temperatura de funcionamento

A temperatura de junção nos tiristores GTO é limitada a 125°C para minimizar a ocorrência do fenómeno do embalamento térmico.

II.2.4 Limitações do terminal de comando (Porta)

Para permitir o dimensionamento do circuito de comando, de modo a tirar partido do tiristor GTO sem o danificar ou mesmo pôr em risco, são indicadas como características máximas e médias para a porta:

P_{FG} média - Potência média admissível na porta polarizada directamente.

I_{FGM} - Máxima corrente de pico admissível na porta polarizada directamente.

P_{RG} média - Potência média admissível na porta polarizada inversamente.

V_{RGM} - Tensão inversa máxima admissível na porta. Este valor situa-se entre 10V e 20V para a maior parte dos tiristores GTO.

II.2.5 Limitação em dv_{AK}/dt

O tiristor GTO apresenta um limite máximo para a taxa de crescimento da tensão aos seus terminais, os construtores fornecem um diagrama onde indicam o valor admissível de (dv_{AK}/dt) em função da corrente que se pretende cortar, para diferentes valores de temperaturas de junção e para uma dada tensão inversa na porta.

Anexo III - Características dos tiristores BT

Os tiristores convencionais que se encontram montados no módulo A30 e A40 são do modelo BSt, fabricados pela SIEMENS. As suas características técnicas encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Características técnicas do tiristor convencional SIEMENS BStR63133.

CARACTERÍSTICAS	SÍMBOLO	VALOR
Características estáticas ânodo-cátodo		
Máxima taxa de crescimento de tensão	dV_{AK}/dt máximo	1000V/ μ s
Máxima taxa de crescimento de corrente	di/dt máximo	200A/ μ s
Limitações em tensão anódica máximas		
Máximo valor de pico repetitivo de tensão directa	V_{DRM}	2000V ($V_{GK}=-2V$)
Máximo valor de pico repetitivo de tensão inversa	V_{RRM}	2000V
Limitações em corrente máximas		
Valor eficaz de pico de corrente	I_{TRMS}	1700A
Valor eficaz de pico de corrente não repetitivo	I_{TSM}	20500A (25°C, 10ms)
Característica de choque térmico	I^2t	2100000A ² s (25°C, 10ms)
Limitações em temperatura		
Limites de temperatura de operação da junção	T_j máximo	120

I^2t - Característica de choque térmico: representa a energia não repetitiva admissível no tiristor durante um certo tempo T/2, normalmente 10ms (50Hz), com a tensão repetitiva reuplicada (“ V_{RRM} applied after surge”).

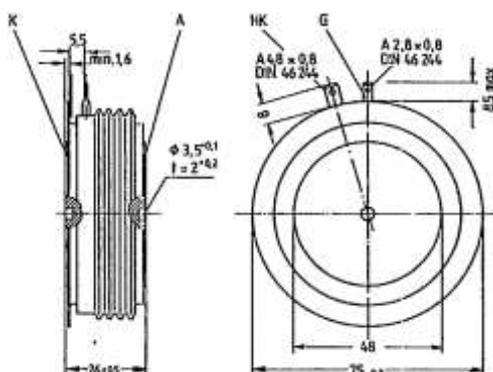


Figura 76 - Aspecto físico do Tiristor convencional testado

Anexo IV - Características dos díodos FD

Os díodos que se encontram montados no módulo A30 e A40 são do modelo SSi, produzidos pela SIEMENS. As características técnicas dos díodos estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características técnicas do diodo SIEMENS SSiR67110.

CARACTERÍSTICAS	SÍMBOLO	VALOR
Limitações em tensão anódica máximas		
Máximo valor de pico repetitivo de tensão inversa	V_{RRM}	2000V
Limitações em corrente máximas		
Valor eficaz máximo da corrente directa	I_{FRMS}	3000A
Máxima corrente de pico não repetitivo	I_{FSM}	20500A (25°C, 10ms)
Característica de choque térmico	I^2t	3125000A ² s (25°C, 10ms)
Limitações em temperatura		
Limites de temperatura de operação da junção	T_j máximo	135°C

I_{FRMS} - Máximo valor eficaz da corrente directa, ("maximum root mean square current"): Refere-se ao funcionamento em regime alternado, normalmente sinusoidal e de frequência especificada (em geral 50Hz).

I_{FSM} - Máxima corrente de pico não repetitivo, ("maximum peak non repetitive surge current"): este valor de corrente não se pode repetir regularmente e não pode exceder um tempo máximo de duração, que neste caso foi de 10ms, com uma temperatura de junção de 25°C e sem tensão re aplicada.

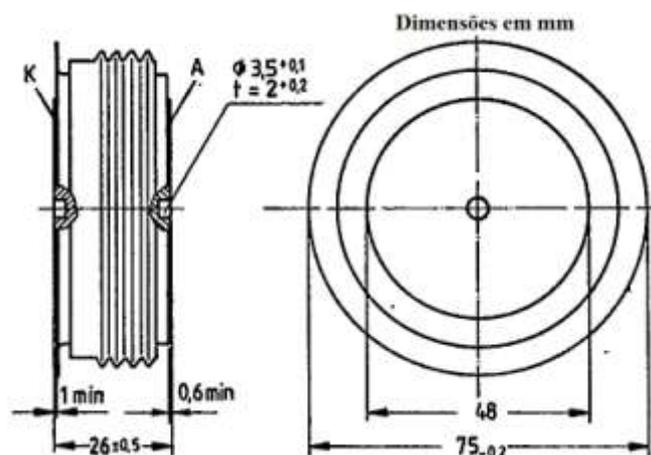


Figura 77 - Aspecto físico do diodo testado

Anexo V – Manual do Utilizador

Início

Iniciar programa

O utilizador tem no menu Início a lista do material necessário para o teste e as indicações para colocar o programa em funcionamento.



Figura 78 - Menu inicial do programa de testes

Após iniciar surge uma janela a pedir as informações sobre o utilizador e módulo a ser testado:

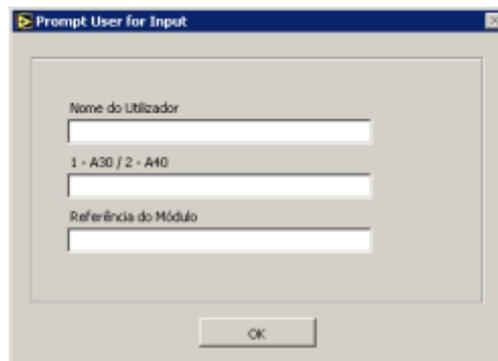
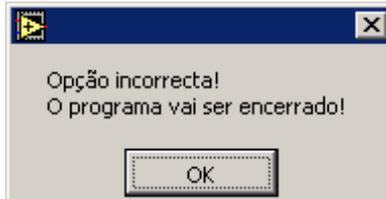


Figura 79 - Janela inicial onde é pedido informações para o teste

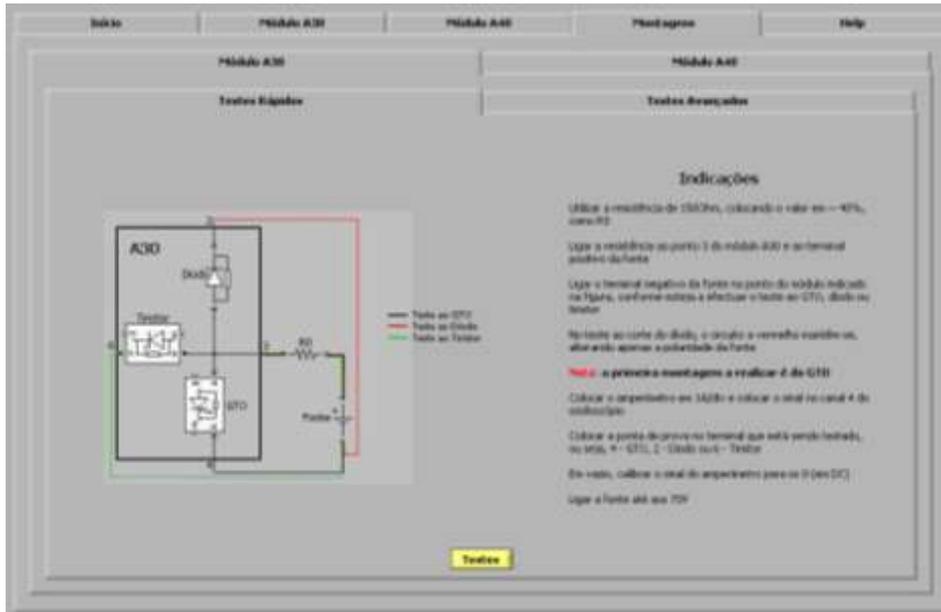
A escolha por parte do utilizador do módulo permite ao programa encaminhá-lo directamente para as montagens correspondentes. Ao escolher o 1, o programa irá realizar os testes do A30 enquanto ao escolher o 2, o programa irá seguir os testes do A40.

Caso o utilizador escolha uma opção diferente, o programa indica opção inválida e é fechado.



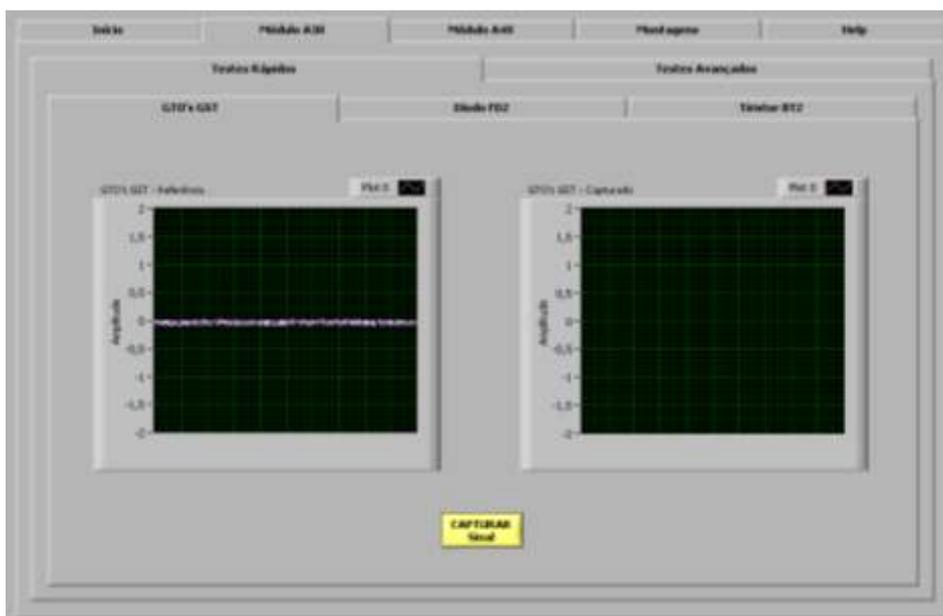
Montagem – Testes Rápidos

No submenu Módulo A30 do menu Montagens, encontra-se a montagem a realizar para os testes rápidos e para os testes avançados.

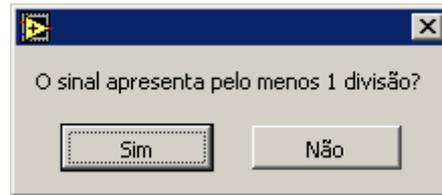


Ao carregar no botão “Testes”, o programa passa para o menu Módulo A30, submenu Testes Rápidos, colocando o utilizador no 1º dos 3 testes a realizar.

Testes Rápidos



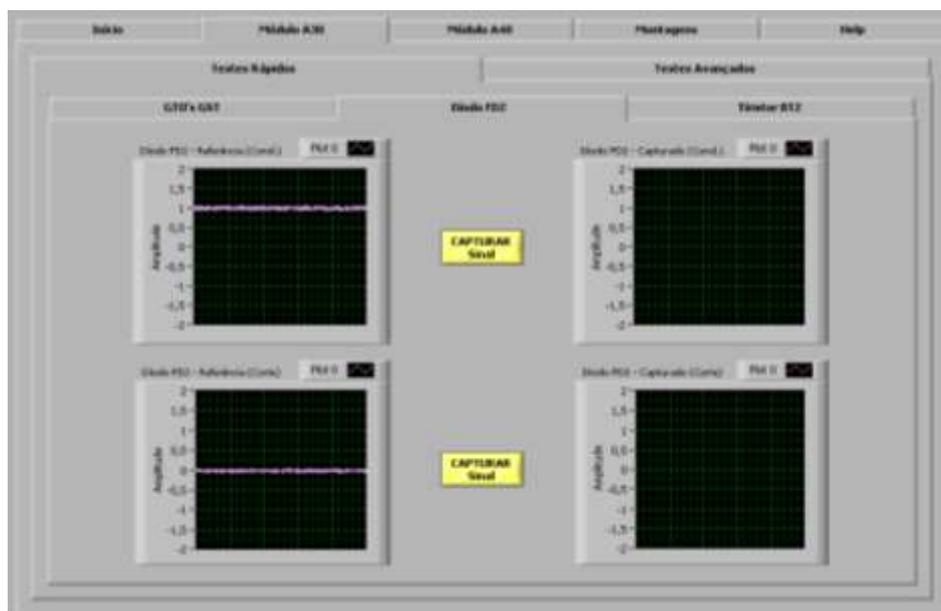
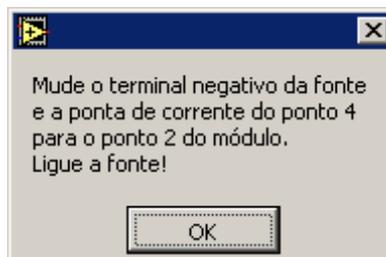
Ao carregar no botão “Capturar Sinal”, o programa copia o sinal que se encontra no osciloscópio para a janela do sinal capturado, aparecendo a seguinte janela:



Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo e sai do programa:

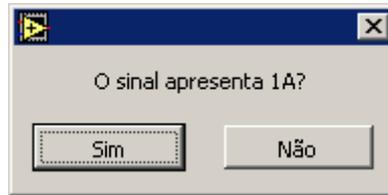


Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo passou com sucesso no teste aos GTO's, seguindo-se a informação para as alterações necessárias para efectuar o teste seguinte:

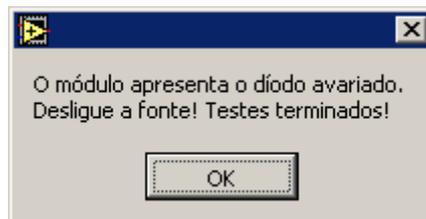


Nos testes ao FD2, o utilizador testa o díodo em condução e ao corte, seguindo para isso a ordem de cima para baixo nos testes indicados.

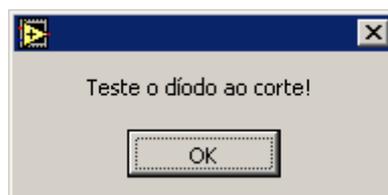
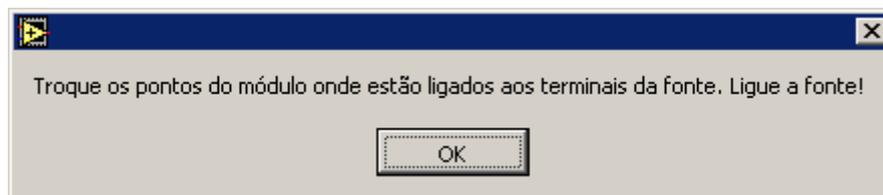
Ao carregar no botão “Capturar Sinal” dos testes de condução, o programa copia o sinal que se encontra no osciloscópio para os gráficos capturados, aparecendo a seguinte janela:



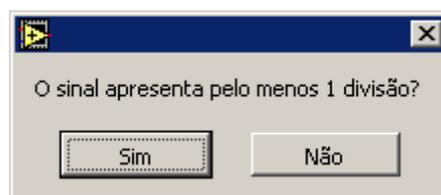
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo e sai do programa:



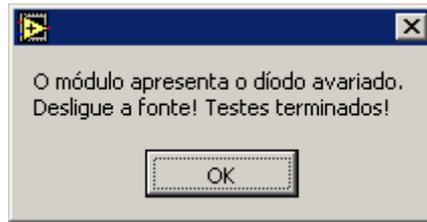
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, será testado o díodo na situação de corte.



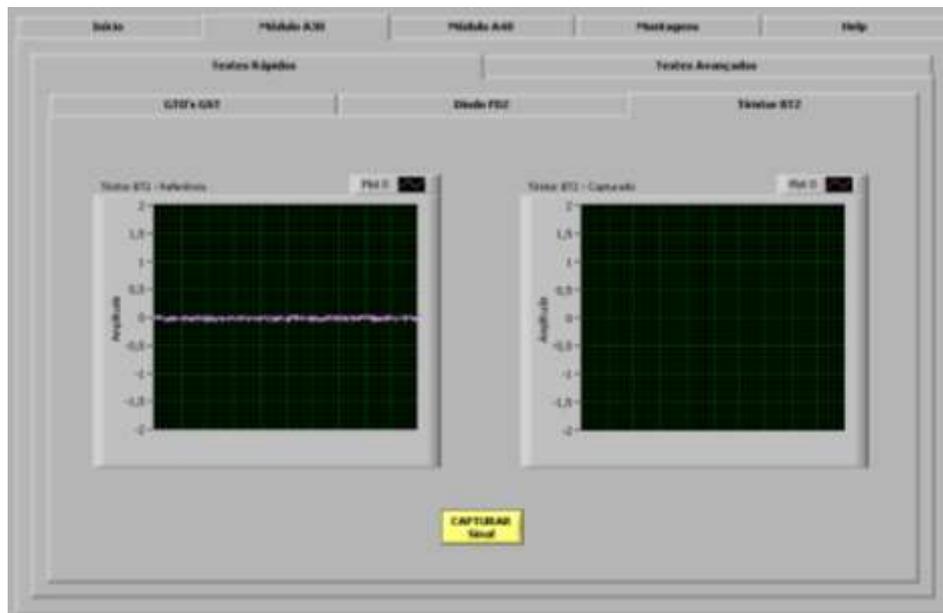
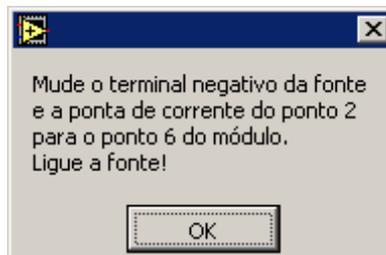
Ao carregar no segundo botão “Capturar Sinal”, o programa copia o sinal que se encontra no osciloscópio para a janela do sinal capturado do díodo em corte, aparecendo a seguinte janela:



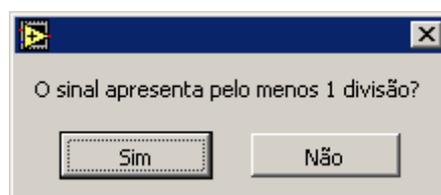
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo e sai do programa:



Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo passou com sucesso nos testes ao díodo, seguindo informação para o teste seguinte.



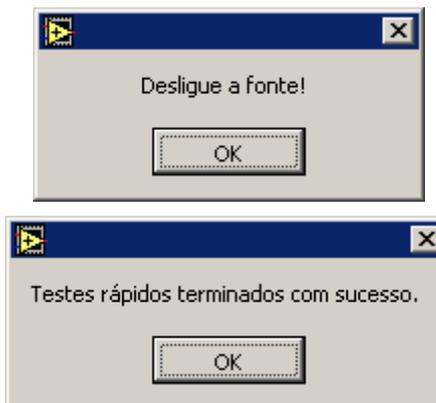
Ao carregar no botão “Capturar Sinal”, o programa copia o sinal que se encontra no osciloscópio para a janela do sinal capturado, aparecendo a seguinte janela:



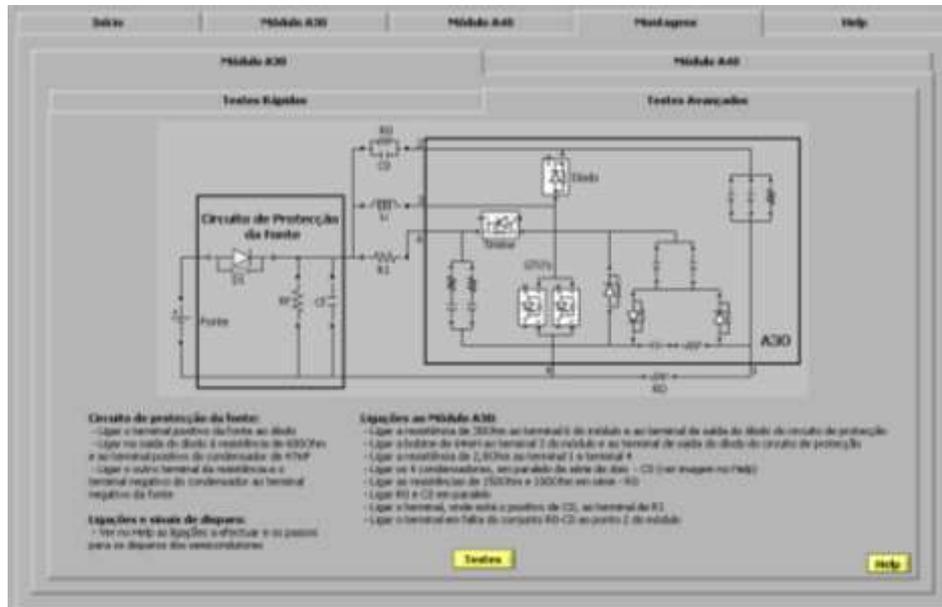
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo e sai do programa:



Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo passou com sucesso no teste ao tíristor, terminando assim os Testes Rápidos. É dada a seguinte informação:



Montagem – Testes Avançados



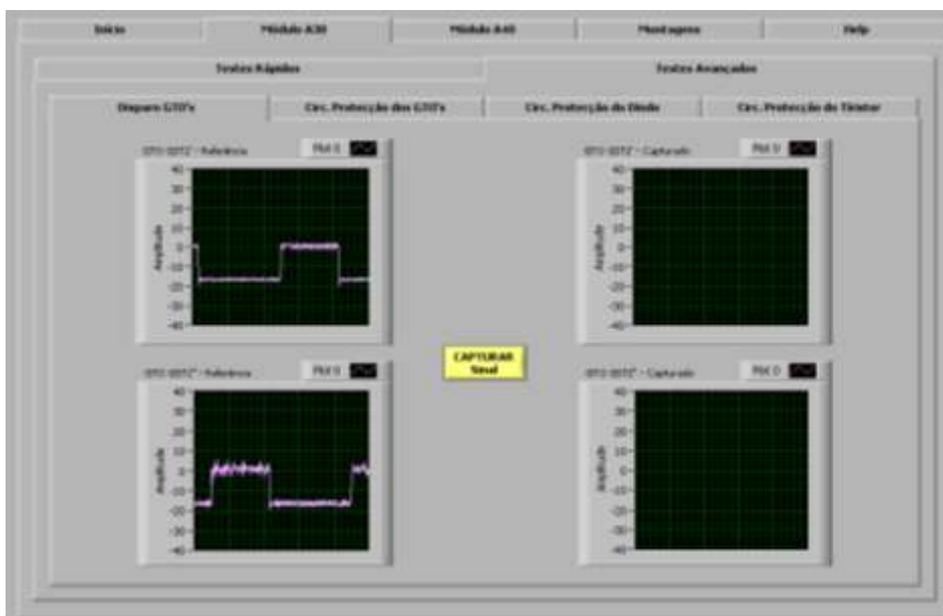
As alterações ao circuito ao longo dos testes avançados resumem-se à alteração do ponto do módulo ao qual é ligado a ponta de prova de tensão, assim como a ponta de prova de corrente.

Como existem várias pequenas ligações a efectuar nos testes avançados, foi criado um menu (Help) onde é descrito mais pormenorizadamente as ligações a efectuar. A passagem para esse menu é efectuada através do botão “Help” no canto inferior direito (Ver figura anterior).

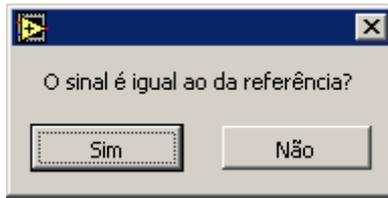


Ao carregar no botão “Montagens” da figura anterior, o programa passa novamente para o menu anterior e neste, ao carregar no botão “Testes”, o programa passa para o menu Módulo A30, submenu Testes Avançados. O menu encontra-se dividido nos testes de disparo dos GTO’s, testes ao circuito de protecção dos GTO’s, díodo e tiristor.

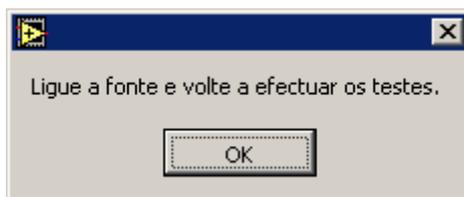
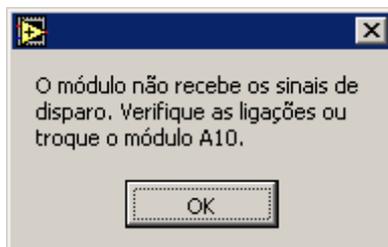
Testes Avançados



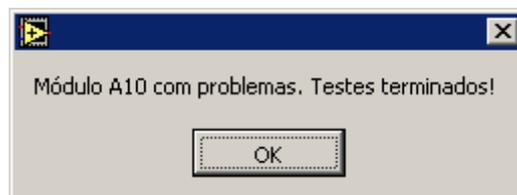
Ao carregar no botão “Capturar Sinal”, o programa apresenta os sinais da tensão dos sinais de disparo, aparecendo a janela:



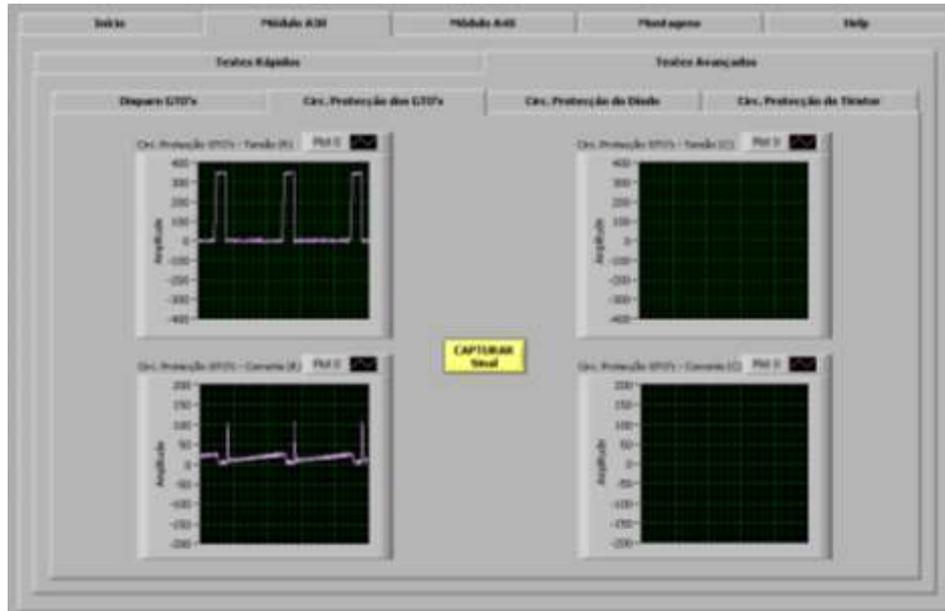
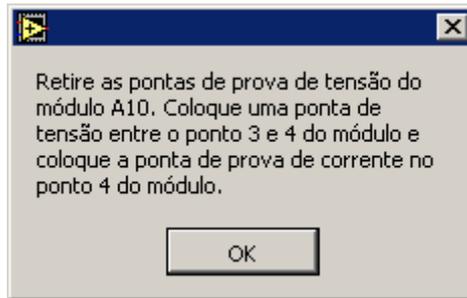
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo não está a receber os sinais de disparo. São apresentadas várias janelas com a indicação do que o utilizador deve efectuar:



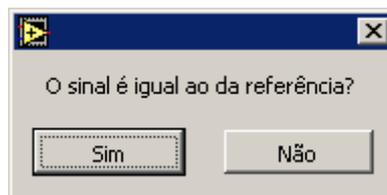
Após a verificação das ligações de disparo ou a troca do módulo A10, o programa permite ao utilizador realizar novamente o teste. Se a resposta for novamente “Não”, temos as seguintes janelas e sai do programa:



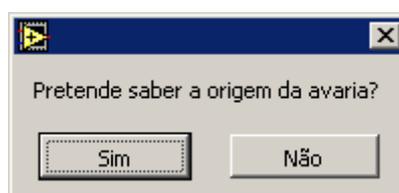
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, seja na primeira tentativa ou na segunda, o módulo está a receber os sinais de disparo em condições e pode passar para o teste ao circuito de protecção dos GTO's, dando o programa a seguinte informação:



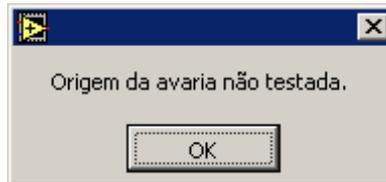
Ao carregar no botão “Capturar Sinal”, o programa irá colocar os sinais do ensaio nos gráficos à direita, seguindo-se a janela:



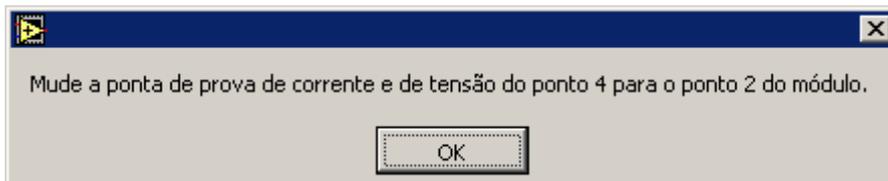
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo apresenta um problema no circuito de protecção dos GTO's. Surgem as seguintes janelas:



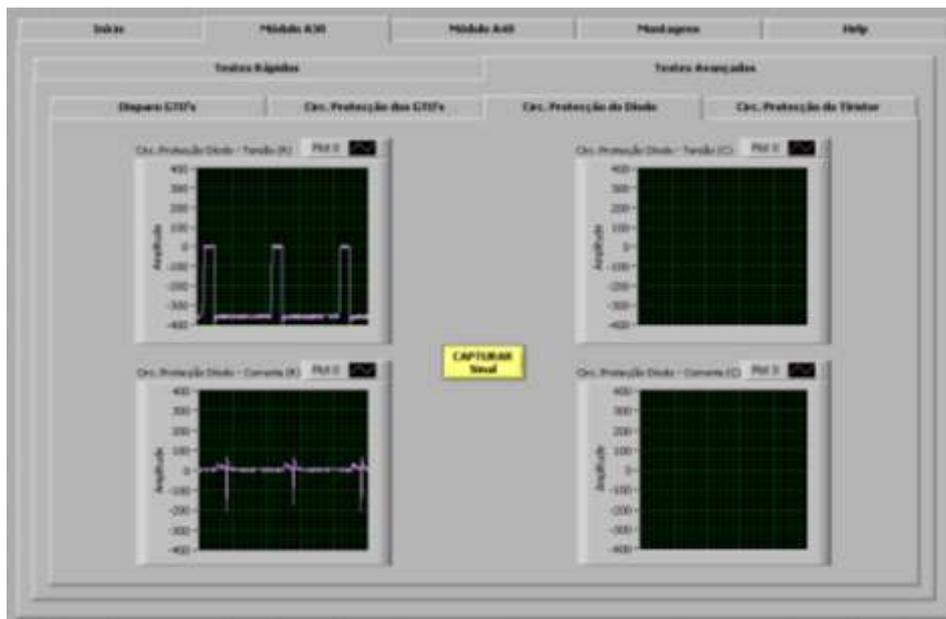
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa irá apresentar várias janelas, fazendo várias questões sobre os sinais, de forma a indicar a possível avaria do módulo. Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa termina.



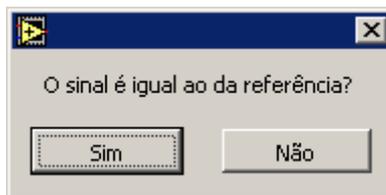
Se o utilizador escolher a opção “Sim” na pergunta sobre o sinal do teste, o módulo passou com sucesso o teste ao circuito de protecção dos GTO's, seguindo a informação:



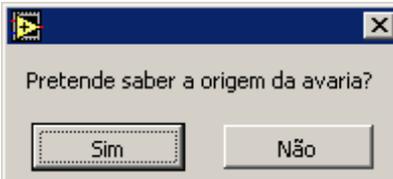
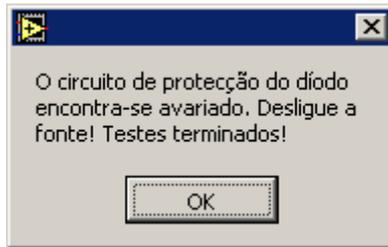
O programa passa automaticamente para o teste ao circuito de protecção do díodo FD2.



Ao carregar no botão “Capturar Sinal” são capturados os sinais do teste:

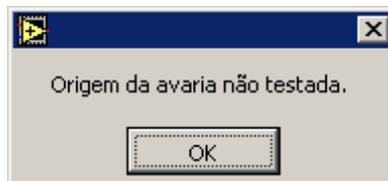


Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo apresenta um problema no circuito de protecção do díodo. São mostradas as janelas seguintes:

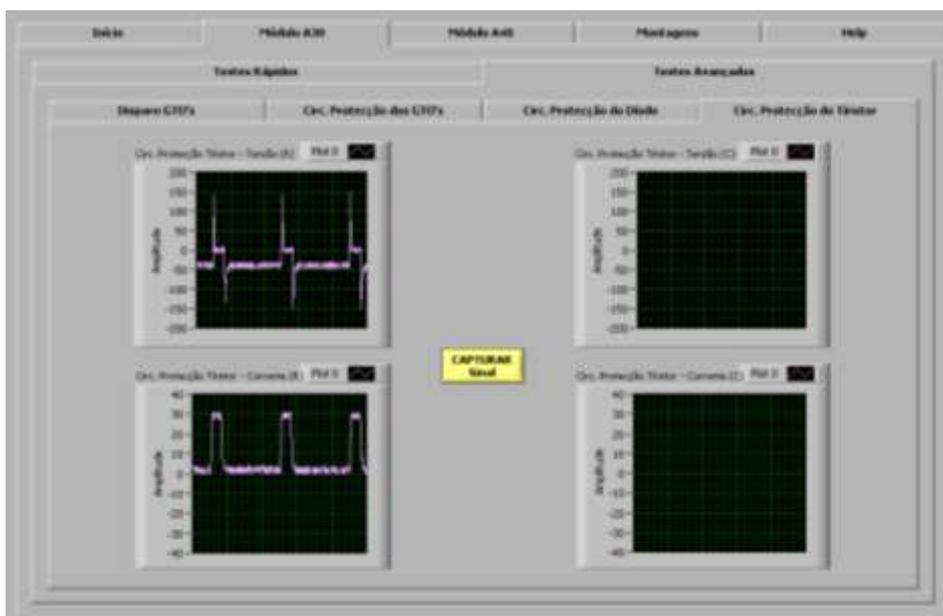
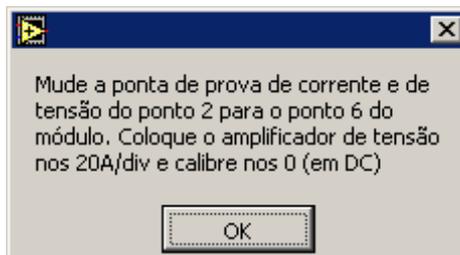


Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa irá apresentar várias janelas, fazendo várias questões sobre os sinais, de forma a indicar a possível avaria do módulo.

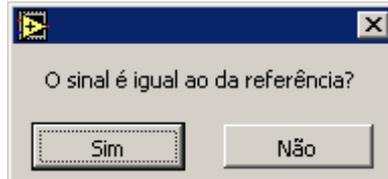
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa termina.



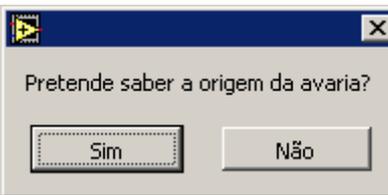
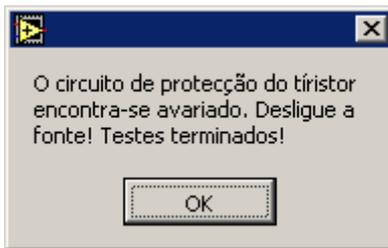
Se o utilizador escolher a opção “Sim” na pergunta sobre o sinal do teste, o módulo passou com sucesso os testes ao circuito de protecção do díodo, seguindo a informação:



Ao carregar no botão “Capturar Sinal” o programa irá colocar os sinais de tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção do tiristor nos gráficos à direita:

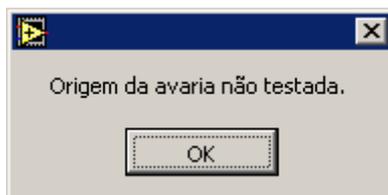


Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo apresenta um problema no circuito de protecção do tiristor, apresentando as seguintes janelas:

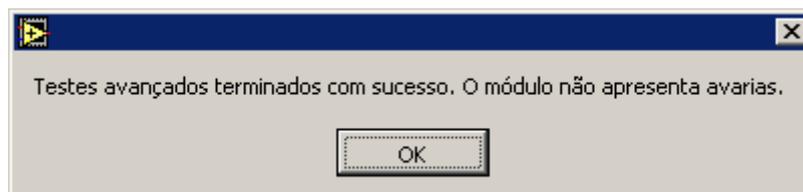
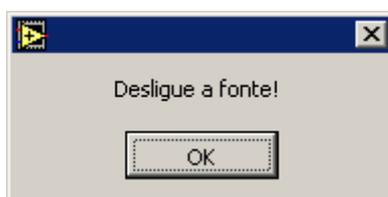


Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa irá apresentar várias janelas, fazendo várias questões sobre os sinais, de forma a indicar a possível avaria do módulo.

Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa termina.



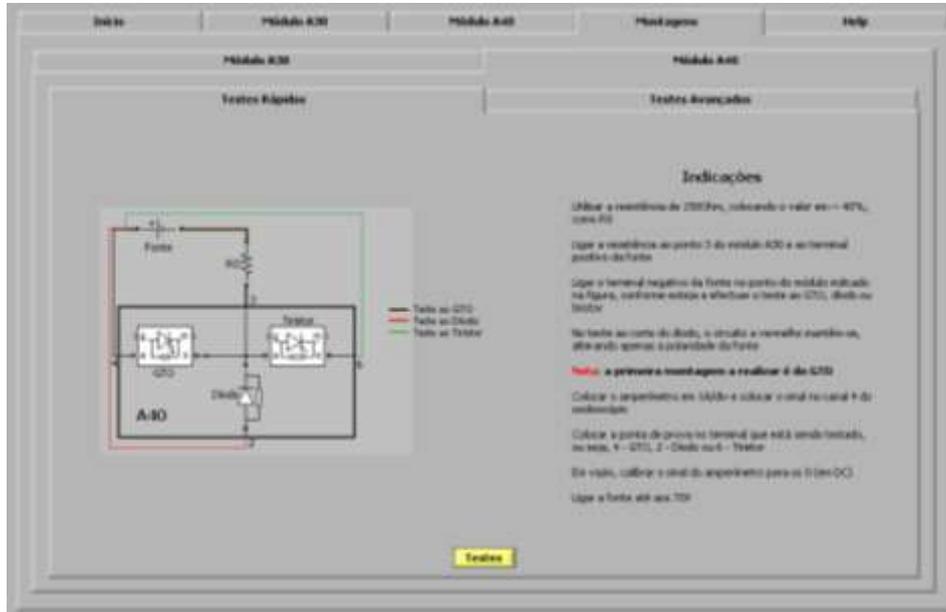
Se o utilizador escolher a opção “Sim” na pergunta sobre o sinal do teste, o módulo passou com sucesso os testes avançados, apresentando as seguintes janelas:



Módulo A40

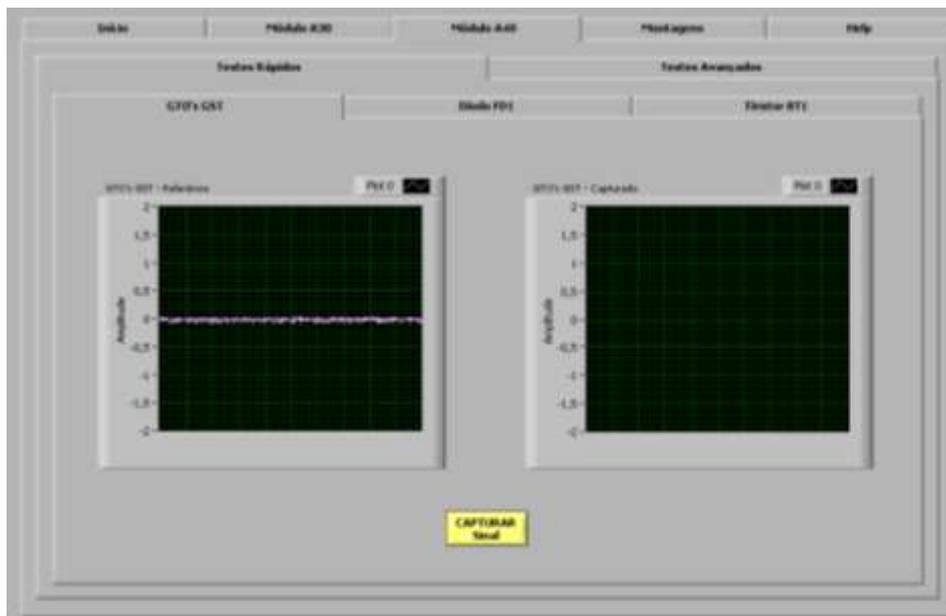
Montagem – Testes Rápidos

No submenu Módulo A40 do menu Montagens, encontra-se a montagem a realizar para os testes rápidos e para os testes avançados.

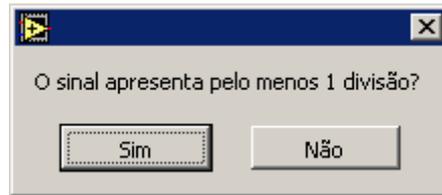


Ao carregar no botão “Testes”, o programa passa para o menu Módulo A30, submenu Testes Rápidos, colocando o utilizador no 1º dos 3 testes a realizar.

Testes Rápidos



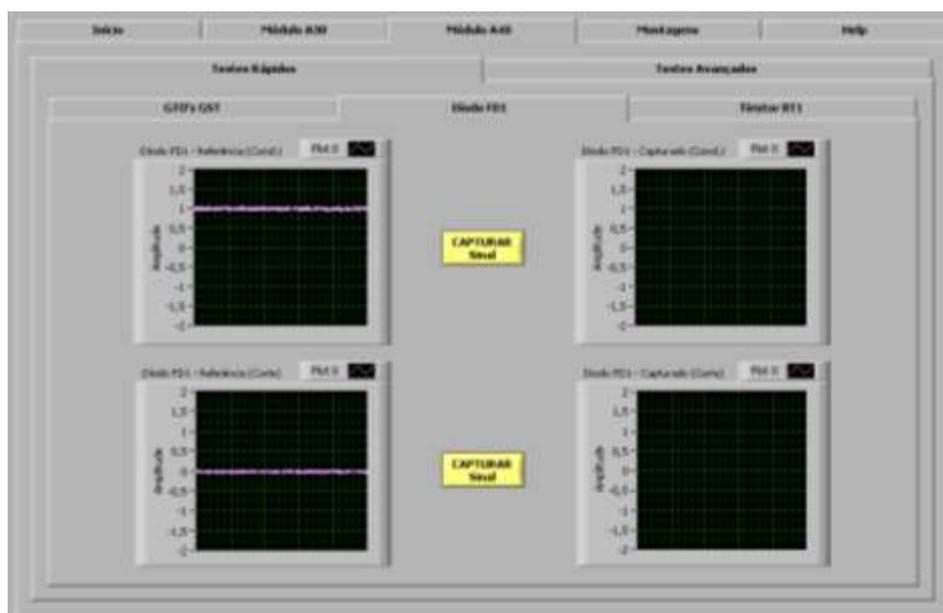
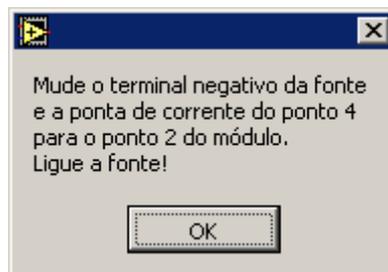
Ao carregar no botão “Capturar Sinal”, o programa copia o sinal que se encontra no osciloscópio para a janela do sinal capturado, aparecendo a seguinte janela:



Se o utilizador escolher a opção "Sim", o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo e sai do programa:

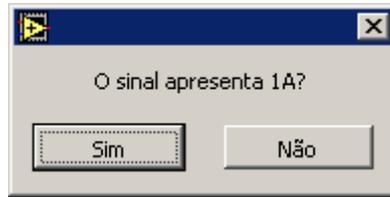


Se o utilizador escolher a opção "Não", o módulo passou com sucesso no teste aos GTO's, seguindo-se a informação para as alterações necessárias para efectuar o teste seguinte:

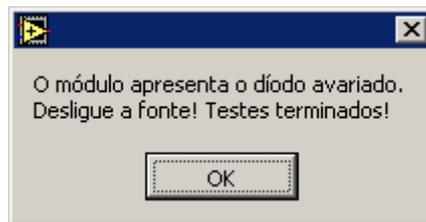


Nos testes ao FD1, o utilizador testa o díodo em condução e ao corte, seguindo para isso a ordem de cima para baixo nos testes indicados.

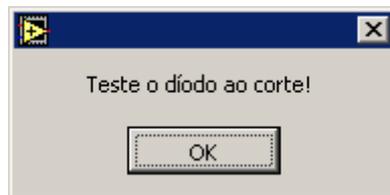
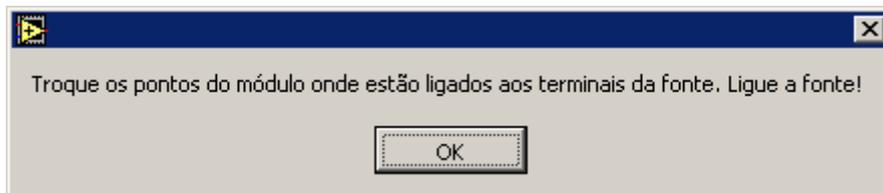
Ao carregar no botão “Capturar Sinal” dos testes de condução, o programa copia o sinal que se encontra no osciloscópio para o gráfico capturado, aparecendo a seguinte janela:



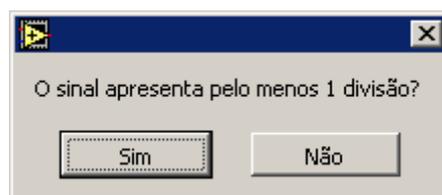
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo e sai do programa:



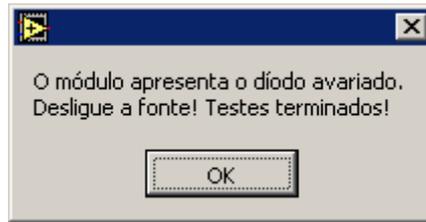
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, será testado o díodo na situação de corte.



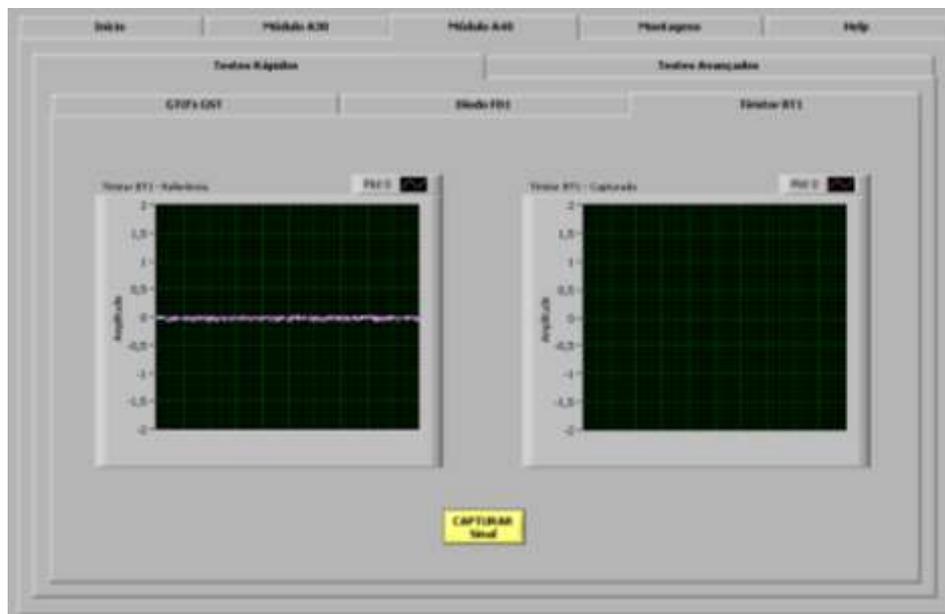
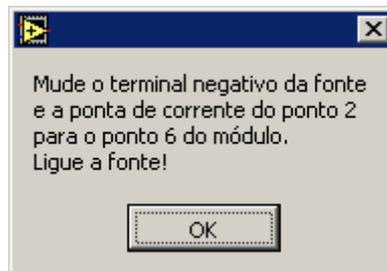
Ao carregar no segundo botão, “Capturar Sinal”, o programa copia o sinal que se encontra no osciloscópio para a janela do sinal capturado do díodo em corte, aparecendo a seguinte janela:



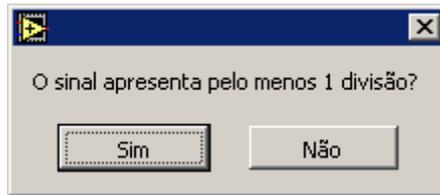
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo e sai do programa:



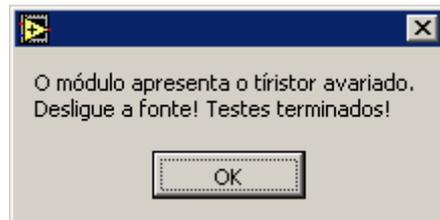
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo passou com sucesso nos testes ao díodo, seguindo informação para o teste seguinte.



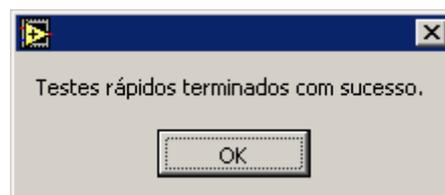
Ao carregar no botão “Capturar Sinal”, o programa copia o sinal que se encontra no osciloscópio para a janela do sinal capturado, aparecendo a seguinte janela:



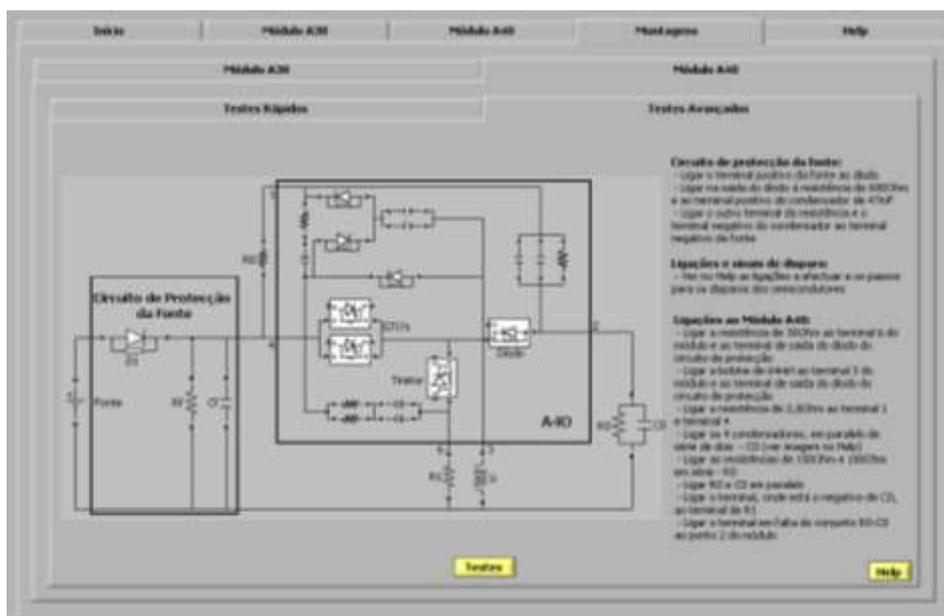
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo e sai do programa:



Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo passou com sucesso no teste ao tíristor, terminando assim os Testes Rápidos.



Montagem – Testes Avançados



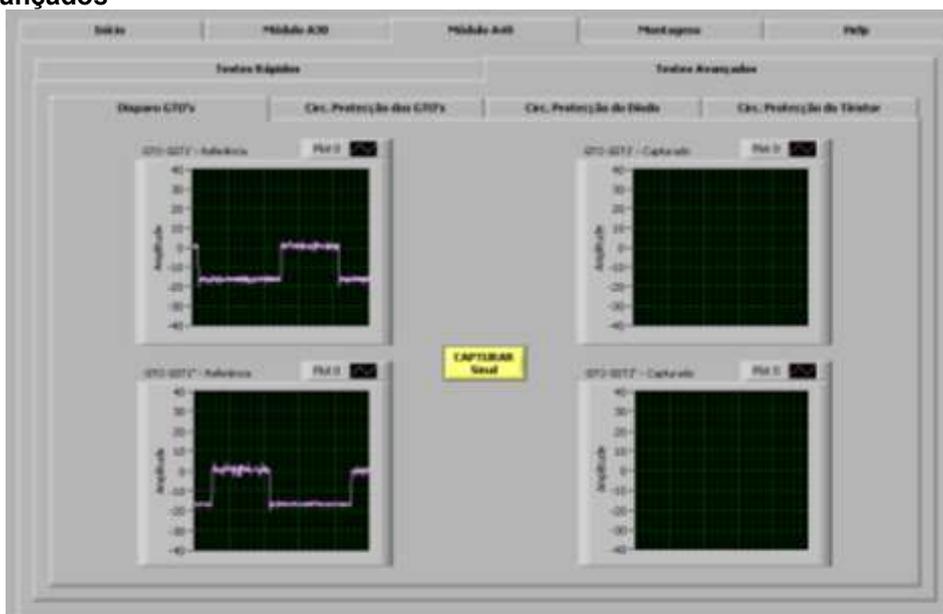
É apresentada apenas a ligação para o primeiro teste, sendo dadas as indicações para os testes futuros após a conclusão, com sucesso, do teste anterior.

Como existem várias pequenas ligações a efectuar nos testes avançados, foi criado um menu (Help) onde é descrito mais pormenorizadamente as ligações a efectuar. A passagem para esse menu é efectuada através do botão “Help” no canto inferior direito (Ver figura anterior).

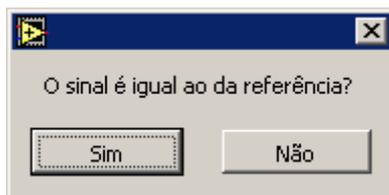


Ao carregar no botão “Montagens” presente na imagem anterior, o programa passa novamente para o menu anterior e neste, ao carregar no botão “Testes”, o programa passa para o menu Módulo A30, submenu Testes Avançados. O menu encontra-se dividido nos testes de disparo dos GTO's, testes ao circuito de protecção dos GTO's, diódo e tiristor.

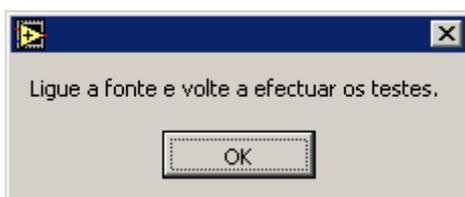
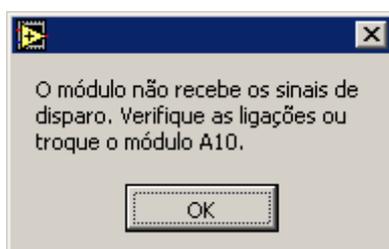
Testes Avançados



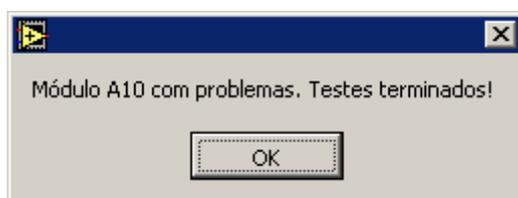
Ao carregar no botão “Capturar Sinal” o programa coloca os sinais nos gráficos do teste, apresentando a janela:



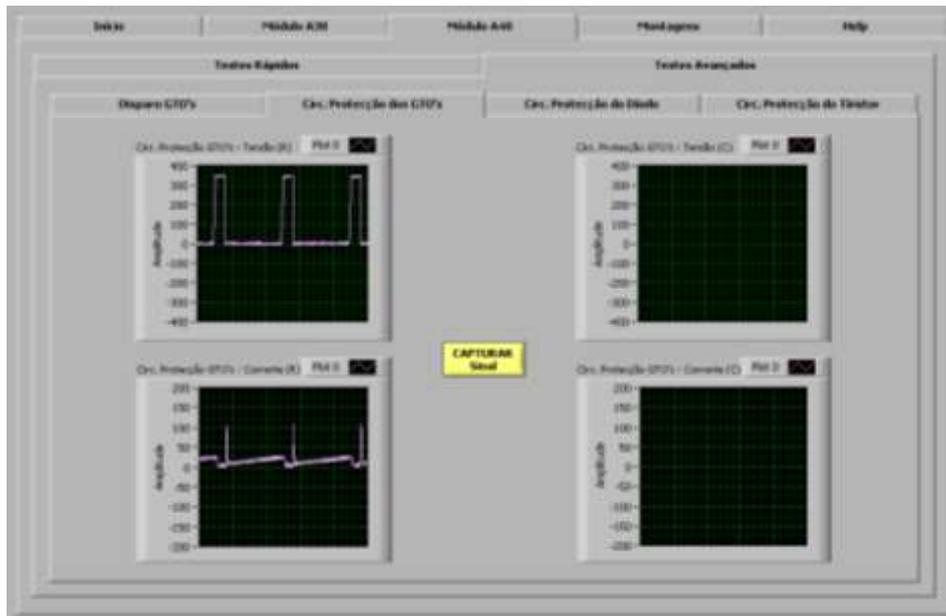
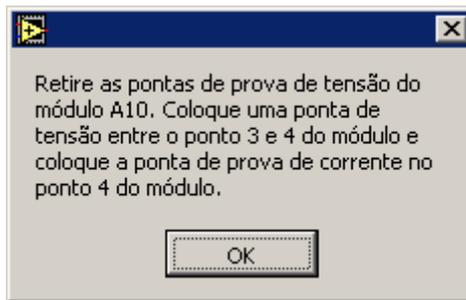
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo não está a receber os sinais de disparo. São apresentadas várias janelas com a indicação do que o utilizador deve efectuar:



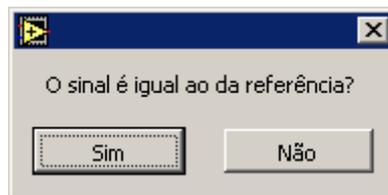
Após a verificação das ligações de disparo ou a troca do módulo A10, o programa permite ao utilizador realizar novamente o teste. Se a resposta for novamente “Não”, temos as seguintes janelas e sai do programa:



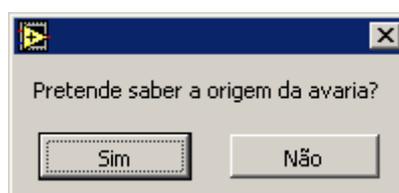
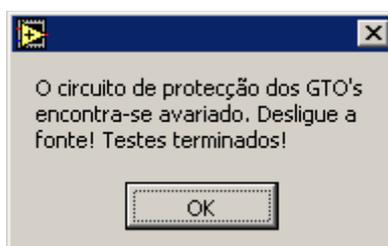
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, seja na primeira tentativa ou na segunda, o módulo está a receber os sinais de disparo em condições e pode passar para o teste ao circuito de protecção dos GTO's, dando o programa a seguinte informação:



Ao carregar no botão “Capturar Sinal” o programa coloca os sinais de tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção dos GTO's, seguindo-se as janelas:

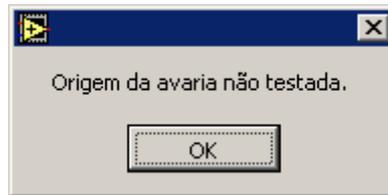


Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo apresenta um problema no circuito de protecção dos GTO's. Surgem as seguintes janelas:

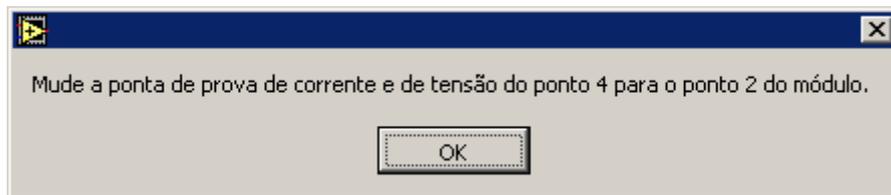


Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa irá apresentar várias janelas, fazendo várias questões sobre os sinais, de forma a indicar a possível avaria do módulo.

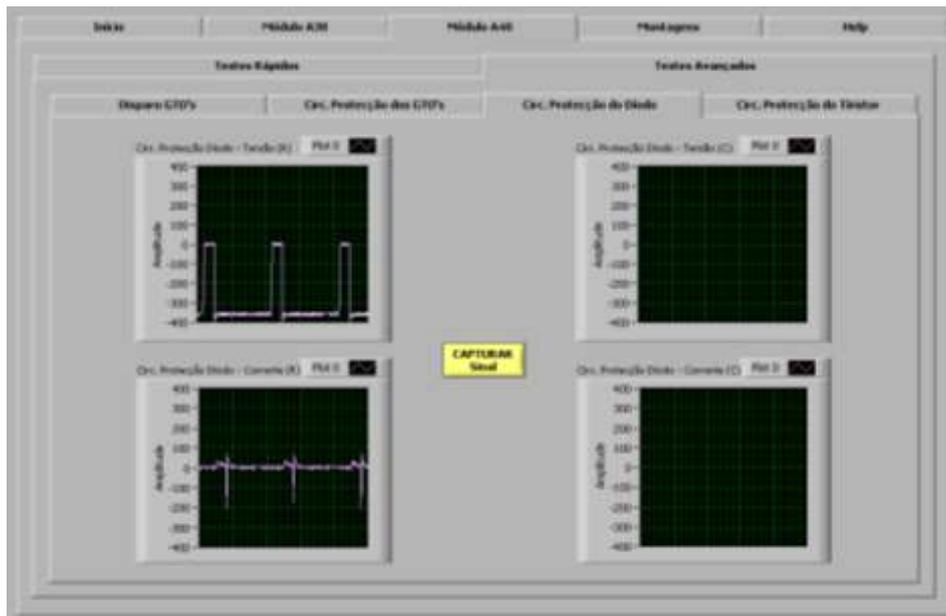
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa termina.



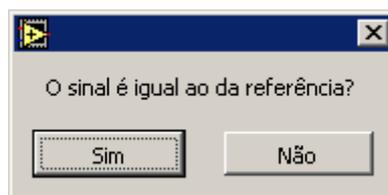
Se o utilizador escolher a opção “Sim” na pergunta sobre o sinal do teste, o módulo passou com sucesso o teste ao circuito de protecção dos GTO's, seguindo a informação para o teste seguinte.



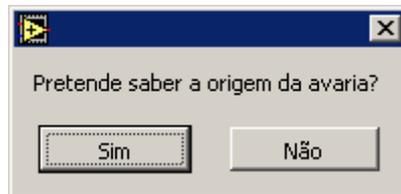
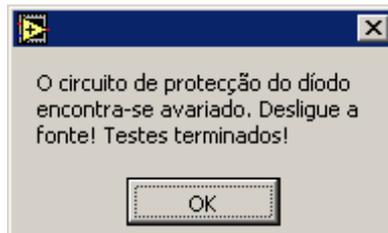
Passando automaticamente para o teste ao circuito de protecção do diódo FD1.



Ao carregar no botão “Capturar Sinal” o programa irá colocar os sinais de tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção do diódo nos gráficos do lado direito:

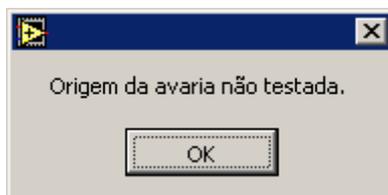


Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo apresenta um problema no circuito de protecção do diódo. Surgem as janelas seguintes:

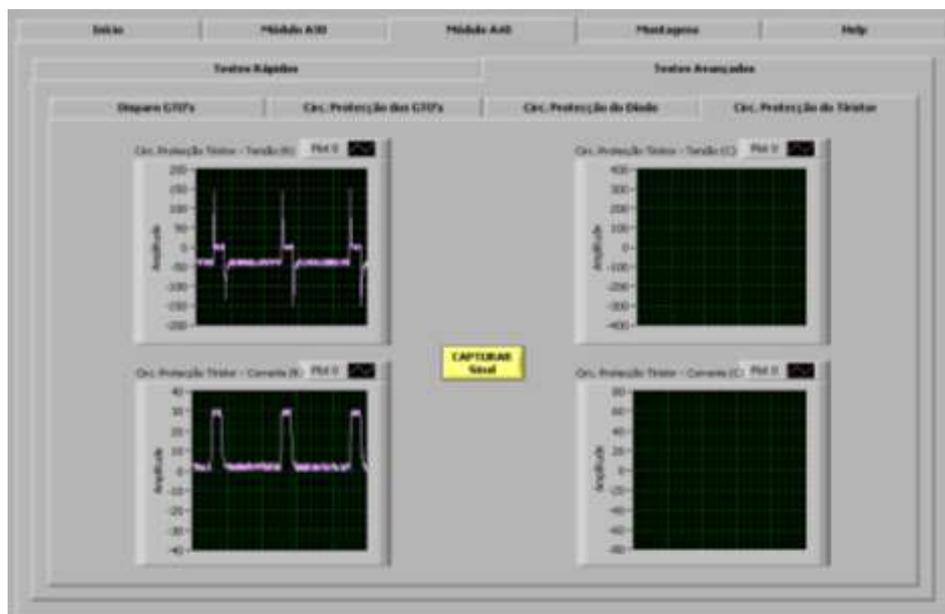
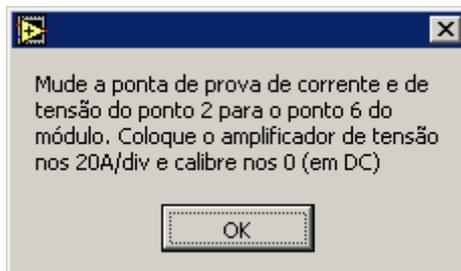


Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa irá apresentar várias janelas, fazendo várias questões sobre os sinais, de forma a indicar a possível avaria do módulo.

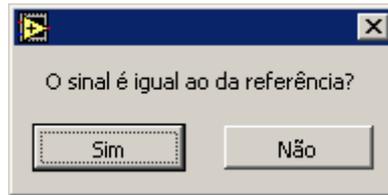
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa termina.



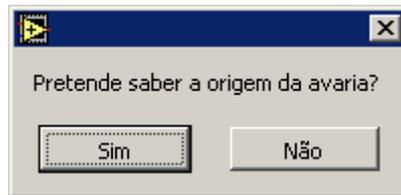
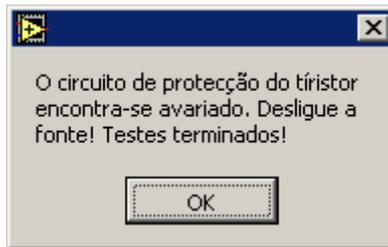
Se o utilizador escolher a opção “Sim” na pergunta sobre o sinal do teste, o módulo passou com sucesso os testes ao circuito de protecção do díodo, seguindo a informação:



Ao carregar no botão “Capturar Sinal” o programa irá colocar os sinais de tensão e corrente aos terminais do circuito de protecção do tiristor nos gráficos:

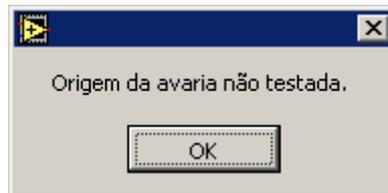


Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo apresenta um problema no circuito de protecção do tiristor, apresentando as seguintes janelas:

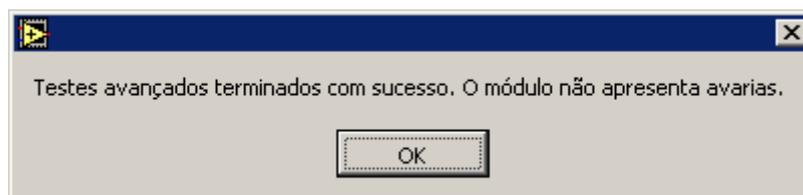


Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa irá apresentar várias janelas, fazendo várias questões sobre os sinais, de forma a indicar a possível avaria do módulo.

Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa termina.



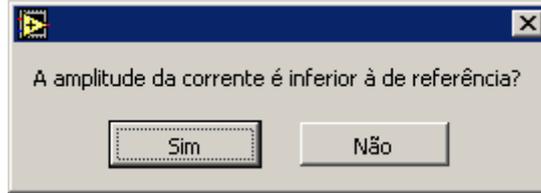
Se o utilizador escolher a opção “Sim” na pergunta sobre o sinal do teste, o módulo passou com sucesso os testes avançados, apresentando as seguintes janelas:



Avarias

Módulo A30

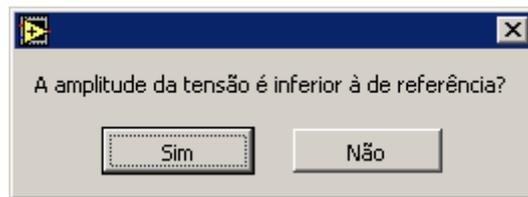
- *Circuito Protecção dos GTO's*



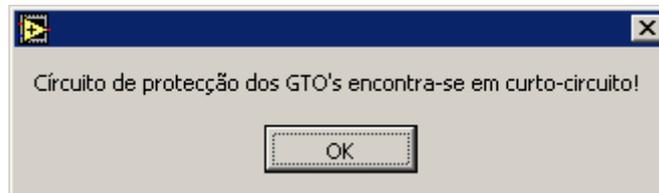
Se o utilizador escolher a opção "Sim", o programa apresenta a janela e sai do programa:



Se o utilizador escolher a opção "Não", o programa apresenta nova janela.



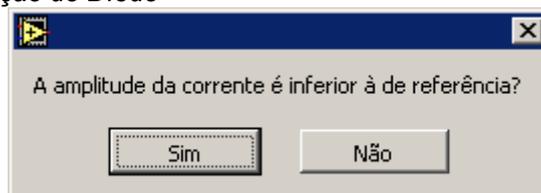
Se o utilizador escolher a opção "Sim", o programa apresenta a janela seguinte:



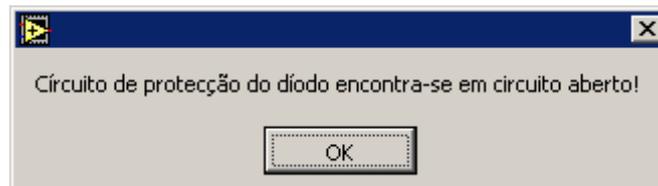
Se o utilizador escolher a opção "Não", o programa apresenta uma outra janela.



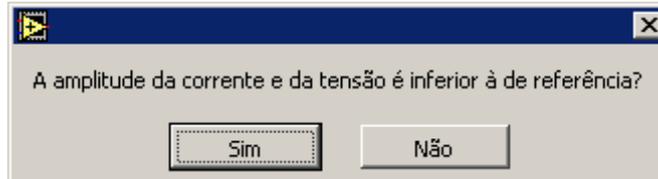
- *Circuito Protecção do Díodo*



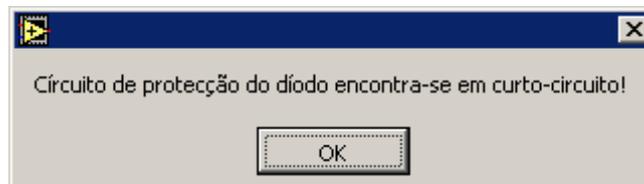
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela e sai do programa:



Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta nova janela.



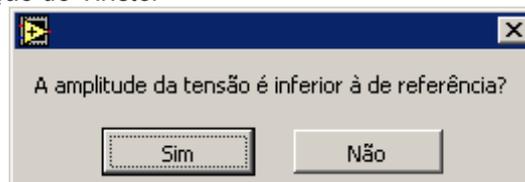
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela seguinte:



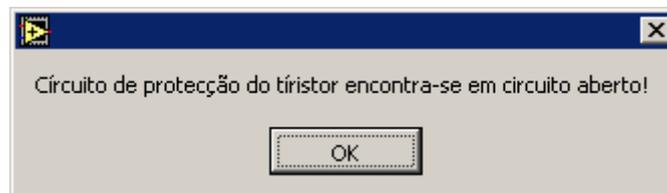
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta uma outra janela.



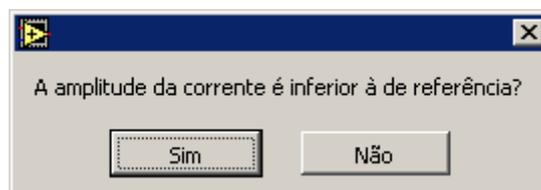
- *Circuito Protecção do Tiristor*



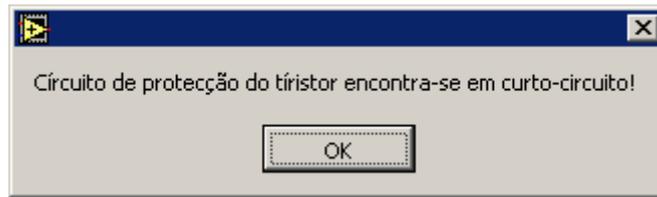
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela e sai do programa:



Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta nova janela.



Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela seguinte:

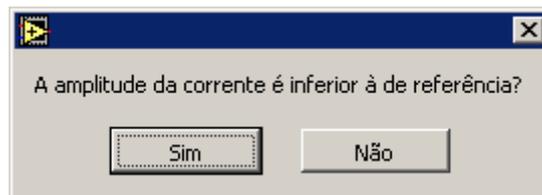


Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta uma outra janela.



Módulo A40

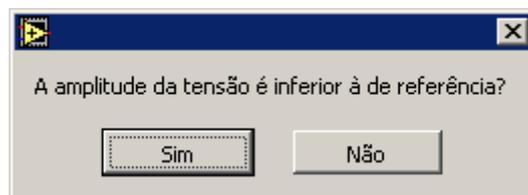
- *Círculo Protecção dos GTO's*



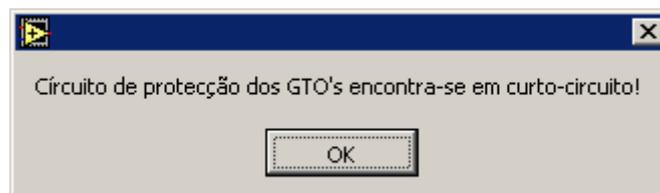
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela e sai do programa:



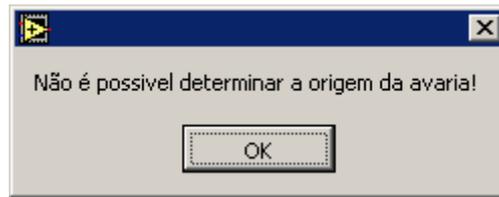
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta nova janela.



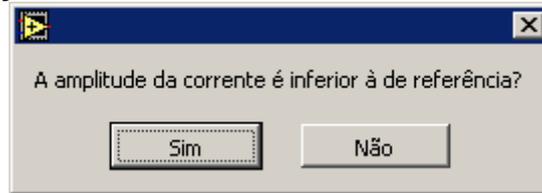
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela seguinte:



Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta uma outra janela.



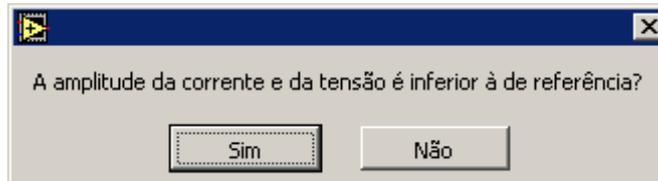
- *Circuito Protecção do Díodo*



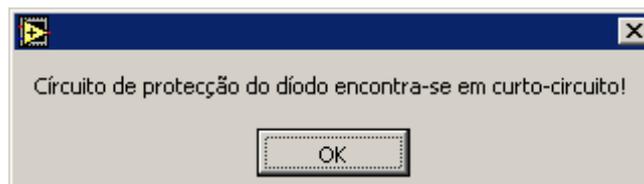
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela e sai do programa:



Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta nova janela.



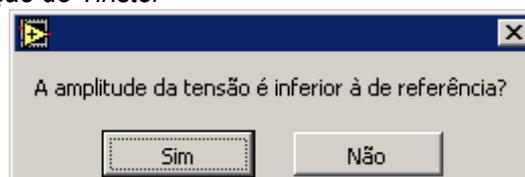
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela seguinte:



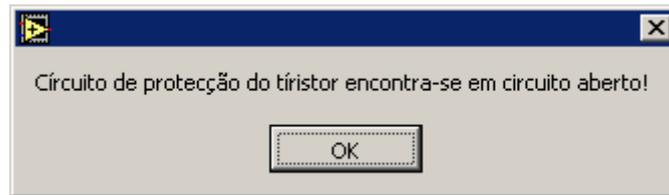
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta uma outra janela.



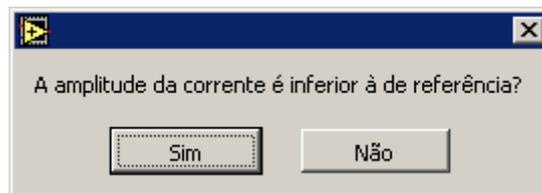
- *Circuito Protecção do Tiristor*



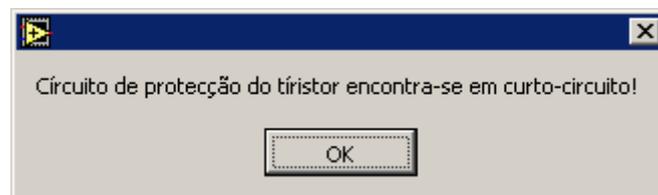
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela e sai do programa:



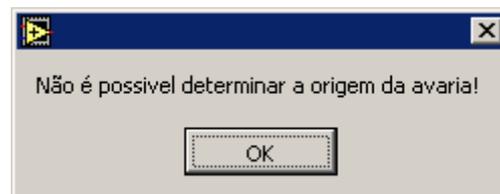
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta nova janela.



Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o programa apresenta a janela seguinte:



Se o utilizador escolher a opção “Não”, o programa apresenta uma outra janela.



Neumon

Para o sinal de disparo dos GTO's e do tiristor é necessária a utilização de um Hyper-Terminal para efectuar comandos à TCU.

O terminal existente no banco de ensaios dá pelo nome de Neumon.

O utilizador terá que entrar no programa e seguir as indicações antes de realizar cada um dos testes avançados, seja para o módulo A30 ou A40:

- (1) Ligar fonte de alimentação do armário de ensaios do ML90.
- (2) Ligar o cabo à carta C023 e ao PC.
- (3) Executar o programa "*Neumon*" que se encontra no ambiente de trabalho do computador do banco de ensaios.
- (4) Premir "Enter" para que apareça no monitor o símbolo "**"
- (5) Escrever "P", aparecendo no monitor "*PROGRAMA_DE_TESTE*", seguido de "Enter"
- (6) Escrever "BS", seguido de "Enter", aparecendo no monitor:
TEMPO DE CONDUÇÃO TIRISTOR PRINCIPAL (0...100):
- (7) Escrever "85", seguido de "Enter", aparecendo no monitor:
TEMPO DE LIGAÇÃO TRAVAGEM DE RECUP. (0...100):
- (8) Escrever "15", seguido de "Enter"

Após estas indicações ao programa, os sinais de disparo dos semicondutores já estão a ser efectuados, podendo-se retirar os valores e sinais pretendidos.

Caso se queira fazer parar o envio de sinais de disparo, deverá ser efectuado:

- (9) Escrever "BS", seguido de "Enter"

Com a não indicação dos valores das percentagens para os GTO's e o díodo principal, o programa cessa o envio de sinais. Para voltar a disparar os semicondutores sem ter que sair do programa, efectuar os passos (7) e (8).

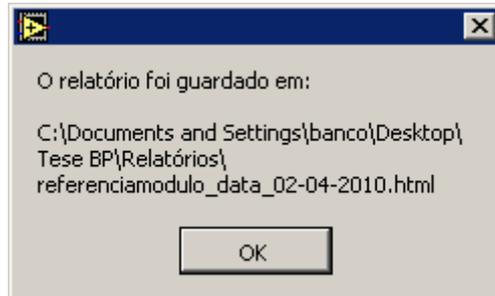
Quando o programa deixar de ser necessário, deverá efectuar os seguintes passos:

- (10) Escrever "Exit", seguido de "Enter"
- (11) Fechar o Hyper-Terminal.

Relatório

Quando o programa chega ao fim dos testes (em caso de sucesso) ou apresenta uma avaria num dos testes efectuados, aparece uma janela a dar a localização do ficheiro que é criado com o relatório do teste, para que este seja posteriormente impresso.

O nome do ficheiro vem no formato referenciamodulo_data de forma a permitir novo teste ao módulo, em caso de nova avaria, sem que o relatório seja gravado por cima do anterior.



Relatório de Testes

Módulo A30

Nome do Utilizador - Bruno Paixão

18-02-2010
23:13

Referência do Módulo - Teste

TESTES RÁPIDOS

GTO's Com Sucesso
Diodo Com Sucesso
Tíristor Com Sucesso

TESTES AVANÇADOS

Disparo dos GTO's Com Sucesso
Circuito de Protecção dos GTO's Com Sucesso
Circuito de Protecção do Diodo Com Sucesso
Circuito de Protecção do Tíristor Com Sucesso

AVARIAS

Módulo sem avarias

Metropolitano de Lisboa, EPE

Figura 80 - Relatório do programa de testes