



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



Ensaio do comando do conversor de tracção do material circulante ML90 do Metropolitano de Lisboa

Katila Sofia de Freitas Mendes

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
Eng. Cândida Borges
Vogais: Prof. João José Esteves Santana

Outubro 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, disponibilidade e 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 desenvolver o trabalho.

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 ao engenheiro Pedro Vilela por ter permitido o ensaio no comboio.

Agradeço ao meu colega Bruno Paixão pela ajuda durante todo o processo da realização do trabalho

Agradeço a minha família e amigos, pela paciência e pelo incentivo que me deram ao longo desse trabalho e é a eles que eu dedico este trabalho.

Resumo

No trabalho realizado, estudaram-se os equipamentos de controlo central e de tracção pertencentes às carruagens motoras do ML90 do Metropolitano de Lisboa, com vista a criação de um programa de testes. Este programa será utilizado no laboratório da secção de Electrónica permitirá despistar avarias nos módulos do conversor principal, do tipo cc-cc (contínuo-contínuo) reversível em tensão com tiristores GTO (Gate Turn Off) pertencente ao equipamento de tracção.

A solução desenvolvida utiliza, a unidade de controlo de tracção motora para gerar os sinais para o módulo A10 Gate Unit (comando de porta dos tiristores GTOs). O testes é efectuado utilizando um programa existente, adaptado para comandar cada módulo do conversor isoladamente, sem estar presente o conversor completo.

Numa primeira fase para perceber o funcionamento dos módulos foram criados modelos dos módulos do conversor cc-cc em “Matlab/Simulink” de forma a simular avarias típicas para se estudarem as características de funcionamento quando existem componentes avariados.

Foi usada uma tipologia do tipo redutor-elevador de modo a criar tensões e correntes tão elevadas quanto possível, mas tendo sempre em conta das limitações experimentais

Numa segunda fase, foram realizados testes ao módulo A10 Gate Unit no comboio, de modo a termos as características funcionais do módulo no seu funcionamento real e como tal servirem de referência para os resultados obtidos em laboratório e nas simulações.

No seguimento das testes realizadas foi criado um programa de testes desenvolvido em “LabView”, com objectivo de determinar avarias nos módulos.

Palavras-chave

Conversor cc-cc, Conversor de tracção, tiristor GTO, Módulo A10 Gate Unit, Módulo, Programa de Testes.

Abstract

On this work, the aim of the study was the equipment of the control and traction motor ML90 carriages belonging to the Lisbon Metropolitan in order to establish a testing program.

This program will be used in the laboratory section of Electronics, and will allow to detect several malfunctions in the modules main converter with dc-dc type reversible in tension with GTO thyristor (Gate Turn Off) belonging to the traction equipment.

The solution developed uses the control unit of motor traction to generate the signals to the module A10 Gate Unit (command port thyristors GTOs). The tests were done using a specific program, adapted to control each converter module in isolation, without having the complete converter.

Initially to understand the functioning of the modules were created models of the modules of the converter dc-dc in "Matlab / Simulink" in order to simulate tests on normal and typical malfunctions to study the characteristics of the components when there are defective elements.

Were used a type of gearbox elevator to create voltages and currents as high as possible, always taking into account the experimental limitations.

In a second phase, tests of the module A10 Unit Gate were made on the train, in order to have the functional characteristics of the module. These tests will be the reference for the results obtained in the laboratory and in the simulations.

Based on the results of the tests a computer program was developed in "LabView", to test the modules and give the results.

Keywords

Converter dc-dc, traction converter, thyristor GTO, A10 Gate Unit module, testing program.

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. Introdução ao Trabalho.....	2
1.5. Estrutura do Relatório.....	4
2. Tiristor de corte comandado pela porta (GTO).....	6
2.1. Introdução do GTO.....	6
2.2. Características Tensão-Corrente	6
2.3. Características Funcionais	7
2.3.1. Entrada em Condução.....	8
2.3.2. Entrada ao corte.....	8
3. Descrição do módulo A10 Gate Unit e seus sistemas de interligação.....	10
3.1. Modulo A10 Gate Unit	10
3.1.1. Unidade de duplo comando A1.....	11
3.1.2. Unidades de alta potência A2 e A3.	11
3.2. Elementos necessários para a realização dos testes.	12
3.2.1. TCU (Traction Control Unit) CCU (Central Control Unit).	12
3.2.2. Descrição dos módulos A30 e A40.	13
3.2.3. Unidades de conexão dos impulsos actuadores A50 e A60.....	15
4. Circuito de disparo do GTO (Gate Unit).	16
4.1. Simplificações para dimensionar os elementos do circuito de disparo do GTO.....	16
4.2. Descrição do funcionamento do circuito.	16
4.3. Dimensionamento do circuito de disparo do GTO.....	17

5.	Dimensionamento do circuito do tipo Redutor-Elevador aplicado ao módulo A30/A40...	20
5.1.	Simplificações para dimensionar os elementos do circuito do tipo Redutor-Elevador.	20
5.2.	Dimensionamento teórico do circuito do tipo Redutor-Elevador.	20
5.2.1.	GTO em condução, diodo e tiristor ao corte.....	21
5.2.2.	Diodo em condução, GTO e Tiristor ao corte.....	22
5.2.3.	Diodo e Tiristor em condução e GTO ao corte.....	22
5.2.4.	Relações de transferência do conversor do tipo Redutor-Elevador.	23
5.2.5.	Determinação da bobine L_i em função da variação máxima de corrente Δi_{Li} . .	24
5.2.6.	Determinação do condensador C_0 em função da variação.....	26
5.3.	Dimensionamento real do conversor cc-cc do tipo Redutor-Elevador.....	26
5.3.1.	Cálculo do factor de ciclo do tiristor GTO.	27
5.3.2.	Cálculo da indutância L_i	28
5.3.3.	Cálculo do condensador C_0	28
5.4.	Dimensionamento experimental do conversor do tipo cc-cc Redutor-Elevador.....	29
5.4.1.	Cálculo da tensão de saída e das tensões máximas aplicadas aos semicondutores.....	29
5.4.2.	Indutância L_i	30
5.4.3.	Verificação do valor do condensador C_0	30
6.	Circuitos de protecção.	31
6.1.	Fonte de tensão.....	31
6.2.	Módulo A30.....	32
6.2.1.	Circuito de protecção do GTO	32
6.2.2.	Circuito de protecção do Diodo	33
6.2.3.	Circuito de protecção do Tiristor.....	33
6.3.	Módulo A40.....	34
7.	Simulação e Testes.	35
7.1.	Simulação	35
7.1.1.	Simulação do módulo A10 Gate Unit	35
7.1.2.	Simulações dos módulos A30 e A40.....	37
7.2.	Testes efectuados.....	41
7.2.1.	Testes realizados em laboratório	41
7.2.2.	Testes realizados no Comboio.....	42
7.3.	Resultados das Simulações e dos Testes.....	43
7.3.1.	Testes rápidos	44

7.3.1.1	Módulo A10 Gate Unit	44
7.3.1.2	Modulo A30.....	47
7.3.1.3	Modulo A40.....	47
7.3.2.	Testes Avançados.....	48
7.3.2.1	Módulo A30.....	48
7.3.2.2	Módulo A10 Gate Unit	50
8.	Programa para executar os testes.....	54
8.1.	Descrição do Programa.	54
8.1.1.	Testes Rápidos.....	55
8.1.2.	Testes Avançados.....	56
9.	Conclusões.....	58
10.	Bibliografia	60
Anexo I.	Sistema de tracção-travagem / Circuito de potência.....	60
I.1.	Esquema de princípio.....	60
I.1.1.	Captação de corrente 11X1...11X4.....	60
Anexo II.	Características do tiristores GTO GST.....	66
II.1.	Características estáticas e dinâmicas do terminal de comando de porta.....	66
II.2.	Características dinâmicas ânodo-cátodo (Regime de comutação abrupta)	67
II.2.1.	Entrada em condução	68
II.2.2.	Entrada ao corte.....	68
II.2.3.	Características limite.	69
II.2.4.	Limitações em tensão anódica: Tensões máximas	70
II.2.5.	Limitações em corrente: Correntes máximas	70
II.2.6.	Limitações em potência e temperatura de funcionamento	70
II.2.7.	Limitações do terminal de comando (Porta).....	70
II.2.8.	Limitação em dv_{AK}/dt	71
Anexo III.	Características dos díodos FD.....	72
Anexo IV.	Características dos tiristores BT	73
Anexo V.	Manual do Utilizador.....	74

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema da ligação do módulo A10 Gate Unit com a TCU, CCU e o PC	3
Figura 2: Esquema de ligação entre TCU, módulos A10 Gate Unit e o conversor cc-cc	4
Figura 3 – Símbolo do GTO	6
Figura 4 – Característica ânodo-cátodo de um tiristor GTO: a)característica ideal; b)característica real.....	7
Figura 5 – Evolução Temporal das tensões v_{AK} , v_{GK} e correntes i_{AK} , i_G na passagem à condução a) e a passagem ao corte b).....	7
Figura 6 – Módulo A10 Gate Unit com as suas unidades	10
Figura 7 – Torre da CCU e da TCU	12
Figura 9 – Módulo A30	13
Figura 8 – Conversor de tracção do ML90 simplificado	13
Figura 10 – Módulo A40	14
Figura 11 – Exemplos de Intervalos de Condução dos semicondutores dos módulos A30 e A40	14
Figura 12 – Unidade de conexão de impulsos actuadores	15
Figura 13 – Circuito de conexão de impulsos	15
Figura 14 – Circuito de disparo do GTO.....	16
Figura 15 – Circuito de disparo com o Mosfet Q1 ON	17
Figura 16 – Circuito de disparo com o Mosfet Q2 ON	18
Figura 17 – Circuito que impõe tempos mínimos de condução e corte.....	19
Figura 18 – Montagens dos módulos A30 e A40 como conversores cc-cc do tipo Redutor-Elevador	20
Figura 19 – Circuito Redutor-Elevador com GTO em condução e os restantes semicondutores ao corte.....	21
Figura 20 – Circuito Redutor-Elevador com diódo em condução e os outros semicondutores ao corte.....	22
Figura 21 – Circuito Redutor-Elevador com diódo e tiristor em condução e GTO ao corte	22
Figura 22 – Circuito Redutor-Elevador para o A40 simplificado.....	23
Figura 23 – Formas de onda no conversor Redutor-Elevador	25
Figura 24 – Esquema do conversor real	26
Figura 25 – Ligação dos condensadores.....	29
Figura 26 – Circuito de Protecção da fonte.	31
Figura 27 – Montagem cc-cc redutora-elevadora com o módulo A30 e os respectivos circuitos de protecção.	32
Figura 28 – Circuito de protecção dos GTOs e seu funcionamento	33
Figura 29 – Circuito de protecção do diódo e seu funcionamento.	33
Figura 30 – Circuito de protecção do tiristor e seu funcionamento.....	34
Figura 31 – Montagem cc-cc redutora-elevadora com o módulo A40 e os respectivos circuitos de protecção.	34

Figura 32 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A10 Gate Unit (Testes rápidos).....	36
Figura 33 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A10 Gate Unit (Testes Avançados).....	37
Figura 34 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A30 (Testes Rápidos)	38
Figura 35 – Esquema de simulação em “Matlab/Simulink” para o A40 (Testes Rápidos).	38
Figura 36 – Esquema da simulação “Matlab/Simulink” para o A30 (Testes Avançados).....	39
Figura 37 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” do A30 com o A10 Gate Unit.	39
Figura 38 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” do módulo A40 (Testes Avançados).	40
Figura 39 – Esquema da simulação “Matlab/Simulink” do A40 com o A10 Gate Unit.	40
Figura 40 – a) cabos que ligam a TCU ao módulo A10. b) Cabo que liga a unidade A50/A60 aos terminais G,K do tiristor convencional. c) Cabo que liga a TCU ao PC. d) Armário de ligações dos sinais que entram e saem da TCU e da CCU. e) TCU. f) Ficha onde liga a unidade A50/A60. g) Cabo que liga a TCU à unidade A50/A60. h) Ficha que liga à carta C007. i) Ficha da carta C023. j) Carta onde liga a ficha do cabo para ligar o PC.	42
Figura 41 – Ligações efectuadas no comboio.....	43
Figura 42 – Tensão VGK e corrente IGK na gate quando o módulo A10 Gate Unit em vazio....	44
Figura 43 – Tensão VGK e corrente IGK na gate.	44
Figura 44 – Tensão e corrente na gate (passagem a condução) (simulação e laboratório).	45
Figura 45 – Tensão e corrente na Gate (passagem a condução) (ensaio no comboio).	45
Figura 46 – Tensão e corrente na Gate (passagem ao corte) (simulação e laboratório).	46
Figura 47 – Tensão e corrente na Gate (passagem ao corte) (ensaio no comboio).....	46
Figura 48 – Corrente no GTO, Díodo (ao corte) e Tiristor.....	47
Figura 49 – Corrente no Díodo (em condução).	47
Figura 50 – Corrente no GTO, Díodo (ao corte) e Tiristor.....	48
Figura 51 – Corrente no Díodo (em condução).	48
Figura 52 – Tensão VGK do GST2’ e do GST2’’.	49
Figura 53 – Tensão aos terminais do GTOs (V3 – 4) e corrente do ponto 4 do módulo.	49
Figura 54 – Tensão aos terminais do díodo (V3 – 2) e corrente que sai no ponto 2 do módulo.	50
Figura 55 – Tensão e corrente na Gate (passagem a condução) (simulação e laboratório).	51
Figura 56 – Tensão e corrente na Gate (passagem a condução) (ensaio no comboio).	51
Figura 57 – Tensão e corrente na Gate (passagem ao corte) (simulação e laboratório).	52
Figura 58 – Tensão e Corrente na Gate (passagem ao corte) (ensaio no comboio).....	52
Figura 59 – Esquema Geral do Programa de testes.	54
Figura 60 – Fluxograma Testes Rápidas do Módulo A10 Gate Unit.	55
Figura 61 – Fluxograma Testes Avançados.....	56
Figura 62 - Esquema do sistema de tracção/travagem do material circulante ML90	60
Figura 63 – Actuação do filtro de linha.....	62
Figura 64 - Inversão de polaridade.....	63

Figura 65 – Aspecto físico do GTO.....	67
Figura 66 – Aspecto físico do díodo testado.	72
Figura 67 – Aspecto físico do Tiristor testado.....	73

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características técnicas do GTO TOSHIBA SG3000GXH24	9
Tabela 2 : Características técnicas do díodo SIEMENS SSiR67110.....	72
Tabela 3 : Características técnicas do tiristor convencional SIEMENS BStR63133.....	73

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,	- díodo
DC	- corrente contínua (“Direct Current”)
FD1,2	- díodo (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. 90°)

Lista de Símbolos

$C_{1,2,\dots}$	- valor da capacidade de 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

Esta tese de mestrado foi realizada nas instalações do Metropolitano de Lisboa utilizando o laboratório e o material fornecido pela Secção de Electrónica e Instrumentação do Metropolitano de Lisboa situada nas instalações do Parque de Material e Oficinas da Pontinha.

O trabalho está inserido numa área iniciada em 2003/2004 pelo Metropolitano de Lisboa e pelo Instituto Superior Técnico e contou com a orientação do Professor José 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 da realização deste trabalho, está focado na necessidade de desenvolver um programa de testes a alguns equipamentos das carruagens do ML90 de modo a fazer o diagnóstico de possíveis avarias aos equipamentos na secção de electrónica e Instrumentação do Metropolitano de Lisboa. Este diagnóstico visa a diminuir o envio desnecessário dos equipamentos para o fabricante Siemens de modo a diminuir custos se estes não se encontrarem danificados e se estiverem danificados reportar antecipadamente a possível avaria. Deste modo, do ponto de vista da empresa do Metropolitano de Lisboa é possível diminuir custos (uma vez que nem todos os equipamentos estão avariados) e diminuir o tempo de espera do equipamento uma vez que é um processo moroso (algumas semanas).

Neste trabalho foi-me dada a oportunidade de aprofundar os conhecimentos adquiridos e perceber melhor o funcionamento e o comportamento real de alguns componentes electrónicos.

1.3. Objectivos

Neste trabalho pretende-se estudar e desenvolver um programa de testes para o módulo A10 Gate Unit (“Circuito de comando do eléctrodo de porta”) do conversor de tracção das carruagens da série ML90. O objectivo é verificar se os módulos do módulo A10 Gate Unit estão em boas condições de funcionamento ou, caso contrário, determinar se possível as componentes que estão a causar a avaria. Como o módulo A10 Gate Unit é o circuito de disparo dos GTOs (“Gate Turn-Off thyristor”) dos módulos de potência A30 e A40 do conversor de tracção das carruagens da série ML90 irei também testar alguns componentes desses módulos uma vez que é necessário fazer o despiste de possíveis avarias tentando ao máximo que o circuito em questão tenha o funcionamento idêntico ao real. Procura-se para isso, desenvolver soluções de testes, comandando os módulos de potência a partir da unidade de controlo de tracção, TCU (“Traction control Unit”).

Para tal este trabalho pretende concretizar os seguintes objectivos:

- Estudar por simulação e no laboratório, as unidades do módulo A10 Gate Unit ligadas ao módulo A30/A40 a funcionar como conversor redutor-elevador. Os sinais dos semicondutores dos módulos são criados e enviados pela TCU (“Traction Control Unit”) aos módulos.
- Ensaiar o módulo A10 Gate Unit e os componentes do conversor cc-cc do tipo redutor-elevador de forma a verificar a existência de avarias.
- Criar um programa de teste em simultâneo com um manual de utilizador de forma a orientar o utilizador durante o despiste de avarias.

1.4. Introdução ao Trabalho

As máquinas eléctricas utilizadas nas carruagens do Metropolitano de Lisboa pelas motoras do ML90 são do tipo assíncronas trifásicas, que passaram a ser utilizadas em vez das máquinas de corrente contínua uma vez que são mecanicamente mais robustas e fiáveis. Estas máquinas podem funcionar a velocidade variável e com travagem regenerativa, mediante o uso, hoje relativamente comum, de conversores electrónicos de potência.

Na série de motoras ML90 (modelo em estudo), ao conversor cc-cc (contínuo-contínuo) é aplicada a tensão contínua da linha de 750V. Este conversor reversível em tensão é constituído por um chopper de 2 quadrantes, com tiristores GTOs, que alimenta um circuito intermédio de armazenamento de energia (bobine), que funciona como fonte de corrente para o ondulator de corrente trifásico com tiristores convencionais (com células de comutação) que comanda as máquinas assíncronas de tracção Anexo I [2].

O controlo do conversor cc-cc é feito por modulação de largura de impulso (PWM – “Pulse Width Modulation”). Este conversor cc-cc efectua a conversão do valor da tensão da linha (750 volts +20%, -30%) para o valor da corrente continua desejada. O controlo do ondulator de corrente é feito por uma unidade de 6 impulsos, com comutação sequencial de fases, e é essa variação da frequência da componente fundamental das tensões/correntes trifásicas da saída do ondulator que é possível determinar a velocidade da máquina. O controlo destes módulos é feito por microprocessadores nas cartas (módulos) da TCU (“Traction Control Unit”) [3].

Estão disponíveis no laboratório a TCU, a CCU (“Central Control Unit”) e os módulos de tracção de uma unidade motora. A motora incorpora a parte de tracção do comboio composta por 4 máquinas assíncronas trifásicas duas por cada um dos 2 “boggies” onde assenta a carruagem da motora. Os motores assíncronos estão depois ligados a um contentor de tracção que contém o conversor cc-cc principal, o ondulator de corrente, um conversor cc-cc de travagem e vários transdutores de tensão e corrente (sondas efeito de “Hall”) que enviam à TCU sinais dos valores de tensão e de corrente.

A TCU efectua o tratamento dos valores que recebe a cada instante a partir dos vários sensores e gera os sinais necessários para os diversos conversores, para que o regime de funcionamento desejado seja atingido, mediante os parâmetros recolhidos nos vários pontos

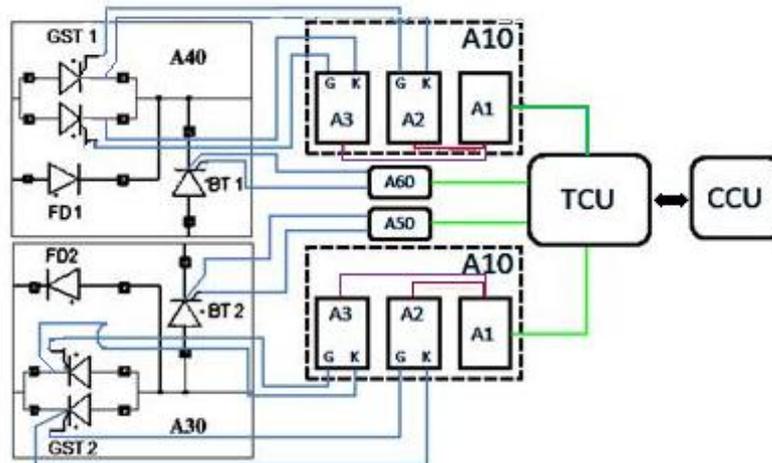


Figura 2: Esquema de ligação entre TCU, módulos A10 Gate Unit e o conversor cc-cc

1.5. Estrutura do Relatório

Este relatório encontra-se dividido em 10 capítulos e vários anexos, dos quais se fará em seguida uma breve descrição.

No capítulo 2 será feita uma breve apresentação, descrição e caracterização do tiristor GTO visto que o objectivo deste trabalho é estudar o circuito de disparo do tiristor GTO inserido no módulo A30/A40.

No capítulo 3 será feita a apresentação do módulo A10 Gate Unit e os restantes módulos necessários ao seu funcionamento.

No capítulo 4 será apresentado o dimensionamento do circuito de disparo (módulo A10 Gate Unit) do GTO.

No capítulo 5 é apresentado o dimensionamento do circuito cc-cc do tipo Redutor-Elevador, de modo a poder-se estudar o módulo A10 Gate Unit ligado aos módulos A30 e A40. Na montagem escolhida teve-se em atenção os materiais disponíveis no laboratório.

No capítulo 6 são apresentados os circuitos de protecção dos módulos A30 e A40 e o seu funcionamento ao longo do período.

No capítulo 7 será apresentado os circuitos da simulação e dos ensaios efectuados aos módulos, bem como os resultados e a comparação destes.

No capítulo 8 será apresentado o programa para executar os testes em que é descrito a estrutura e o funcionamento do mesmo.

No capítulo 9 serão apresentadas as conclusões bem como sugestões para futuros trabalhos.

No capítulo 10 será apresentada a bibliografia que inclui todas as obras consultadas para a realização desta tese.

Em anexo apresenta-se:

- Anexo I: Descrição dos circuitos de potência do sistema de tracção-travagem do ML90.
- Anexo II: Características técnicas do tiristor GTO.
- Anexo III: Características técnicas do díodo FD.
- Anexo IV: Características técnicas do Tiristor BT.
- Anexo V: Manual do utilizador.

2. Tiristor de corte comandado pela porta (GTO).

2.1. Introdução do GTO

O GTO é um dispositivo semiconductor de potência bipolar com estrutura modificada relativamente ao tiristor convencional. É capaz de suportar tensões da ordem dos kV e interromper correntes máximas da ordem dos kA, o que torna este dispositivo ideal para aplicações de alta potência. O GTO passa à condução aplicando um impulso de corrente positivo na porta, como no tiristor. Mas a sua principal característica é de se poder forçar o GTO a passar ao corte com a aplicação de um impulso de corrente negativo na porta mesmo com o GTO polarizado directamente. Esta situação só é possível com uma estrutura interdigitada de porta e de cátodo ao contrário dos tiristores onde existe uma única região de porta central ou lateral e um único cátodo. Este processo de entrada ao corte não é então possível no tiristor convencional, onde a passagem ao corte é feita por polarização inversa entre o ânodo e o cátodo. Por isso o tiristor GTO é um elemento fundamental no desenvolvimento de toda a electrónica de potência, nomeadamente nos conversores electrónicos de potência para tracção de veículos eléctricos e rectificadores de comutação forçada para transporte de energia em corrente continua a muito alta tensão.

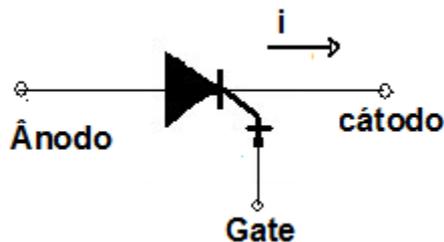


Figura 3 – Símbolo do GTO

2.2. Características Tensão-Corrente

Um tiristor GTO com um comportamento ideal, passaria para o estado de condução por injeção de um impulso de uma corrente positiva no terminal de comando (porta) e desde que a tensão aos seus terminais de potência fosse positiva ($v_{AK} \geq 0$), num tempo nulo. Neste estado (condutor) deixar-se-ia atravessar pela corrente imposta pelo circuito exterior, e a tensão aos seus terminais seria nula ($v_{AK} = 0$).

Passaria do estado de condução ao de corte, por injeção de um impulso de uma corrente negativa no terminal de comando num tempo nulo (Figura 4 a)). E neste estado (corte) não se deixaria percorrer pela corrente ($i_{GTO}=0$) e suportaria a tensão directa imposta pelo circuito externo.

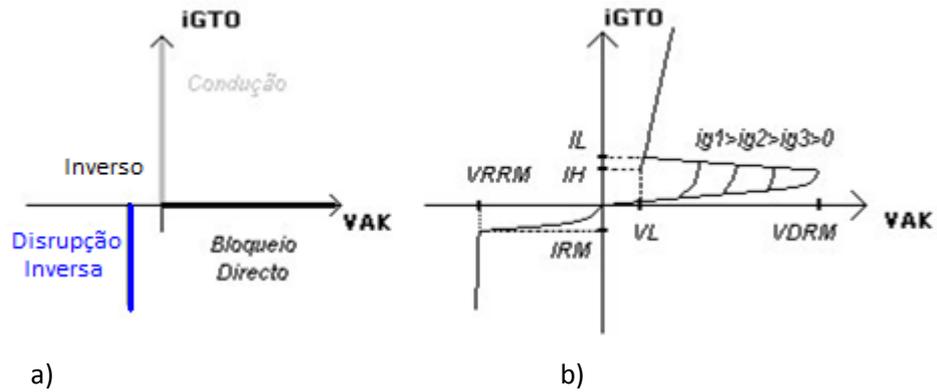


Figura 4 – Característica ânodo-cátodo de um tiristor GTO: a) característica ideal; b) característica real

Mas na situação real, a sua característica mostra que em condução a tensão de condução cresce com a corrente principal (devido a resistência parasita) e que durante o corte é atravessado por uma corrente inversa da ordem dos mA.

A velocidade de comutação, entre os estados de condução e de corte, é suficientemente rápida de modo a que possam ser utilizadas frequências até cerca de 1kHz.

2.3. Características Funcionais

Para comutar um tiristor GTO, é necessário gerar tensões e correntes com características específicas, tanto na passagem à condução como no corte. Na Figura 5 que foi retirada de [5] está representada as formas de onda das características de comutação de um tiristor GTO.

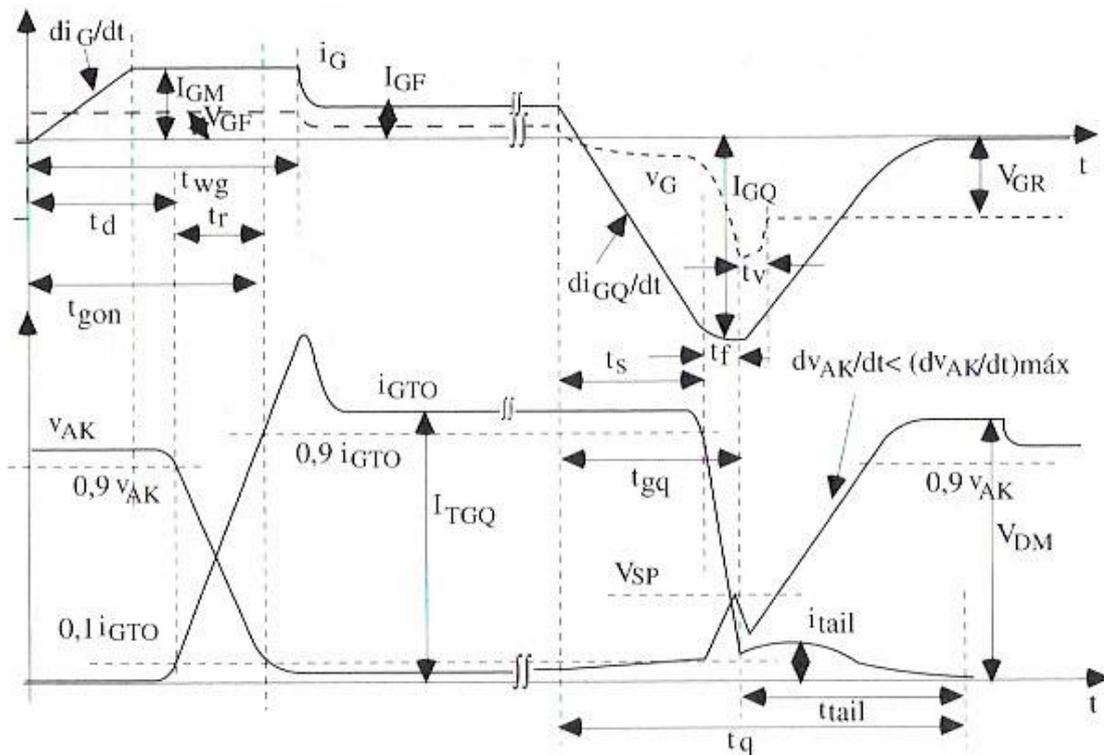


Figura 5 – Evolução Temporal das tensões v_{AK} , v_{GK} e correntes i_{AK} , i_G na passagem à condução a) e a passagem ao corte b)

2.3.1. Entrada em Condução.

Um tiristor GTO passa ao estado de condutor por aplicação de um impulso de corrente positiva na porta, conseguida aplicando uma tensão da ordem de alguns volts entre a porta e o cátodo. Esta tensão terá de ser mantida durante todo estado de condução.

A corrente de porta terá que ter um impulso inicial enquanto a corrente principal não atingir o valor de corrente de lançamento. Este impulso de corrente deverá manter-se durante cerca de $10\mu\text{s}$ uma vez que promove a passagem à condução de todas as ilhas catódicas quase em simultâneo, tornando mais rápido o processo da entrada à condução. A existência deste impulso é fundamental, uma vez que evita a limitação no valor máximo da derivada da corrente principal (di_{GTO}/dt).

Durante o estado de condução, deverá existir uma corrente de porta que tem um valor de cerca de 1A, mantida durante todo o intervalo de condução, de maneira a minimizar a queda de tensão do GTO, fazendo conduzir francamente a junção porta cátodo. Além disso, esta corrente poderá evitar a destruição do dispositivo, não permitindo que algumas ilhas catódicas deixem de conduzir. Se tal acontecesse teríamos uma situação de desequilíbrio na distribuição da corrente directa que poderia, levar ao embalamento térmico e consequentemente à destruição do dispositivo.

As formas de onda, da tensão e da corrente na entrada à condução, estão representadas na Figura 5.a)

2.3.2. Entrada ao corte.

Para passar um tiristor GTO ao estado de corte é necessário aplicar uma corrente negativa com amplitude proporcional à corrente principal no GTO (corrente entre o ânodo e cátodo).

A injeção de corrente negativa é conseguida aplicando uma tensão negativa da ordem da dezena de volt (cerca de -15 volt) entre o terminal da porta e o cátodo.

Depois da aplicação desta tensão, o dispositivo entra num processo de remoção das cargas existentes nas junções, até aí polarizadas directamente. Para promover uma passagem ao corte uniforme em todos os cátodos, o impulso negativo da corrente de porta deverá apresentar um valor de di_{GT}/dt tão elevado quanto possível (Figura 5.b).

Durante todo o intervalo em que o tiristor GTO deve permanecer no estado de corte é indispensável a manutenção de uma polarização negativa V_{GR} na porta de forma a melhorar a capacidade do dispositivo de suportar tensões directas mais elevadas.

Um tiristor GTO não pode voltar a ser disparado antes de ter ocorrido o total anulamento da corrente de recuperação, pois durante esse intervalo alguns portadores minoritários permanecem nas ilhas catódicas. Se não ocorrer a completa recombinação destes portadores, corre-se o risco da destruição do GTO, uma vez que irá ocorrer o embalamento térmico das zonas do cátodo com maior concentração de portadores não recombinados.

Normalmente o fabricante fornece alguns parâmetros de especificações que são tidos como referência para determinar os limites funcionais do tiristor GTO em causa.

Neste caso específico, o tiristor GTO utilizado no módulo A30/A40 é da TOSHIBA – SG3006XH24. 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	150W
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

As restantes características do tiristor GTO e a sua descrição encontram-se no Anexo I.

3. Descrição do módulo A10 Gate Unit e seus sistemas de interligação.

3.1. Módulo A10 Gate Unit

O módulo A10 Gate Unit é o sistema de comando e controlo dos disparos dos tiristores GTOs. Este módulo funciona de forma complementar com os módulos A30 e A40, uma vez que um dos componentes principais desses módulos é o GTO (GST2, GST1 respectivamente). Nas motoras ML90 são utilizados GTOs como semicondutores porque não estava disponível tecnologia viável mais recente e com melhores características.

Como já foi referido o módulo A10 Gate Unit é o módulo dedicado à geração dos impulsos dos tiristores GTO. Este módulo é constituído por 3 unidades, a unidade A1 de duplo comando, e as unidades de alta tensão A2 e A3.



Figura 6 – Módulo A10 Gate Unit com as suas unidades

Neste trabalho serão efectuadas algumas ligações entre o módulo A10 Gate Unit, e outros sistemas que interagem com esse módulo de modo a efectuar testes de despiste de avarias usando um programa de teste já existente no laboratório de electrónica do Metropolitano de Lisboa.

Numa primeira fase de testes, o módulo A10 Gate Unit estará apenas ligado a TCU de modo a ser efectuados apenas testes rápidos. Numa segunda fase de testes serão efectuados testes avançados, em que o módulo A10 Gate Unit estará ligado ao módulo A30/A40, de modo a executar testes nas condições próximas do real funcionamento do comboio. Para se executar esta 2ª fase de testes utilizou-se um circuito do tipo redutor-elevador onde as tensões e as correntes serão consideravelmente maiores que a fonte existente no laboratório, com objectivo de aproximar daqueles á que estes módulos estarão sujeitos quando estiverem a funcionar num comboio, logo serão testes mais fiáveis ao bom ou mau funcionamento do módulo A10 e de alguns semicondutores do módulo A30/A40.

No capítulo 4 far-se-á o estudo do circuito do tipo Redutor-Elevador utilizado nas várias situações de testes.

3.1.1. Unidade de duplo comando A1

A unidade A1 é um módulo de duplo comando, alimentado por uma tensão contínua de 24V que recebe da TCU os sinais de aviso ON (Ligado) e OFF (Desligado), sob a forma de sinais em corrente “push-pull” de 100mA, separadamente para cada GTO, GST2'/GST2” ou GST1'/GST1” dependendo se está a comandar o módulo A30 ou A40 respectivamente. Cada oscilador de compasso converte estes sinais de aviso numa sequência modulada de impulsos, que serve para a transmissão de sinais (ON/OFF) e para a alimentação de energia das respectivas unidades A2 e A3. A unidade A1 está ligada a TCU através de cabos. A ligação isola galvanicamente as unidades de comando das unidades de potência.

Alem disso, a unidade A1 tem as seguintes funções lógicas e de protecção:

- Desconexão de subtensão (corte sob tensão baixa).
- Mecanismo lógico que não permite que os GTOs sejam disparados simultaneamente.
- Se a tensão de alimentação (24V) não for atingida, as ordens de disparo para os GTOs são bloqueadas e eventualmente é dada uma ordem de corte.
- Confirmação de erro na TCU, em caso de A2 ou A3 indicarem um sinal de defeito.

3.1.2. Unidades de alta potência A2 e A3.

As unidades de alta tensão A2 e A3 estão ao potencial de cátodo do tiristor GTO correspondente. A separação galvânica relativamente a unidade A1 é conseguida através de um transformador. São conectados ao transformador um rectificador de carga para a alimentação de energia do módulo e um desmodulador para a descodificação dos sinais de comando (ON/OFF). Na situação de ON é dada ordem de disparo e em OFF ordem de corte aos tiristores GTOs.

Além destas, A2 e A3 têm as seguintes funções lógicas e de protecção:

- Desconexão de subtensão que conduz ao corte dos tiristores GTO, bloqueando os impulsos de disparo. Esta função é independente do funcionamento do módulo A1, então activa quando a alimentação do módulo A2 ou A3 (no arranque) não é suficiente para o seu pleno funcionamento.
- Controlo do tempo que o GTO precisa para o inicio da ordem de desligar até a desconexão real (o bloqueio dos percursos de comando). Caso exceda o tempo limite existe um sinal que indica que a desconexão não se efectuou, porque a corrente de carga a ser extinta é demasiado elevada. Depois, para a protecção do GTO, é iniciada uma “ignição de segurança”, isto é, o GTO e o que lhe estão

paralelamente conectados são ligados. Esta medida é transmitida de volta a unidade A1 como sinal de defeito (sinal de tensão > 10V nos cabos de comando).

- O controlo da largura mínima de impulso (protecção contra impulsos defeituosos ou perturbações nos canais de transmissão de sinal).
- Sinalização – Diagnostico através de três (3) LED's:
 - **LED Vermelho** acesso significa: flui corrente de disparo, tudo em ordem na gate e no circuito de controlo.
 - **LED Amarelo** acesso significa: tensão de disparo em circuito aberto, gate e circuito de controlo interrompidos.
 - **LED Verde** acesso significa: há tensão de corte presente, não existe qualquer curto-circuito na gate e no circuito de controlo.

3.2. Elementos necessários para a realização dos testes.

3.2.1. TCU (Traction Control Unit) CCU (Central Control Unit).

As motoras do ML90 têm nas unidades centrais de controlo CCU e TCU (Figura 7) o núcleo de processamento de toda a informação do comboio. Estes sistemas estão interligados por cablagem convencional e por sistemas de transmissão de dados (“buses”). A TCU é constituída por cartas de memórias, unidades de processamento, de alimentação, conversores analógicos/digitais e vice-versa entre outros sistemas. O controlo dos conversores de potência é digital, feito a partir dos microprocessadores existentes nas cartas dessa unidade, através de um “software” contido nas suas cartas de memória. O “software” foi desenvolvido pelo fabricante numa linguagem de programação denominada SIBAS® CAD. A CCU também é constituída por cartas e é a unidade que monitoriza todos os sistemas e dá a informação à TCU acerca do estado de funcionamento a impor às motoras.



Figura 7 – Torre da CCU e da TCU

A TCU em conjunto com a CCU processa toda a informação que recebe dos vários comandos e sensores que existem no comboio (comandos do maquinista, sensores de tensão, corrente etc.) e envia os sinais para as unidades, A10 Gate Unit, A50 ou A60 que serão modulados e enviados aos semicondutores de forma a comandar o comboio.

3.2.2. Descrição dos módulos A30 e A40.

Como já foi referido os módulos A30 e A40 em conjunto formam o conversor cc-cc reversível de dois (2) quadrantes que controla o circuito intermédio do conversor de tracção. Nestes módulos também se encontra um conversor de travagem reostática que é activado quando a rede já não tem capacidade de absorver energia.

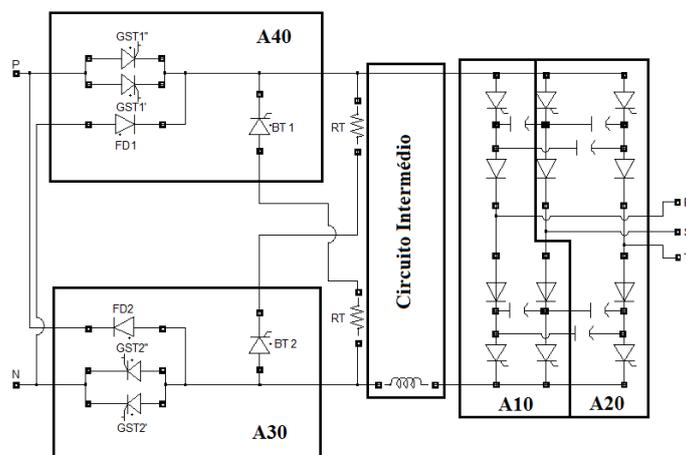
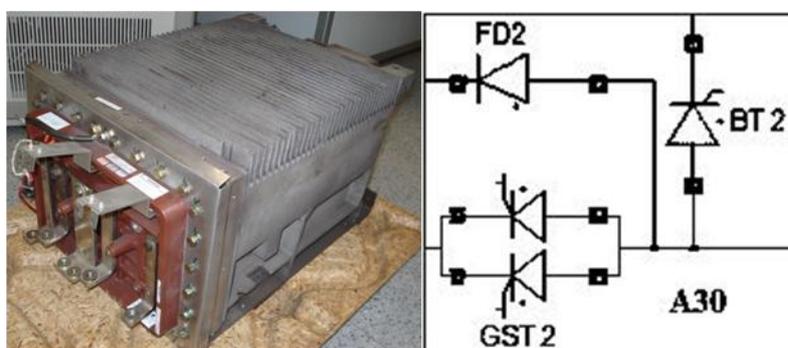


Figura 8 – Conversor de tracção do ML90 simplificado

Os módulos A30 e A40 são idênticos em relação aos seus semicondutores mas apresentam configurações diferentes (são simétricos).

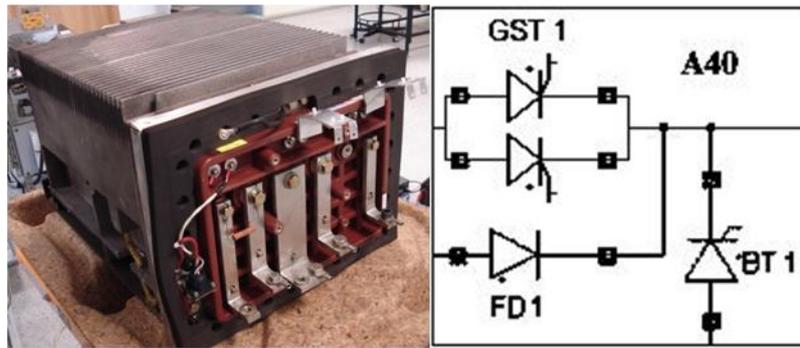
Os componentes principais destes módulos são os GTOs, GST2 (A30), GST1 (A40), o diodo FD, FD2 (A30), FD1 (A40), em que estes dois componentes servem para controlar a corrente no circuito intermédio e o tiristor BT, BT2 (A30), BT1 (A40) que é o componente que faz parte do conversor cc-cc de travagem reostática.



a) Fotografia do módulo

b) Esquema do módulo

Figura 9 – Módulo A30



a) Fotografia do módulo b) Circuito do módulo

Figura 10 – Módulo A40

No conversor foi escolhida a configuração de dois GTOs em paralelo em cada braço deste para que o esforço da transferência de potência fosse dividido pelos dois semicondutores fazendo com que a frequência de comutação total seja o dobro da de cada um deles. Neste caso a frequência de cada GTO é de 125Hz, desfasados de 180°, logo a frequência de comutação total é de 250Hz, o que leva a que a variação do tremor da corrente seja menor para uma dada bobine (o tremor deve ser pequeno para que não ocorra grandes variações do binário electromagnético da máquina assíncrona, de modo a diminuir o desgaste mecânico da máquina).

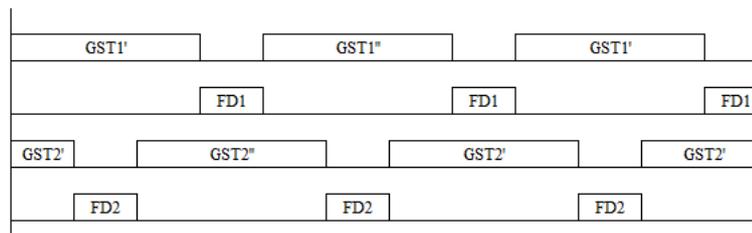


Figura 11 – Exemplos de Intervalos de Condução dos semicondutores dos módulos A30 e A40

Funcionamento dos semicondutores dos módulos A30 e A40.

- Quando um dos GTOs do A30 e um dos GTOs do A40 estão a funcionar em simultâneo, é aplicada uma tensão de 750V (energia flui da rede para a motora) ao circuito intermédio.
- Quando o diodo de um módulo e um dos GTOs do outro estão a funcionar em simultâneo, é aplicada uma tensão de 0V (não existe transito de energia) ao circuito intermédio.
- Quando os diodos de ambos os módulos estão a funcionar, a tensão aplicada é de -750V (a energia flui da motora para a rede).

Quando o conversor impõe travagem regenerativa (travagem da carruagem), funciona como gerador, e envia a energia para a rede, mas se a energia injectada na rede é demasiado elevada, a energia remanescente é dissipada pela resistência de travagem R_T através do chopper de travagem reostática do qual o tiristor BT faz parte.

3.2.3. Unidades de conexão dos impulsos actuadores A50 e A60.

As unidades de conexão dos impulsos actuadores A50 e A60 (Figura 12) são idênticas e dão forma aos avisos de excitação enviados pela TCU para os tiristores convencionais, para que estes estejam correctamente ligados, de acordo com a sua especificação:

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



Figura 12 – Unidade de conexão de impulsos actuadores

Estas unidades são constituídas por 4 circuitos idênticos ao circuito representado na Figura 13. Cada um destes circuitos vai fornecer os sinais de disparo de um tiristor.

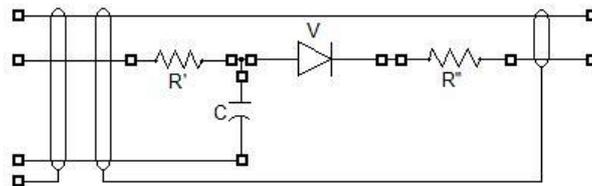


Figura 13 – Circuito de conexão de impulsos

A unidade A50 liga os três tiristores do A10 (módulo pertencente ao ondulador de corrente e diferente do modulo A10 Gate Unit) e o tiristor BT2 do A30, e a unidade A60 liga os três tiristores do A20 (modulo também pertencente ao ondulador de corrente) e o tiristor BT1 do A40, mas como as unidades são idênticas podem ser trocadas sem risco de avaria.

4. Circuito de disparo do GTO (Gate Unit).

Neste capítulo será apresentado um possível esquema do circuito de disparo do GTO uma vez que não foi possível obter junto do fornecedor ou do fabricante nenhum tipo de informação relativa ao circuito em causa.

4.1. Simplificações para dimensionar os elementos do circuito de disparo do GTO.

Como podemos observar na Figura 14, foram cumpridas as exigências que são impostas ao circuito de modo a que sejam efectuadas as comutações corte-condução, e condução-corte e foram cumpridas todas as restrições topológicas no circuito.

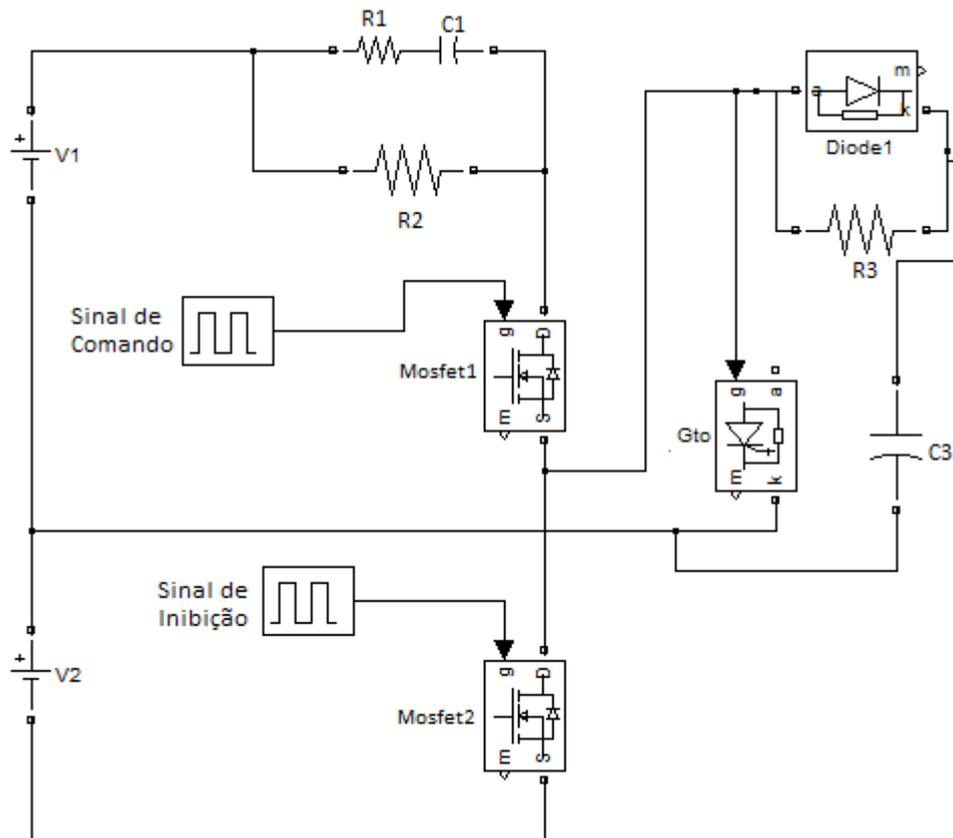


Figura 14 – Circuito de disparo do GTO

Na montagem de maneira a simplificar os cálculos que serão efectuados considerou-se que os semicondutores são ideais.

4.2. Descrição do funcionamento do circuito.

Para excitar a porta de um GTO é necessário a injeção de impulsos de corrente de elevada amplitude e tempos de comutação curtos, deste modo usou-se transístores de efeito de campo da porta isolada (Mosfet).

O Mosfet 1 (Q1) irá comportar-se como um interruptor controlado por tensão, uma vez que no início do disparo a sua tensão dreno source é maior, de modo a fornecer o valor inicial da corrente de porta, para depois diminuir para um valor que forneça o valor de corrente de

porta mínima de forma a manter a condução. A resistência R1 e o condensador C1 contribuem para fornecer o valor inicial da corrente de disparo.

A resistência R2 serve para limitar a potência dissipada no mosfet. O circuito RC impõe os tempos mínimos de condução e de corte.

O mosfet 2 (Q2) fornece o impulso negativo do corrente necessário para a passagem ao corte.

O díodo díodo1 e o circuito RC representam modelos de condução da Gate do GTO e são usados para impor a tensão na porta e os tempos mínimos de condução e de corte do GTO.

4.3. Dimensionamento do circuito de disparo do GTO

No circuito em estudo de modo a simplificar os cálculos ignorou-se o díodo parasita dos mosfets e considerou-se que a junção porta cátodo do GTO é equivalente a um díodo de modo a simplificar os cálculos.

Admitindo que os mosfets Q1 e Q2 são comutados de modo complementar a uma frequência fixa $f_{PWM} = 1/T$ e o factor de ciclo $\delta = t_{onQ1}/T$.

Considerando que Q1 conduz $0 < t < t_{on}$, então GTO está polarizado directamente (GTO em condução).

Na Figura 15 está esquematizado o circuito de disparo quando o Mosfet Q1 entra em condução

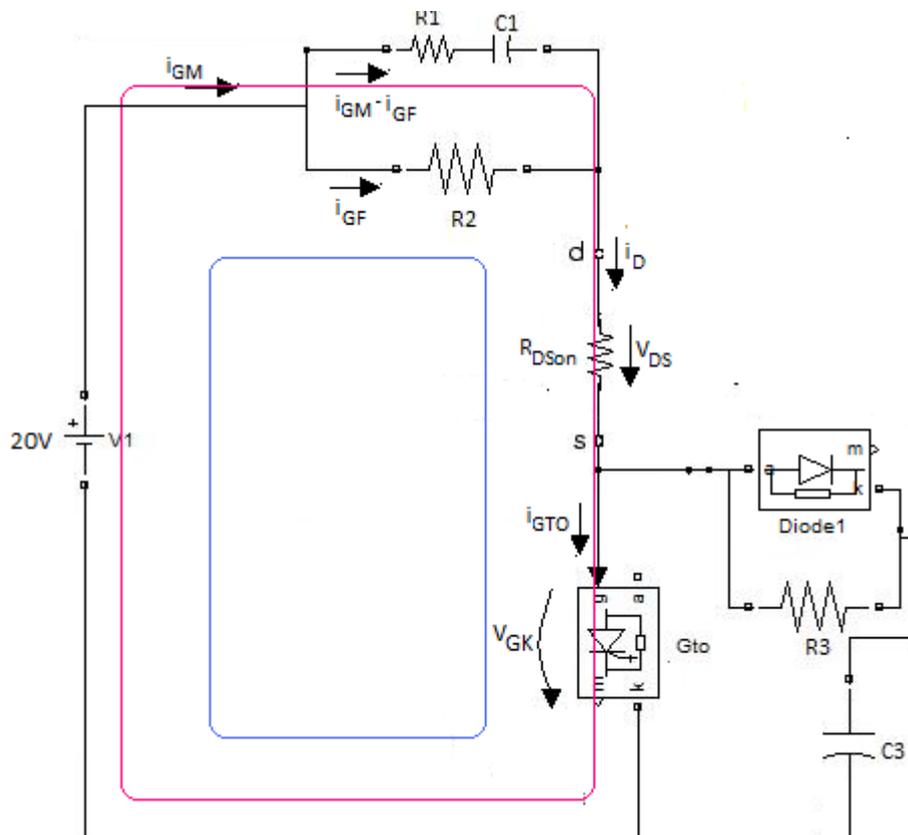


Figura 15 – Circuito de disparo com o Mosfet Q1 ON

No instante em que Q1 entra em condução, o condensador está descarregado funcionando como um curto-circuito, então a corrente positiva da porta é determinada pelo paralelo de R1 com R2. No entanto no estado permanente apenas R2 determina a corrente de porta i_G .

Observando a malha a azul da Figura 15 verifica-se que, para o regime permanente a resistência R2 é:

$$-V_{cc} + R_2 \cdot I_{GF} + R_{DSon} \cdot I_{GF} + V_{GK} = 0 \quad (1)$$

$$\Rightarrow R_2 = \frac{V_{cc} - R_{DSon} \cdot I_{GF} - V_{GK}}{I_{GF}} \quad (2)$$

Observando a malha a vermelho da Figura 15 verifica-se que, a resistência R1 é:

$$-V_{cc} + R_1(I_{GM} - I_{GF}) + R_{DSon}(I_{GM} - I_{GF}) + V_{GK} = 0 \quad (3)$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{V_{cc} - R_{DSon}(I_{GM} - I_{GF}) - V_{GK}}{I_{GM} - I_{GF}} \quad (4)$$

Como $I_{GF} = 3,5A$ e $I_{GM} = 25A$ (Valores fornecidos pelo fabricante), e considerando que $R_{DSon} = 0,1\Omega$ nos Mosfets. Deste modo:

$$R_2 = 5,19\Omega \quad \text{e} \quad R_1 = 0,76\Omega \quad (5)$$

Como o dimensionamento do condensador é feito considerando que toda a energia contida nele deve dissipar-se na resistência R_1 durante o tempo mínimo em condução ($t_{gt} = 10\mu s$, valor fornecido pelo fornecedor). Deste modo:

$$3 \cdot R_1 \cdot C_1 \approx t_{onmin} \quad (6)$$

$$\Rightarrow C_1 = 4\mu F \quad (7)$$

Na Figura 16 está esquematizado o circuito de disparo quando o Mosfet Q2 entra em condução

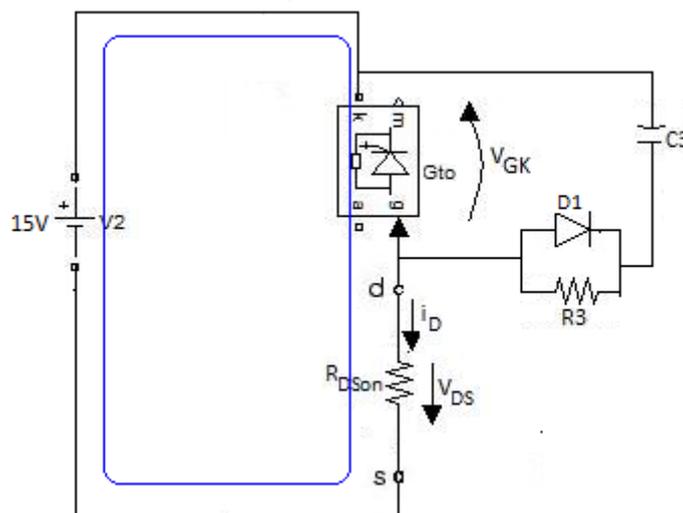


Figura 16 – Circuito de disparo com o Mosfet Q2 ON

Observando a malha a azul da Figura 16 verifica-se que, para o regime permanente a tensão V_{GK} é:

$$\begin{aligned} -V_2 - V_{GK} + R_{D_{Son}} \cdot I_{GF} &= 0 \\ \Rightarrow V_{GK} &\approx 15V \end{aligned} \quad (8)$$

Na Figura 17 está esquematizado o circuito que impõe tempos mínimos de condução e de corte ao circuito de disparo.

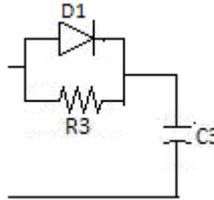


Figura 17 – Circuito que impõe tempos mínimos de condução e corte.

Na passagem a condução o diodo D1 está on, deste modo:

$$t_d \rightarrow R_d \times C_3 \quad (9)$$

Como $t_d = 3\mu s$ (valor fornecido pelo fabricante) e considerando que $R_d = 0,1\Omega$, então o valor do condensador C_3 é:

$$C_3 \approx 3\mu F \quad (10)$$

Na passagem ao corte o diodo D1 está off, deste modo:

$$t_s \rightarrow R_3 \times C_3 \quad (11)$$

Como $t_s = 27\mu s$ (valor fornecido pelo fabricante), o valor da resistencia R_3 é:

$$R_3 \approx 0,9\Omega$$

5.2.2. Díodo em condução, GTO e Tiristor ao corte.

O conversor do tipo Redutor-Elevador, no intervalo de tempo $\delta T \leq t \leq (1 - \theta)T$ tem o díodo a conduzir e o GTO e o tiristor estão ao corte

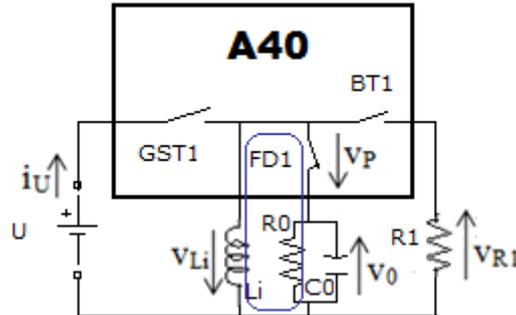


Figura 20 – Circuito Redutor-Elevador com díodo em condução e os outros semicondutores ao corte

Observado a malha a azul da Figura 20 verifica-se que para o regime permanente e não lacunar, a tensão na bobine L_i é:

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

E como a tensão aos terminais da carga é V_{0DC} , porque $V_0 \ll V_0$, então:

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

5.2.3. Díodo e Tiristor em condução e GTO ao corte

O conversor do tipo Redutor-Elevador, no intervalo de tempo $(1 - \theta)T \leq t \leq T$, tem o GTO ao corte e o díodo e o tiristor convencional à condução.

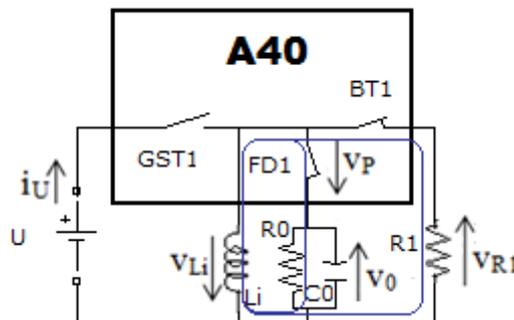


Figura 21 – Circuito Redutor-Elevador com díodo e tiristor em condução e GTO ao corte

Observando as malhas a azul da Figura 21 verifica-se que, para o regime permanente, a tensão na bobine é:

$$v_{Li} = -v_0 = -V_0 \quad (4)$$

5.2.4. Relações de transferência do conversor do tipo Redutor-Elevador.

Nesta montagem vai-se determinar o valor de indução mínimo da bobine L_i e o valor mínimo do condensador C_0 para um determinado tremor máximo. Nesta montagem optei por escolher o pior caso ($\theta = 1 - \delta$) de forma a simplificar o conversor, em que o tiristor convencional será disparado ao mesmo tempo que o díodo entra à condução. Logo podemos simplificar o conversor como é demonstrado na Figura 22 para se efectuar os cálculos necessários da forma mais simples.

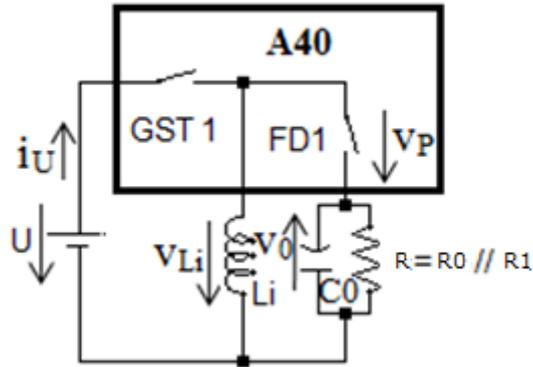


Figura 22 – Circuito Redutor-Elevador para o A40 simplificado

Utilizando as expressões (1), (3) e (4), 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 calcular o valor médio da bobine L_i é:

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

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

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

Como o conversor está em regime permanente, e em regime permanente o valor médio da tensão aos terminais da bobine é nulo ($\bar{v}_{Li} = 0$). Então:

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

Logo,

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

Da equação (9), podemos verificar que δ pode variar no intervalo de $]0,1[$, pois a tensão V_0 é positiva (dado ao sentido da sua definição) com polaridade contrária a U . O valor médio de V_0 pode teoricamente variar no intervalo $]0, \infty[$, então:

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

O valor médio da corrente I_0 na carga (em regime permanente) pode ser determinado a partir de V_{0DC} , pois

$$V_{R_{av}} = V_0 \quad (11)$$

Então,

$$I_0 = \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta}{1-\delta} \quad (12)$$

Admitindo perdas nulas nos elementos do circuito (GST1, FD1, BT1, Li, C0), o rendimento é unitário, e a potência debitada pela fonte U (P_i) é igual à potência dissipada na carga P_o ($P_i = P_o$). Então:

$$U \cdot I_{U_{av}} = V_0 \cdot I_0 = U \cdot \frac{\delta}{1-\delta} \cdot I_0 \quad (13)$$

Desta equação pode-se concluir que o conversor redutor elevador de tensão é um elevador redutor de corrente, isto é, quando a tensão de saída é mais elevada do que a de entrada, a corrente de entrada i_i é mais elevada do que a de saída ($\delta > 0,5$), e vice-versa para $\delta < 0,5$:

$$\frac{I_{U_{av}}}{I_0} = \frac{\delta}{1-\delta} \quad (14)$$

A potência posta na carga é $P_i = P_o$, então:

$$P_i = U \cdot I_{U_{av}} = U \cdot \delta \cdot I_{Li} = \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta^2}{(1-\delta)^2} \quad (15)$$

5.2.5. Determinação da bobine Li em função da variação máxima de corrente Δi_{Li} .

Supondo agora, uma variável γ definida por:

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \rightarrow \text{GST1 corte } \wedge \text{ FD1 condução } (\delta t < t < T) \\ 0 & \rightarrow \text{GST1 condução } \wedge \text{ FD1 corte } (0 < t < \delta t) \end{cases} \quad (16)$$

A equação diferencial que descreve o comportamento da corrente $i_{Li}(t)$ ao longo do tempo, supondo V_0 constante, pode ser escrita:

$$\frac{di_{Li}}{dt} = \frac{(1 - \gamma) \cdot U - \gamma \cdot V_0}{Li} \quad (17)$$

Integrando ambos os membros desta equação, como γ é constante em cada sub-intervalo, e conjugando-os, obtém-se a solução:

$$i_{Li} = \frac{(1 - \gamma) \cdot U}{Li} \cdot t - \frac{V_0}{Li} \cdot \gamma(t - \delta t) + i_{Li}(\gamma \cdot t_{on}) \quad (18)$$

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

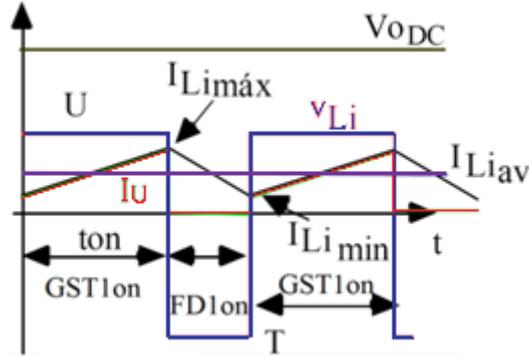


Figura 23 – Formas de onda no conversor Redutor-Elevador

Podemos observar na Figura 23 que, a corrente i_{Li} em $t = t_{on}$, $i_{Li}(t_{on}) = I_{Limáx}$ sofreu um acréscimo Δi_{Li} em relação à corrente $i_{Li}(\gamma t_{on}) = I_{Limin}$ e que de (18) com $\gamma = 0$, se tem:

$$\Delta i_{Li} = \frac{1}{L} \left[\int_0^{\delta T} U dt \right] = -\frac{1}{L} \left[\int_{\delta T}^T -V_0 dt \right] = \frac{U}{L_i} \cdot \delta \cdot T = \frac{V_0}{L_i} (1 - \delta) T \quad (19)$$

O valor de I_{Liav} pode ser obtido, aplicando a lei dos nós às correntes (em valores médios) do nó do ânodo de FD1, sabendo que o valor médio da corrente I_{coav} no condensador é nulo, pois V_0 admite-se constante:

$$I_{Liav} = I_{Uav} + I_0 = I_0 \cdot \frac{\delta}{1 - \delta} + I_0 = \frac{I_0}{1 - \delta} = \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta}{(1 - \delta)^2} \quad (20)$$

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

$$i_{Li}(t) = \frac{(1 - \gamma) \cdot U}{Li} \cdot t - \frac{\gamma \cdot U \cdot \delta}{Li \cdot (1 - \delta)} \cdot (t - \delta T) + \frac{U}{R} \cdot \frac{\delta}{(1 - \delta)^2} + (2\gamma - 1) \frac{U}{2Li} \cdot \delta \cdot T \quad (21)$$

As equações (5) e (21) representam-se na Figura 23. Na realidade, como a tensão v_0 não será rigorosamente constante, a corrente $i_{Li}(t)$ não tem um andamento perfeitamente linear.

De (16) pode-se então calcular o coeficiente de auto-indução da bobine Li que garante uma variação (ou tremor) da corrente igual a um certo Δi_{Li} :

$$Li = \frac{U}{\Delta i_{Li}} \delta T = \frac{V_0}{\Delta i_{Li}} (1 - \delta) T = \frac{U}{\Delta i_{Li} f_{PWM}} \frac{1}{1 + U/V_0} \quad (22)$$

5.2.6. Determinação do condensador C_0 em função da variação

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

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = -C_0 \frac{d}{dt} V_0 \quad (23)$$

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

Então:

$$C_0 = \frac{\delta T}{R} \left| \frac{V_0}{\Delta V_0} \right| \quad (24)$$

Usando a relação de transferência do conversor do tipo redutor-elevador da equação (9) temos:

$$C_0 = \frac{\delta^2 T}{(1 - \delta) R \Delta V_0} U \quad (25)$$

5.3. Dimensionamento real do conversor cc-cc do tipo Redutor-Elevador.

O esquema da montagem do conversor em estudo pode ser observado na Figura 24

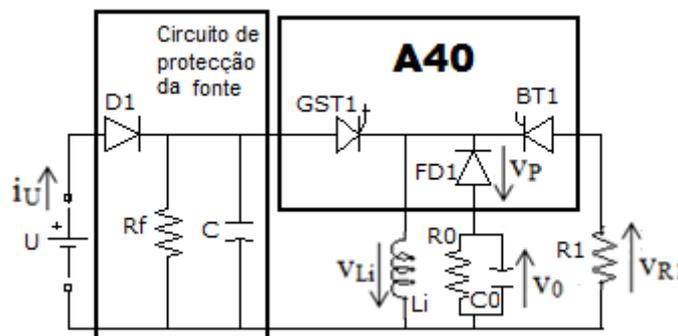


Figura 24 – Esquema do conversor real

No dimensionamento real do conversor foi colocado um circuito de protecção da fonte, como o descrito na Figura 24.

As condições de funcionamento do conversor:

- Alimentação do conversor:
 Fonte de alimentação: DELTA ELEKTRONIKA SM7020-D
 Entrada: 220V/8
 Saída: Variável de (0V a 35V) /20 e (35V a 70V) /10
- Frequência de trabalho:
 Cada tiristor GTO está a funcionar a 125Hz, desfasados entre si de 180°, logo a frequência total é de 250Hz.

5.3.1. Cálculo do factor de ciclo do tiristor GTO.

A corrente máxima debitada pela fonte disponível é de 10A. Como temos a presença de um condensador de linha C (presente na motora do comboio 13A1:C), este permite que a tensão se mantenha, quando a corrente pedida à fonte é maior que 10A, fornecendo a corrente adicional. Deste modo consegue-se extrair a potência máxima da fonte $I_{U_{av}} = 10A$ e $U=70V$.

As resistências (disponíveis no laboratório), que foram seleccionadas são um conjunto de 330Ω ($180\Omega+150\Omega$) e de 30Ω , R_0 e R_1 respectivamente de forma a obter as menores correntes possíveis, podendo assim conseguir tensões mais elevadas na carga com a mesma potência aplicada, fonte de 700W.

Usando os dados anteriores e as equações (12) e (13) podemos determinar o factor de ciclo do GTO (δ) que resulta:

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

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

$$V_0 = \frac{\delta}{1-\delta} \cdot U = \frac{0,66}{1-0,66} \cdot 70 \approx 136V$$

O factor de ciclo do tiristor convencional vai ser escolhido de maneira a que o período que resta do GTO a conduzir, seja dividido pelos restantes semicondutores, ou seja, $\theta = (1-\delta)/2 = 0,17$. Logo o díodo FD1 vai conduzir no intervalo $\delta T \leq t \leq T$, e o tiristor convencional BT1 vai conduzir no intervalo de $(1-\theta)T \leq t \leq T$. Neste caso os valores da corrente média nas cargas (uma vez que a tensão aplicada a elas vai ser sempre V_0) serão:

$$I_{R0_{av}} = \frac{V_0}{R_0} = \frac{136}{330} \approx 0,41A$$

$$I_{R1_{av}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{R1}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_{(1-\theta)T}^T \frac{V_0}{R_0//R_1} \cdot dt = \theta \cdot \frac{V_0}{R_0//R_1} = 0,17 \times \frac{136}{\frac{330 \times 30}{330 + 30}} \approx 0,84A$$

Aplicando a lei das malhas ao circuito da Figura 22, verifica-se que, as tensões máximas a suportar pelo GTO e pelo diódo correspondem ao valor máximo da soma da tensão de entrada com a tensão de saída:

$$V_{\text{DRM}} = U + V_0 = 70 + 136 = 206\text{V}$$

$$V_{\text{RRM}} = U + V_0 = 206\text{V}$$

Da mesma forma as tensões máximas a suportar pelo tiristor convencional são:

$$V_{\text{DRM}} = V_0 = 136\text{V}$$

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

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

5.3.2. Cálculo da indutância L_i

Para determinar L_i , é necessário efectuar o cálculo da corrente média da bobine. Para a calcular utiliza-se a equação (20):

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

Considerando que o valor de variação da corrente da bobine é de 50% do seu valor médio. Então usando a equação (22) podemos calcular o valor da indutância:

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

Como não existe uma bobine de 25mH no laboratório do Metropolitano de Lisboa, a bobine escolhida para o circuito apresenta uma indutância de 26,5mH, sendo esta uma melhor alternativa, uma vez que garante uma variação de corrente mais pequena do que permitido.

5.3.3. Cálculo do condensador C_0

Considerando uma variação de 5% da tensão V_0 e usando a equação (25), tem-se:

$$C_0 = \frac{\delta^2 T}{(1-\delta) \cdot R} \cdot \frac{U}{\Delta V_0} = \frac{0,66^2 \times (1/250)}{(1-0,66) \times 27,5} \times \frac{70}{0,05 \times 136} = 0,0019 = 1,9\text{mF}$$

Uma vez que no laboratório do Metropolitano de Lisboa apenas temos disponíveis condensadores de 4,7mF e 6mF, poderia ter usado o de 4,7mF uma vez que é o valor mais próximo de 1,9mF sendo este sobredimensionamento, uma boa alternativa pois garante uma variação para a tensão de saída mais pequena. Mas utilizou-se uma ligação de condensadores de 6mF apresentados na Figura 25 (paralelo da serie de 2 condensadores) de forma a garantir que um aumento da tensão que percorre o circuito não irá danificar o material.



Figura 25 – Ligação dos condensadores

5.4. Dimensionamento experimental do conversor do tipo cc-cc Redutor-Elevador

No ensaio da montagem efectuou-se variações do factor de ciclo dos GTOs e do tiristor convencional, de modo a originar as tensões mais elevadas possíveis aos terminais dos semicondutores, de modo a confirmar os factores de ciclo anteriormente calculados, logo tem-se:

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

Existe uma diferença entre os valores calculados e os experimentais, e esta deve-se à algumas simplificações efectuadas no circuito:

- Considerou-se que todos os elementos da montagem são ideais.
- Não se teve em consideração os circuitos de protecção da fonte e dos semicondutores.
- Equações calculadas sobre o pressuposto que o tiristor convencional funcionava no intervalo de $\delta T \leq t \leq T$.

5.4.1. Cálculo da tensão de saída e das tensões máximas aplicadas aos semicondutores

Usando a equação (10) podemos calcular a ordem de grandeza da tensão V_0 :

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

Com base no valor da tensão de saída podemos calcular a corrente média nas cargas (uma vez que a tensão aplicada a elas vai ser sempre V_0):

$$I_{R0_{av}} = \frac{V_0}{R_0} = \frac{396,7}{330} \approx 1,2A$$

$$I_{R1_{av}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{R1}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_{(1-\theta)T}^T \frac{V_0}{R_0//R_1} \cdot dt = \theta \cdot \frac{V_0}{R_0//R_1} = 0,10 \times \frac{396,7}{\frac{330 \times 30}{330 + 30}} \approx 1,44A$$

Com base nos valores calculados podemos verificar que a tensão máxima aplicada a cada semiconductor é:

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

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

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

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

5.4.2. Indutância L_i

Com a alteração dos factores de ciclo dos semicondutores, é necessário verificar se o valor da indutância anteriormente calculado ainda garante as especificações. Logo temos que calcular a corrente média da bobine para o novo factor de ciclo para depois determinar o novo valor da bobine. Usando a equação (20) tem-se:

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

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

Como a bobine anteriormente escolhida, 26,5mH, é maior que 5mH, não existe qualquer problema em manter a escolha anterior (26,5mH), uma vez que este valor garante uma variação de corrente mais pequena.

5.4.3. Verificação do valor do condensador C_0

Através da equação (25) 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 os condensadores que estão a ser usados são de 6mF, não é necessário alterar, uma vez que o sobredimensionamento deste faz com que o valor do tremor da tensão seja menor que os 5% estipulados.

6. Circuitos de protecção.

Como já foi referido, a fonte de tensão e os semicondutores dos módulos de potência do A30 e A40 encontram-se protegidos.

6.1. Fonte de tensão

Na Figura 26 está representado o circuito de protecção da fonte U , formado pelo díodo $D1$ e pela resistência R_f , que protegem a fonte das correntes de retorno que à possam atravessar e danificar. Como a carga associada a fonte é indutiva, podem surgir correntes de retorno, ou seja, as correntes são enviadas da carga para a fonte. Deste modo a resistência R_f servirá como malha de descarga dessas correntes e o díodo $D1$ irá impedir que a corrente de retorno siga em direcção à fonte. O condensador C presente na Figura, deve-se, ao facto de se querer aproximar o funcionamento da montagem redutora-elevadora, ao funcionamento dos módulos A30 e A40 no comboio, representando por isso o condensador 13A1.C (Anexo I).

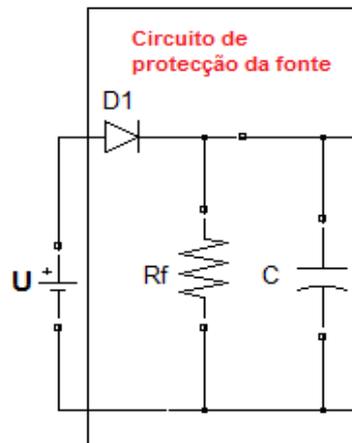


Figura 26 – Circuito de Protecção da fonte.

De modo a não influenciar o circuito quando o GTO está a conduzir, a resistência $R_f = 660\Omega$, para que a corrente que à percorre não seja muito grande.

O condensador C vai permitir manter a tensão aplicada ao circuito constante. O condensador C deveria ter um valor igual ao do 13A1.C, que é de 24mF , mas pelo facto de não existir condensadores desse valor no laboratório do Metropolitano de Lisboa, optou-se pelo valor mais próximo existente, que foi o de 47mF , sendo este valor, uma melhor alternativa uma vez que garante uma variação de tensão mais pequena.

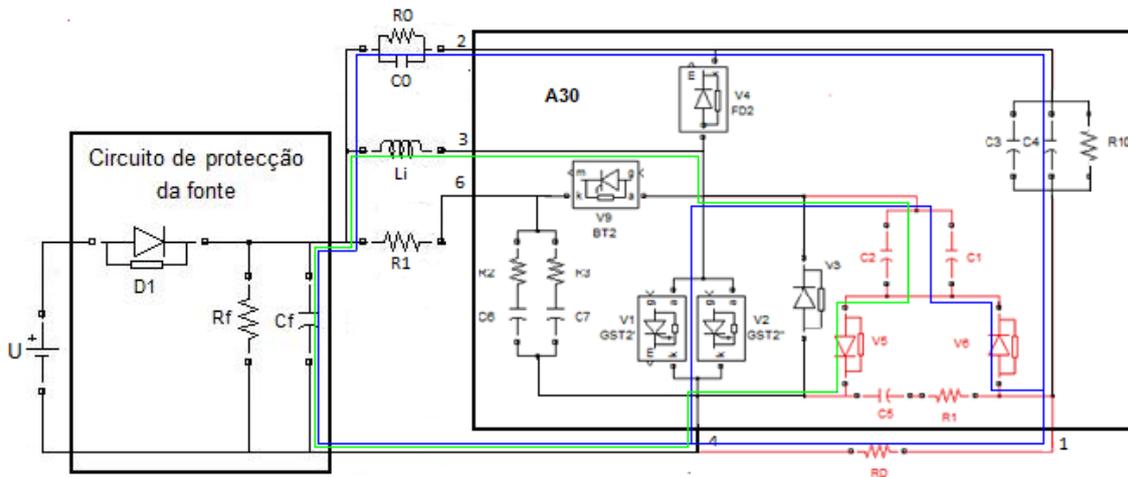


Figura 28 – Circuito de protecção dos GTOs e seu funcionamento

6.2.2. Circuito de protecção do Díodo

O circuito de protecção do díodo está representado na Figura 29 e é constituído pelos condensadores C3 e C4 e pela resistência R10 (circuito a vermelho). O díodo na comutação corte/condução, os condensadores são carregados com uma tensão $V_0 + U$ (malha azul da figura 27), evitando a disrupção do díodo que pode ser provocada pelas elevações de corrente demasiado rápidas. Na comutação condução/corte a resistência tem a função de descarregar a tensão acumulada nos condensadores (malha a verde).

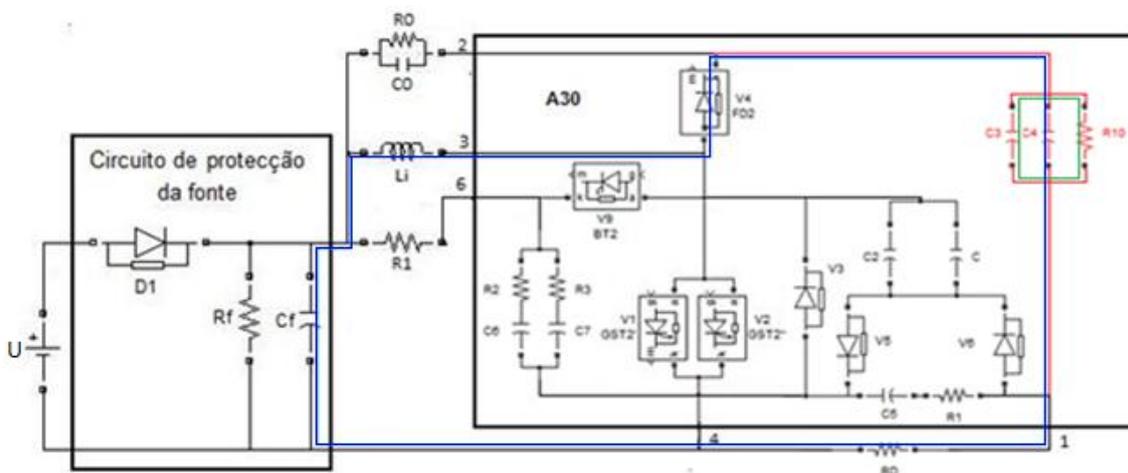


Figura 29 – Circuito de protecção do díodo e seu funcionamento.

6.2.3. Circuito de protecção do Tiristor

O circuito de protecção do tiristor está representado na Figura 30 e é constituído pelo banco condensadores C6 e C7 em série, como o paralelo de resistências R2 e R3 (circuito a vermelho) que o protegem contra os picos de tensão com origem nas correntes indutivas dos motores e do ondulator de tensão. Na comutação corte/condução os condensadores são carregados através da corrente da bobine que passa quase toda pelo tiristor (malha azul) e são

descarregados na comutação condução/corte do tiristor (malha verde), passando o GTO a condução.

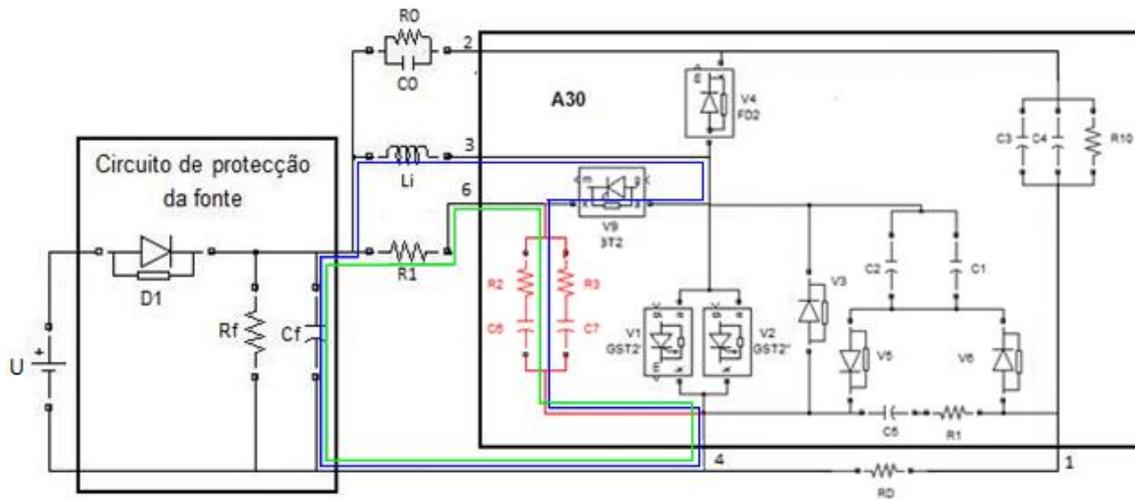


Figura 30 – Circuito de protecção do tiristor e seu funcionamento.

6.3. Módulo A40

O módulo A40 apresenta também circuitos de protecção aos seus semicondutores, pelos mesmos motivos apresentados no módulo A30. Na Figura 31 esta representado os circuitos de protecção do módulo A40 (circuito a vermelho – circuito de protecção do GTO; Circuito a verde – circuito de protecção do díodo; Circuito a azul – circuito de protecção do tiristor) e mais uma vez pode-se observar a semelhança entre os dois módulos, tendo exactamente os mesmos circuitos de protecção. Como o funcionamento dos circuitos de protecção é igual, deste modo não é há necessidade da apresentação do seu estudo.

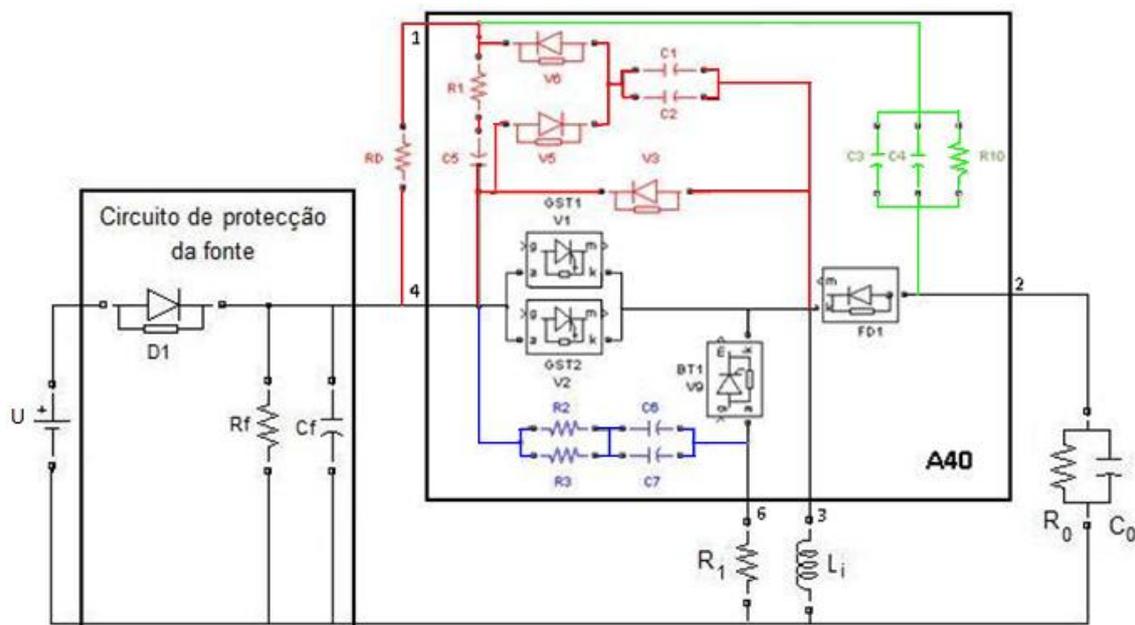


Figura 31 – Montagem cc-cc redutora-elevadora com o módulo A40 e os respectivos circuitos de protecção.

7. Simulação e Testes.

As simulações e os ensaios foram efectuados com o objectivo de obter as formas de onda características do módulo A10 Gate Unit e dos módulos A30 e A40 a funcionar como montagem redutora-elevadora, de modo, à que seja possível testar módulos iguais e verificar por comparação de características se os novos módulos estão possivelmente avariados e qual a sua avaria.

As simulações irão permitir obter com algum grau de segurança o provável comportamento destes módulos, uma vez que as formas de onda obtidas são próximas das obtidas experimentalmente.

Existem diferenças entre as formas de onda obtidas na simulação e nos ensaios tanto no laboratório como no comboio. Estas diferenças registam-se na tensão e na corrente, uma vez que o carácter ideal do modelo matemático " Matlab/Simulink" impõe, por exemplo: na fonte de tensão U, não é possível limitar a potência, situação, que acontece na fonte real.

7.1. Simulação

De forma a perceber o funcionamento dos módulos e os resultados que serão obtidos nos ensaios, foram criados modelos de simulação para testar o módulo A10 Gate Unit e os módulos A30 e A40. Nos modelos criados teve-se em conta o circuito de protecção da Fonte de tensão e os circuitos de protecção dos semicondutores dos módulos A30 e A40.

7.1.1. Simulação do módulo A10 Gate Unit

Como já foi referido serão realizados testes rápidos de modo a estudar o funcionamento do módulo A10 Gate Unit (Figura 32) quando em vazio e testes avançados ao módulo A10 Gate Unit (Figura 33), para estudar o funcionamento quando se encontra ligado ao circuito redutor-elevador (testes que servirão de base para saber as formas de onda semelhantes a situação próxima do real no laboratório e no comboio).

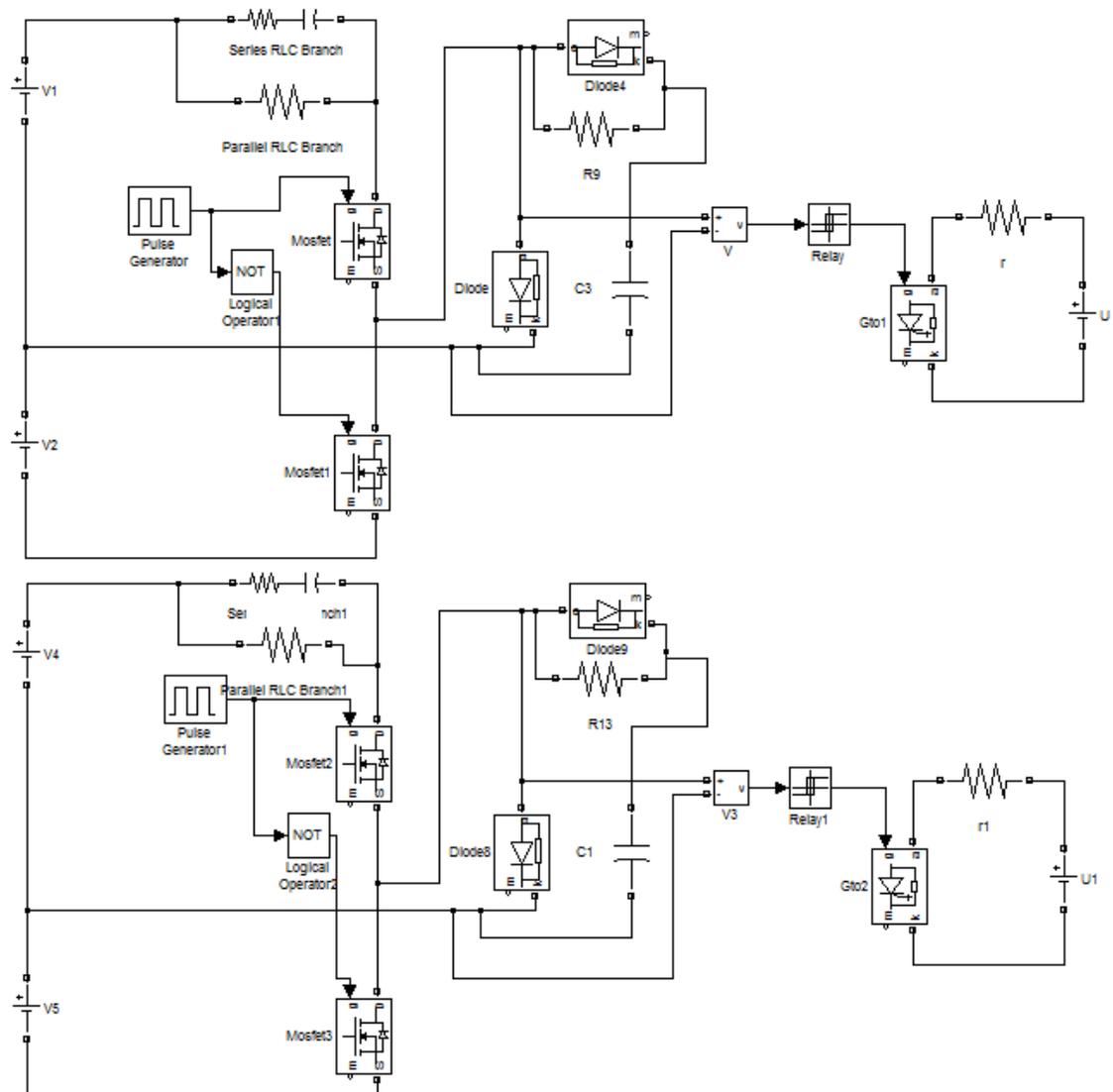


Figura 32 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A10 Gate Unit (Testes rápidos).

No esquema de simulação em “Matlab/Simulink” do módulo A10 Gate Unit dos testes avançados apresentado na Figura 33 falta o circuito cc-cc do tipo redutor-elevador, uma vez que para se efectuar os testes avançados do módulo A10 Gate Unit é necessário este estar ligado, ao módulo A30 ou A40 a funcionar numa montagem redutora-elevadora, no sentido de se obter as formas de onda do circuito de disparo do GTO (Gate Unit) quando em carga.

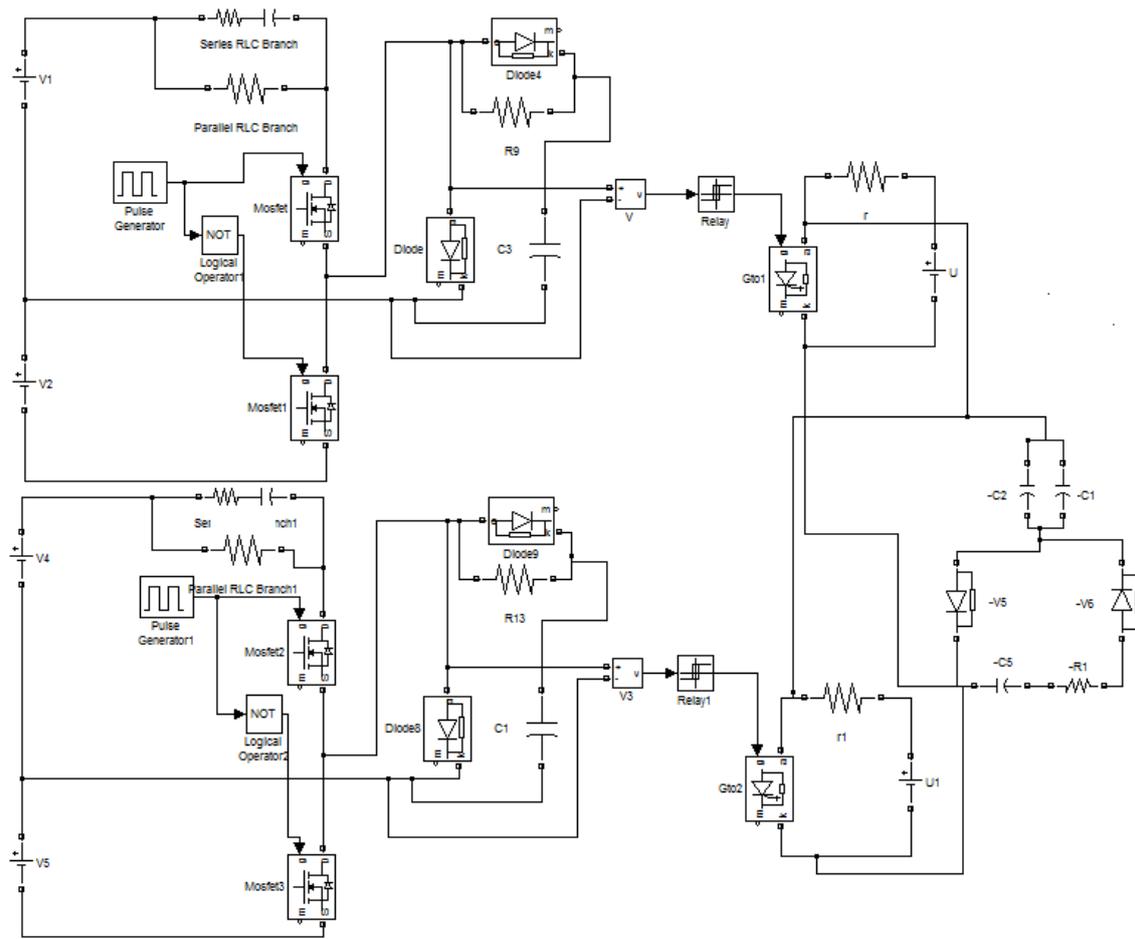


Figura 33 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A10 Gate Unit (Testes Avançados).

7.1.2. Simulações dos módulos A30 e A40.

Como já foi referido serão realizados testes rápidos de modo a estudar o funcionamento dos semicondutores dos módulos A30 e A40 quando apresentam uma carga aos seus terminais e testes avançados aos módulos A30 e A40, para estudar o funcionamento dos módulos quando estes se encontram no circuito do tipo redutor-elevador.

Na Figura 34 e na Figura 35 podemos observar o esquema da simulação dos testes rápidos para o módulo A30 e o A40 e na Figura 36 e na Figura 38 podemos observar o esquema da simulação dos testes avançados do módulo A30 e A40 respectivamente.

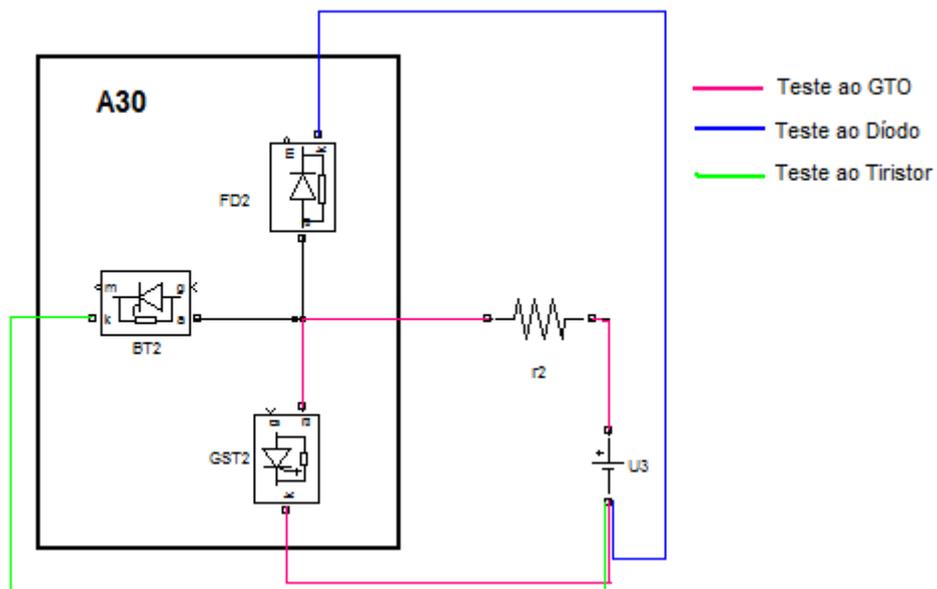


Figura 34 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” para o A30 (Testes Rápidos)

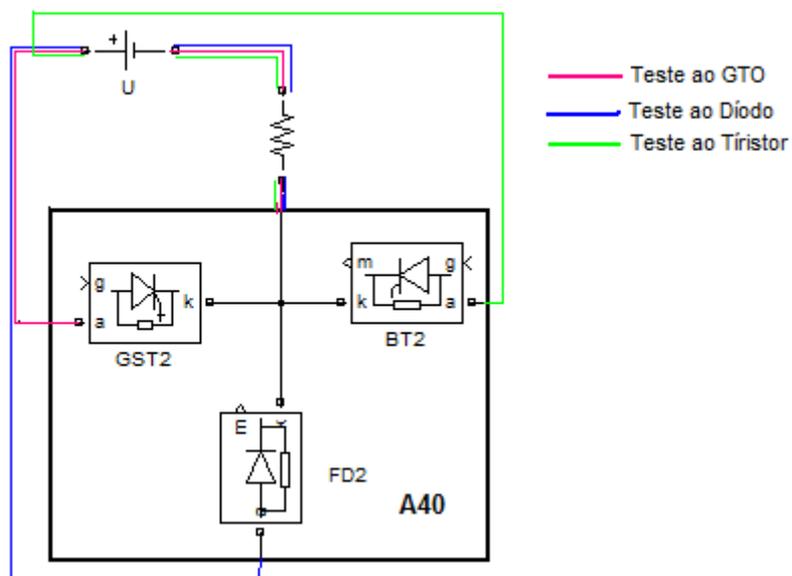


Figura 35 – Esquema de simulação em “Matlab/Simulink” para o A40 (Testes Rápidos).

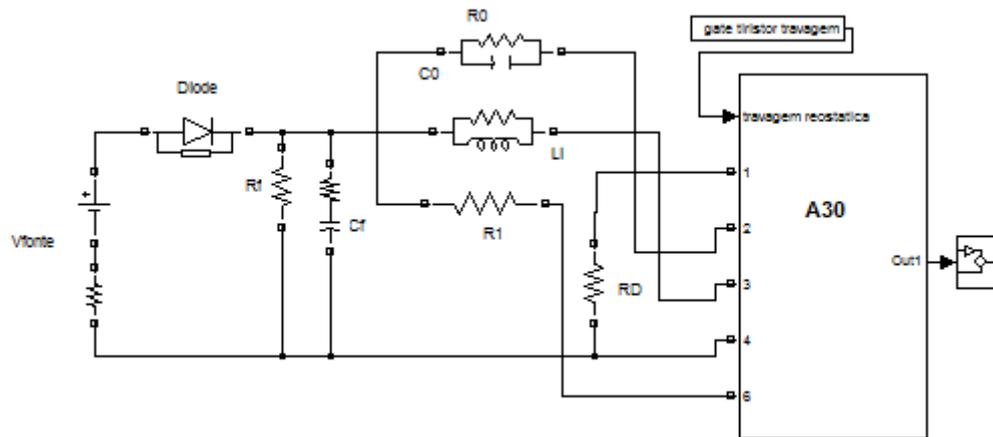


Figura 36 – Esquema da simulação “Matlab/Simulink” para o A30 (Testes Avançados).

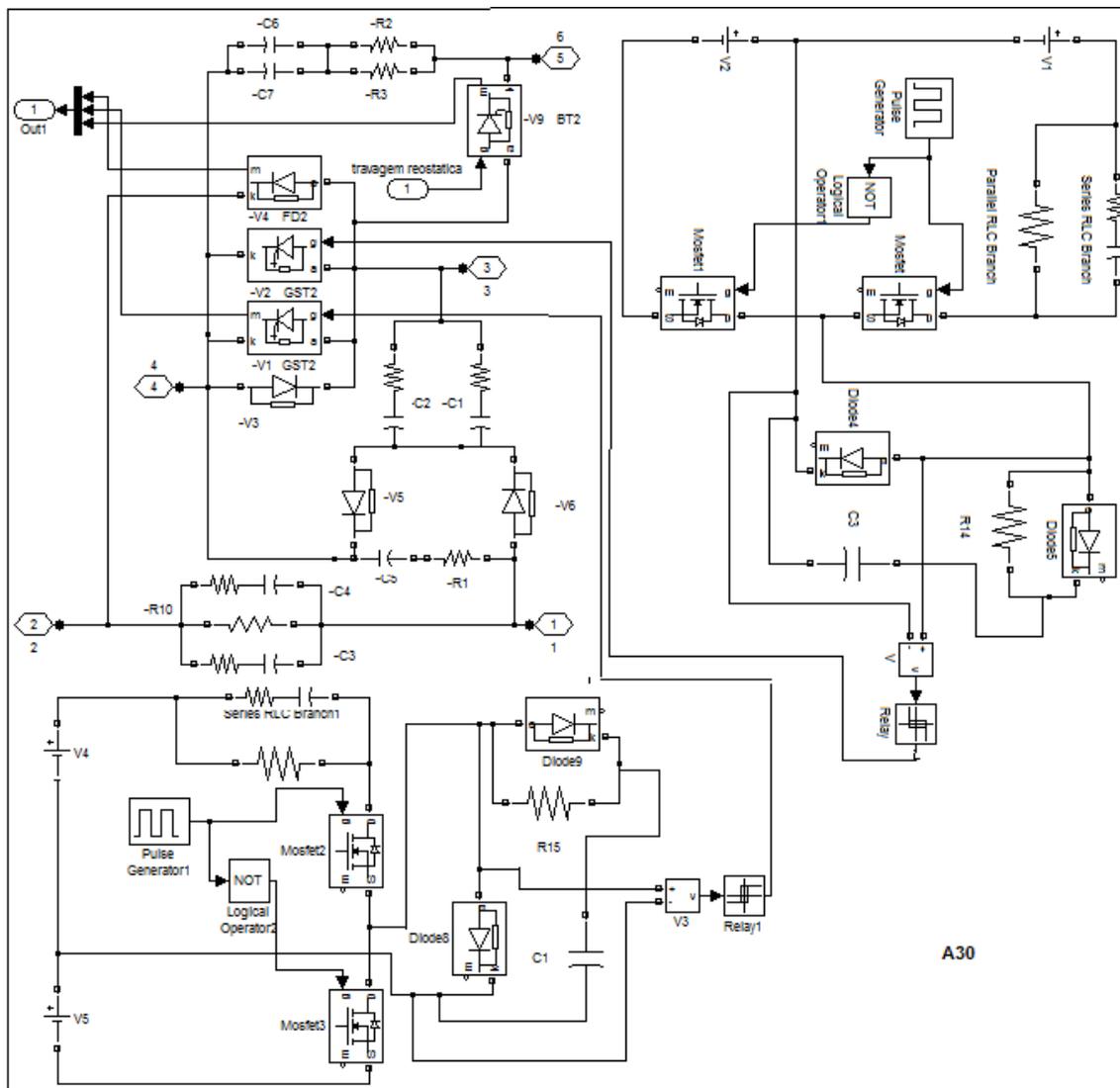


Figura 37 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” do A30 com o A10 Gate Unit.

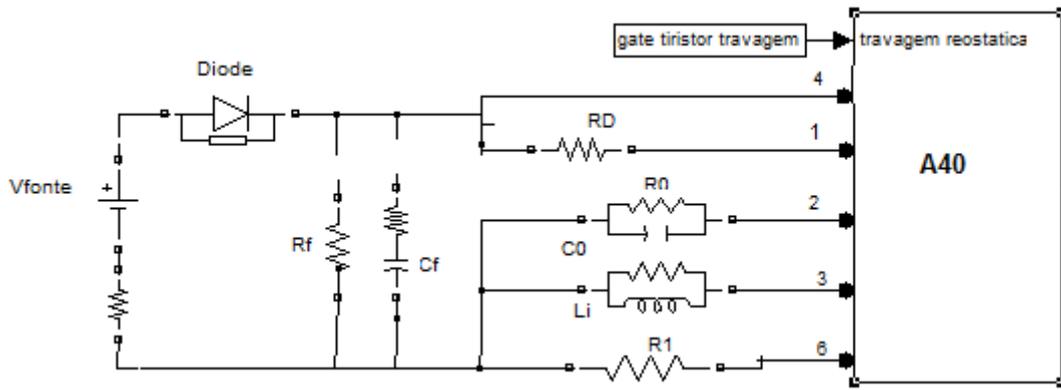


Figura 38 – Esquema da simulação em “Matlab/Simulink” do módulo A40 (Testes Avançados).

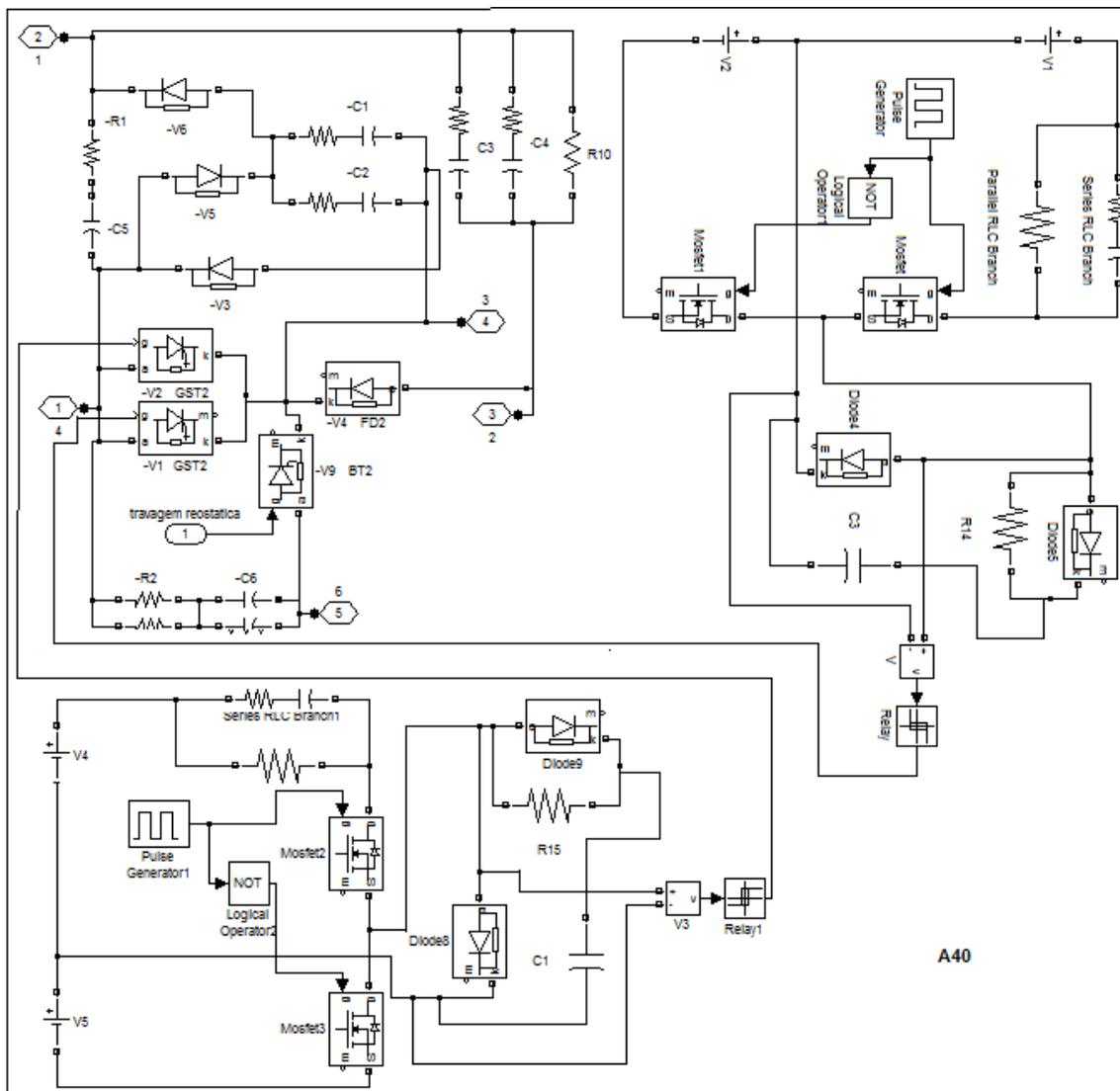


Figura 39 – Esquema da simulação “Matlab/Simulink” do A40 com o A10 Gate Unit.

7.2. Testes efectuados

Foram efectuados testes em laboratório e no comboio uma vez que houve necessidade de confirmar as formas de onda do circuito de disparo do GTO, uma vez que este não tinha um comportamento típico na passagem ao corte e a condução. E como não foi possível termos informação junto ao fabricante, foi necessário testar as gates nas condições reais.

7.2.1. Testes realizados em laboratório

Em laboratório, vai-se simular as condições próximas do real, que acontecem no comboio a nível de alimentação, e sinais impostos pelos vários sistemas e sensores do comboio necessários para se efectuar os testes aos módulos.

Para testar o módulo A10 Gate Unit utilizou-se um programa de testes criado pela Siemens, com o propósito de verificar se os sinais de disparo chegam as gates dos módulos do conversor de tração. Embora este programa fora criado para testar o conversor quando este está inserido no motora, com todos os seus sistemas ligados, foi possível usar o programa com apenas alguns módulos a funcionar, sem que a TCU tenha um sinal de retorno a informar falha ou bloqueamento e avaria de algum módulo, pois este programa permite especificar o tempo de condução dos semicondutores, sem ter que simular todos os sistemas da motora, utilizando a montagem com a tensão e a corrente desejada e possível. O programa de testes está no terminal do banco de ensaios com o nome de “Neumon”

Numa 1ª fase irei usar o programa sem ligar o módulo A30/A40.

Numa 2ª fase irei usar o programa com o módulo A30/A40 com a montagem do circuito do tipo redutor-elevador.

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

Assim algumas ligações a considerar para os testes do módulo A10 Gate Unit e dos módulos A30 e A40 estão descritos na Figura 40.

- O módulo A10 Gate Unit é ligado a TCU através da carta C007 e pelos cabos X1, X2 e X3;
- A unidade A50/A60 está ligada a TCU através da carta C023;
- A unidade A50/A60 está ligada a gate dos tiristores convencionais do modulo A30/A40 através do cabo presente na Figura 40 b);
- Cabo que liga a TCU ao PC do banco de testes presente na Figura 40 c);

As restantes ligações, passos e a execução do programa “Neumon” para efectuar os testes aos módulos encontram-se descritos no manual do utilizador (Anexo V).

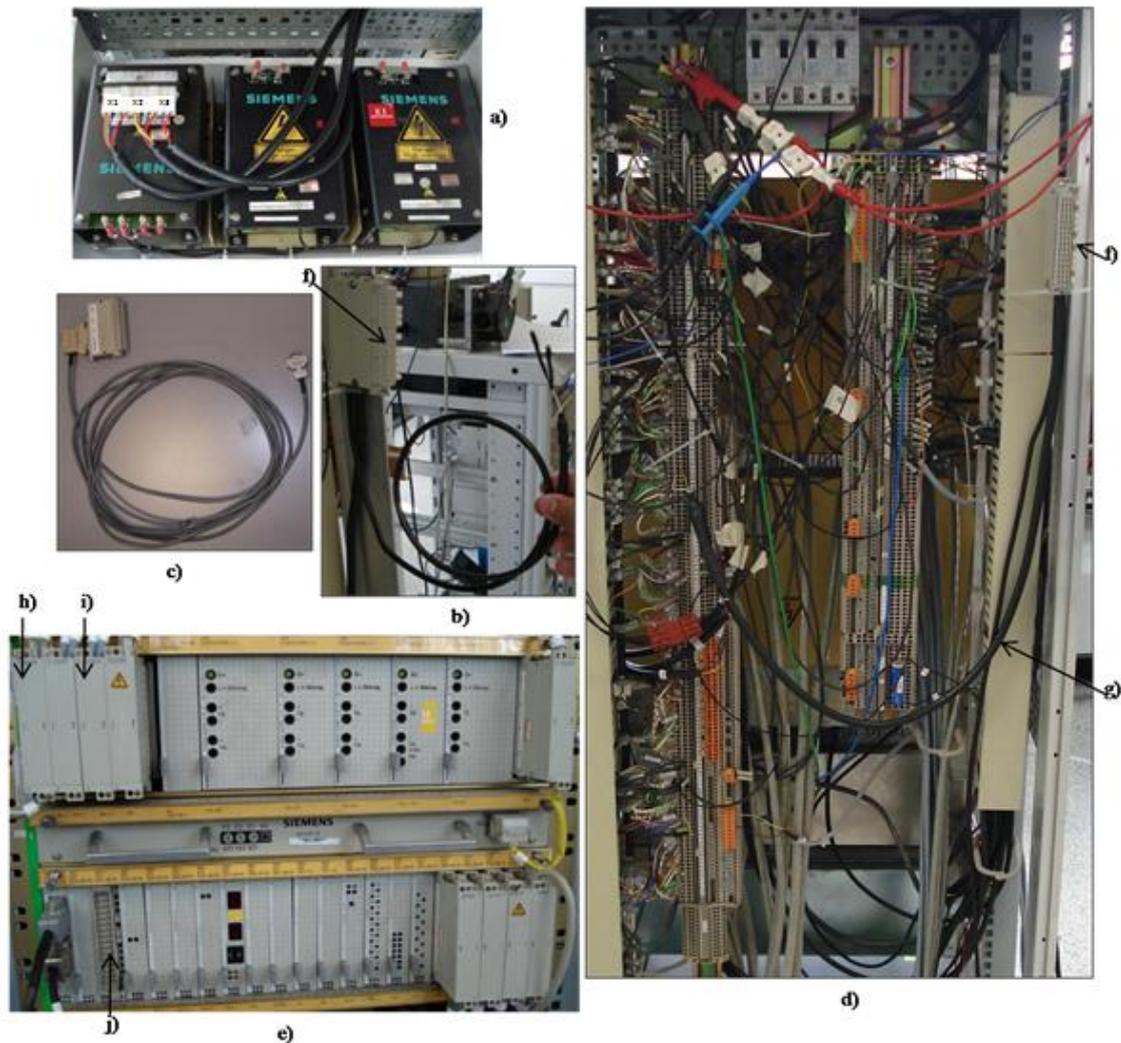


Figura 40 – a) cabos que ligam a TCU ao módulo A10. b) Cabo que liga a unidade A50/A60 aos terminais G,K do tiristor convencional. c) Cabo que liga a TCU ao PC. d) Armário de ligações dos sinais que entram e saem da TCU e da CCU. e) TCU. f) Ficha onde liga a unidade A50/A60. g) Cabo que liga a TCU à unidade A50/A60. h) Ficha que liga à carta C007. i) Ficha da carta C023. j) Carta onde liga a ficha do cabo para ligar o PC.

7.2.2. Testes realizados no Comboio

Foram efectuados testes no comboio uma vez que houve necessidade de confirmar as formas de onda do circuito de disparo do GTO, uma vez que este não tinha um comportamento típico na passagem ao corte e a condução. E como não foi possível termos informação junto ao fabricante, foi necessário testar as gates nas condições reais que estão em bom funcionamento. Os materiais usados no ensaio do comboio:

- Multímetro Testec TT-Si9110 – com a ponta de prova 1:100, 100MHz
- Osciloscópio DL1735E – Yokogawa
- Fonte de alimentação para alimentar o osciloscópio
- 2 Conversores estáticos sine-wave-inverter – KACO GERATECHNIK
- 1 Sonda de ROGOWSKY – Fluxe-i3000sFlex com uma frequência de 10 Hz a 50KHz

Na Figura 41 podemos observar como foi efectuada as ligações de modo a obter as formas de onda do módulo A10 Gate Unit.



Figura 41 – Ligações efectuadas no comboio.

A velocidade que o comboio alcançou de forma a retirar as formas de onda foi de aproximadamente 20 km/h. As formas de onda obtidas nesses ensaios não foram mas situações próximas do limite uma vez que a carga (número de pessoas dentro do comboio) era reduzida

As formas de onda obtidas nos ensaios no comboio serão demonstradas nos resultados das simulações e ensaios, uma vez que sabe-se a partida que estão em bom funcionamento de forma a poder comparar os resultados obtidos com as simulações e os ensaios no laboratório.

7.3. Resultados das Simulações e dos Testes

Com os resultados das simulações e dos ensaios foi possível criar um programa de testes, uma vez que os resultados obtidos na simulação apresentam um andamento próximo ao do obtido experimentalmente. Registou-se diferenças em determinados picos de tensão ou corrente quando se dá uma comutação condução/corte ou vice-versa, devido ao carácter ideal que o modelo matemático “Matlab/Simulink” impõe.

Irão ser apresentadas algumas formas de onda obtidas nas simulações e nos ensaios.

7.3.1. Testes rápidos

7.3.1.1 Módulo A10 Gate Unit

Foram efectuados alguns testes ao Módulo A10 Gate Unit sem carga. Como este módulo é constituído por unidades, apenas foram efectuados testes as unidades A2 e A3 uma vez que são estas unidades que enviam os sinais de disparo dos tiristores GTOs. Irão ser apresentados sinais acerca do bom funcionamento do módulo A10 Gate Unit.

Na Figura 42 podemos observar os sinais da tensão na Gate V_{GK} (CH2:10V/div), e a corrente na gate I_{GK} (CH3: 10A/div) (sinal de disparo do GTO) na simulação e no ensaio no laboratório. Como podemos observar as formas de onda da simulação e do ensaio no laboratório são semelhantes diferenciando-se nos picos da tensão e da corrente devido ao carácter ideal dos blocos do Matlab/Simulink.

Na Figura 43 podemos observar esses mesmos sinais no ensaio do comboio. Podemos observar que as formas de onda da Figura 42 e da Figura 43 são semelhante.

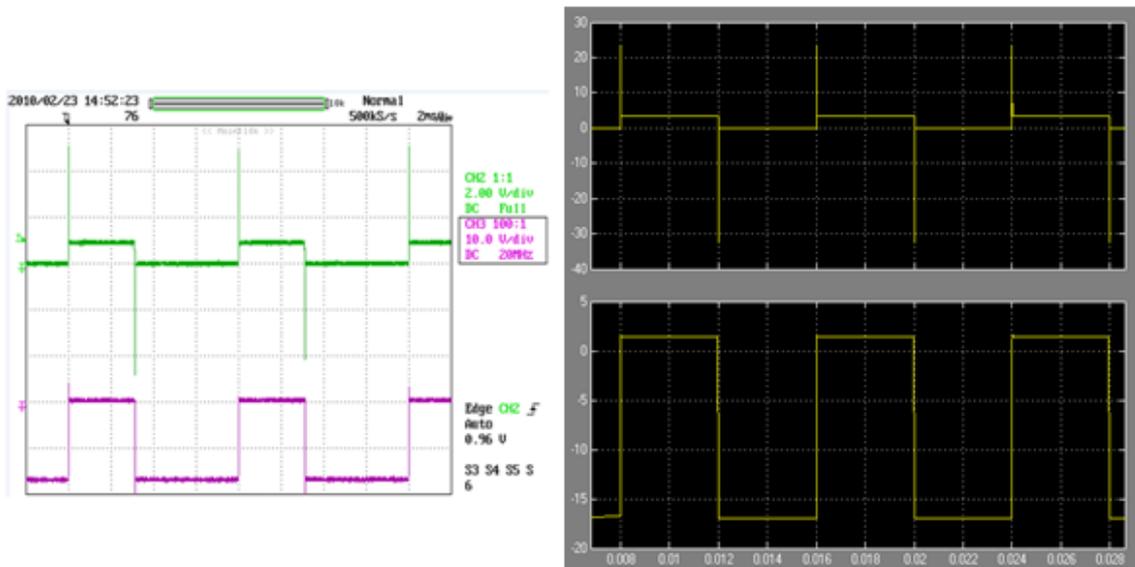


Figura 42 – Tensão V_{GK} e corrente I_{GK} na gate quando o módulo A10 Gate Unit em vazio.

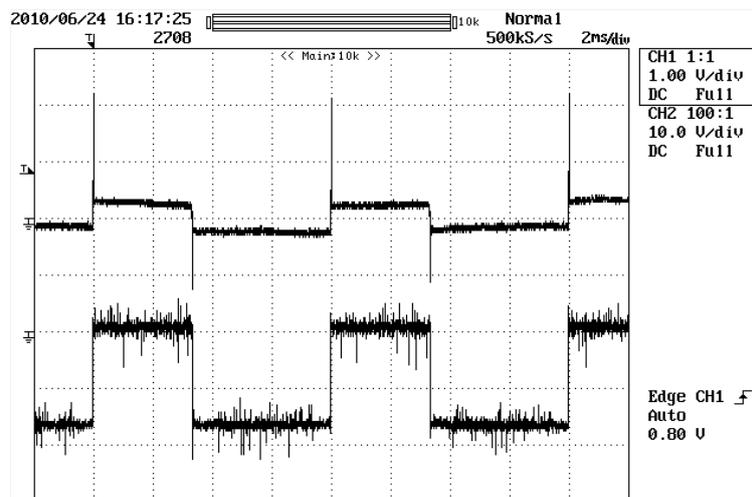


Figura 43 – Tensão V_{GK} e corrente I_{GK} na gate.

Na Figura 44 e na Figura 45 podemos observar a tensão e a corrente na gate, mas serão demonstradas numa janela de tempo mais reduzida de modo a verificar o tempo de passagem do corte a condução do GTO neste caso. Como se pode observar, a gate mantém um valor mínimo na porta, de modo a minimizar a queda de tensão do GTO. Existem algumas diferenças entre a simulação e o laboratório devido ao carácter ideal do “Matlab/Simulink”.

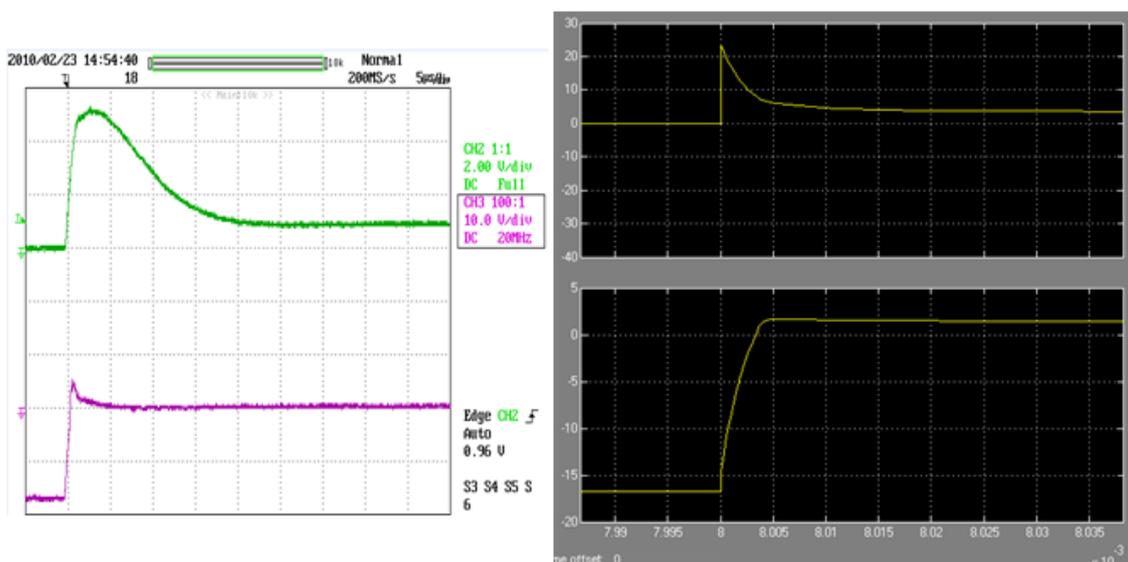


Figura 44 – Tensão e corrente na gate (passagem a condução) (simulação e laboratório).

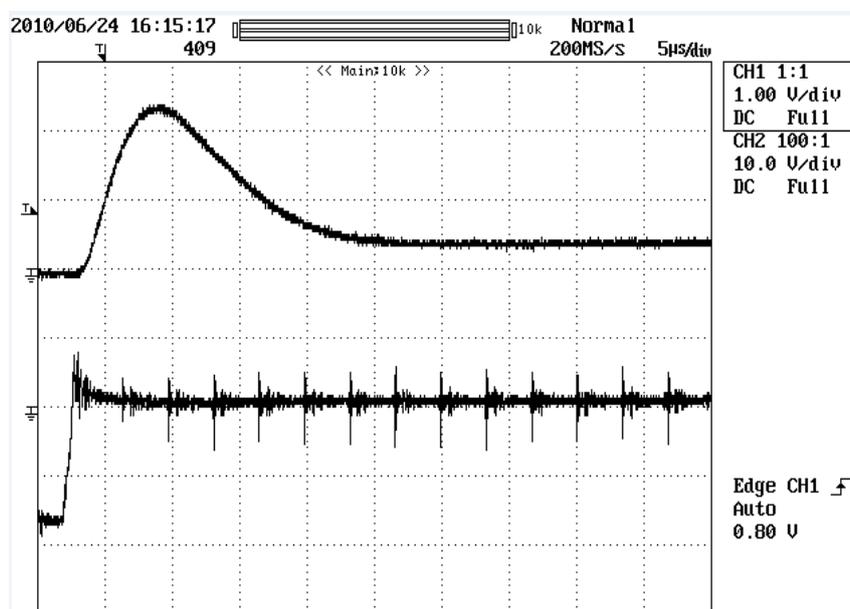


Figura 45 – Tensão e corrente na Gate (passagem a condução) (ensaio no comboio).

Na Figura 46 e na Figura 47 podemos observar a tensão e a corrente na gate, mas serão demonstradas numa janela de tempo mais reduzida de modo a verificar o tempo de

passagem da condução ao corte do GTO. Existem algumas diferenças entre a simulação e o laboratório devido ao carácter ideal do “Matlab/Simulink”.

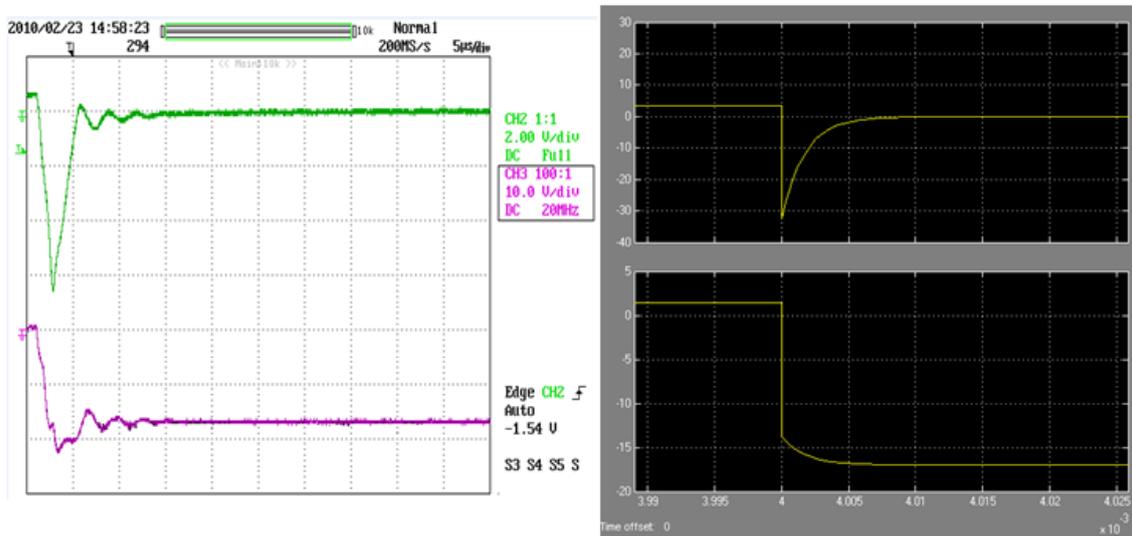


Figura 46 – Tensão e corrente na Gate (passagem ao corte) (simulação e laboratório).

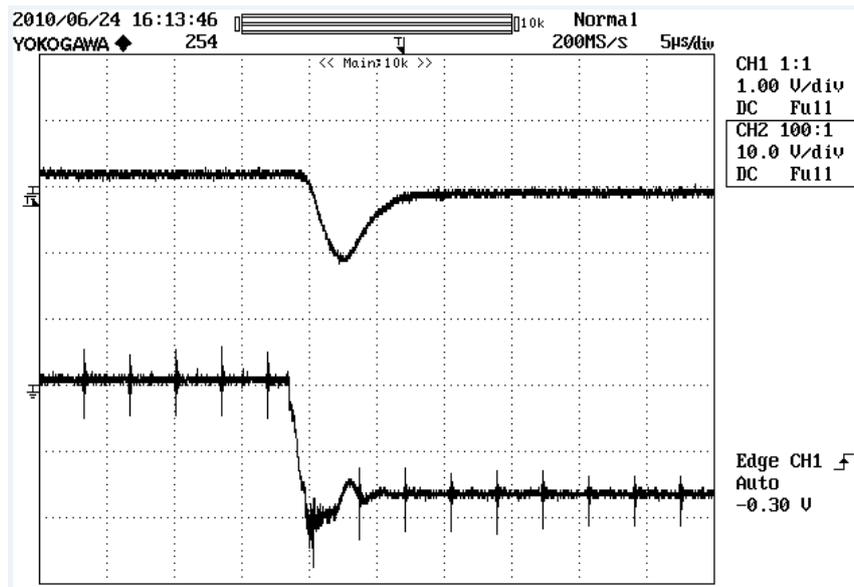


Figura 47 – Tensão e corrente na Gate (passagem ao corte) (ensaio no comboio).

Como pode observar os ensaios e as simulações são semelhantes, tendo algumas diferenças devido as considerações que se teve que efectuar para ser possível realizar testes no laboratório. Os ensaios do comboio servem de ponto de partida para comprovar o bom funcionamento do módulo uma vez que o fabricante não cedeu nenhum tipo de informação acerca da estrutura física e nem do comportamento do módulo A10 gate unit.

7.3.1.2 Modulo A30

Neste módulo, nos testes rápidos apenas tirou-se algumas formas de onda de forma a verificar qual o correcto funcionamento dos semicondutores quando em bom funcionamento uma vez que podem apresentar correntes de fuga.

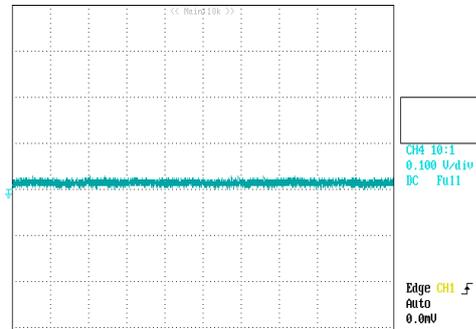


Figura 48 – Corrente no GTO, Díodo (ao corte) e Tiristor.

Na Figura 48 está representada a corrente no GTO, díodo (ao corte) e tiristor e não foi apresentada a figura da simulação uma vez que o valor é zero.

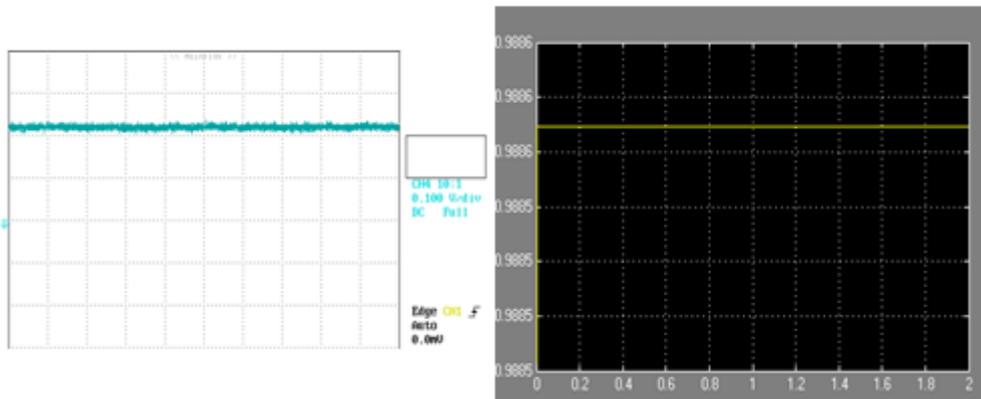


Figura 49 – Corrente no Díodo (em condução).

7.3.1.3 Modulo A40

Neste módulo, nos testes rápidos apenas tirou-se algumas formas de onda de forma a verificar qual o correcto funcionamento dos semicondutores quando em bom funcionamento uma vez que podem apresentar correntes de fuga.

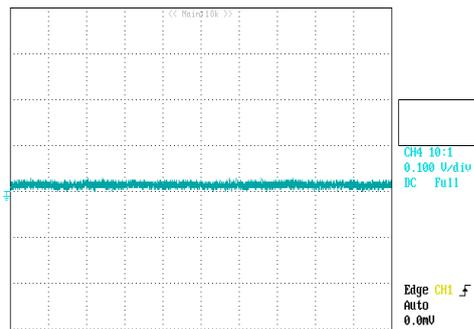


Figura 50 – Corrente no GTO, Díodo (ao corte) e Tiristor.

Na Figura 50 está representada a corrente no GTO, diodo (ao corte) e tiristor e não foi apresentada a figura da simulação uma vez que o valor é zero.

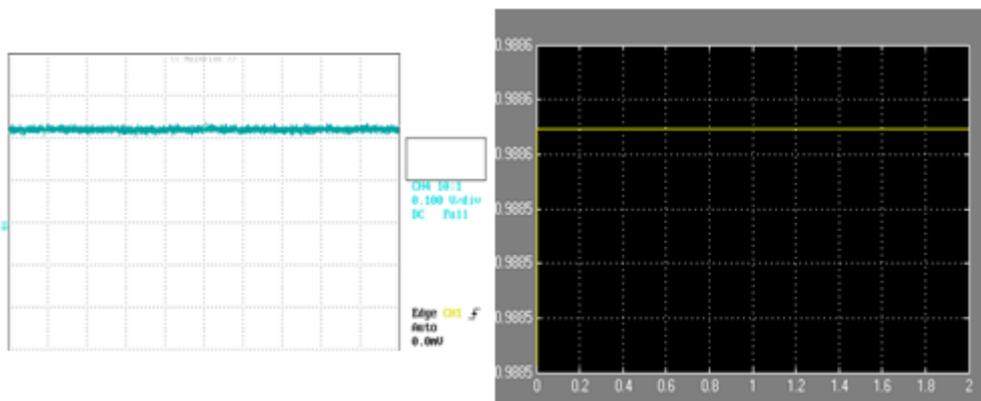


Figura 51 – Corrente no Díodo (em condução).

Avarias:

Em caso de avaria por um curto-circuito no GTO, tiristor ou diodo (ao corte), estes ficariam com a forma de onda parecida com a Figura 49 e com a Figura 51 (módulo A30 e módulo A40 respectivamente).

7.3.2. Testes Avançados

7.3.2.1 Módulo A30

Na Figura 52 pode-se observar os sinais de disparo dos tiristores GTO (sinais enviados pelo módulo A10 Gate Unit, mais concretamente pela unidade A2 e A3 do módulo). Como se pode verificar, para passar os GTOs ao corte é necessário tensões da ordem dos 24V negativos. E para por à condução bastam aproximadamente 3 V.

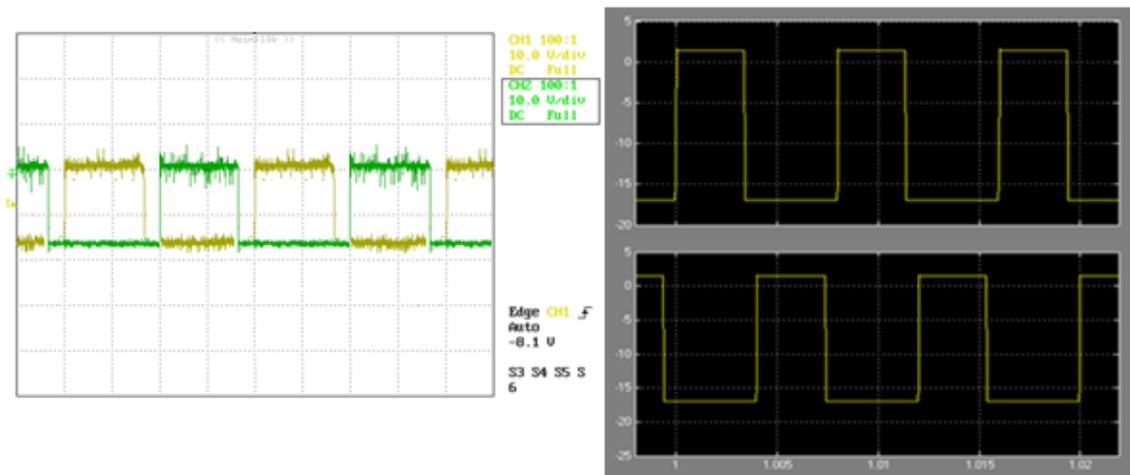


Figura 52 – Tensão V_{GK} do GST2' e do GST2''.

Na Figura 53 pode-se observar a tensão aos terminais dos tiristores GTOs e a corrente que sai do ponto 4. A tensão aos seus terminais atinge um valor aproximado de 380V quando estes se encontram ao corte. A tensão resultante é a soma da tensão da fonte (V_f) como a tensão de saída (V_0) e é sempre positiva do ânodo para o cátodo. Na montagem efectuada era possível aumentar o valor da tensão aos terminais do GTO mas por uma questão de segurança do material optou-se por realizar os testes a uma tensão mais baixa.

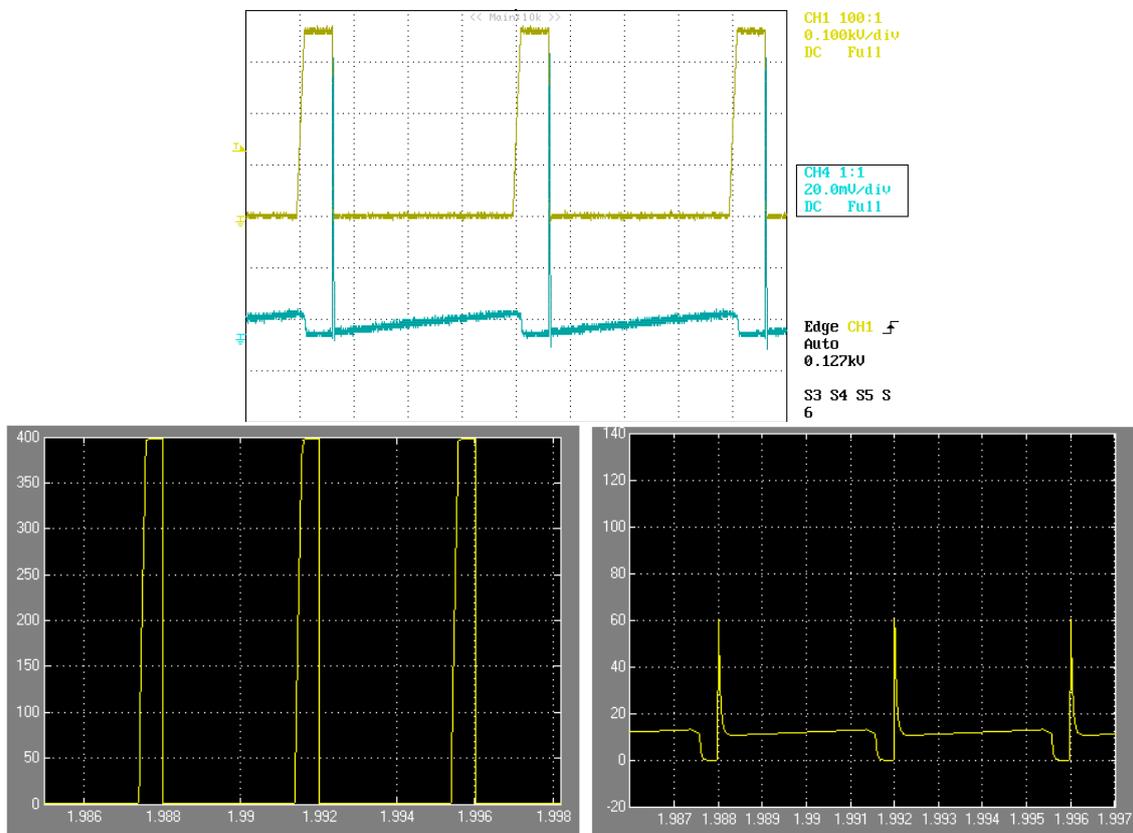


Figura 53 – Tensão aos terminais dos GTOs (V_{3-4}) e corrente do ponto 4 do módulo.

Na Figura 54 podemos observar a tensão aos terminais do diodo FD2 e a corrente que sai do ponto 2 do módulo. Pela figura podemos observar que a tensão aos terminais do diodo é idêntica à tensão aos terminais do GTO, só que de valor contrário, que neste caso quando o diodo está ao corte tem aplicado aos seus terminais uma tensão de -380V entre o cátodo e o ânodo. A corrente que sai do ponto 2 do módulo, é quase na totalidade a que passa pelo diodo, quando este entra em condução a corrente é de cerca de 14A, decrescendo constantemente até 10A antes de passar ao corte, passando aí para o valor de 0A. O pico de corrente de -180A apresentado na Figura 54 deve-se a descarga dos condensadores C3 e C4. A queda brusca de corrente que é observada durante o intervalo de condução do diodo deve-se ao facto do tiristor BT2 passar a condução, deste modo a corrente da bobine tem que ser dividida pelos dois semicondutores.

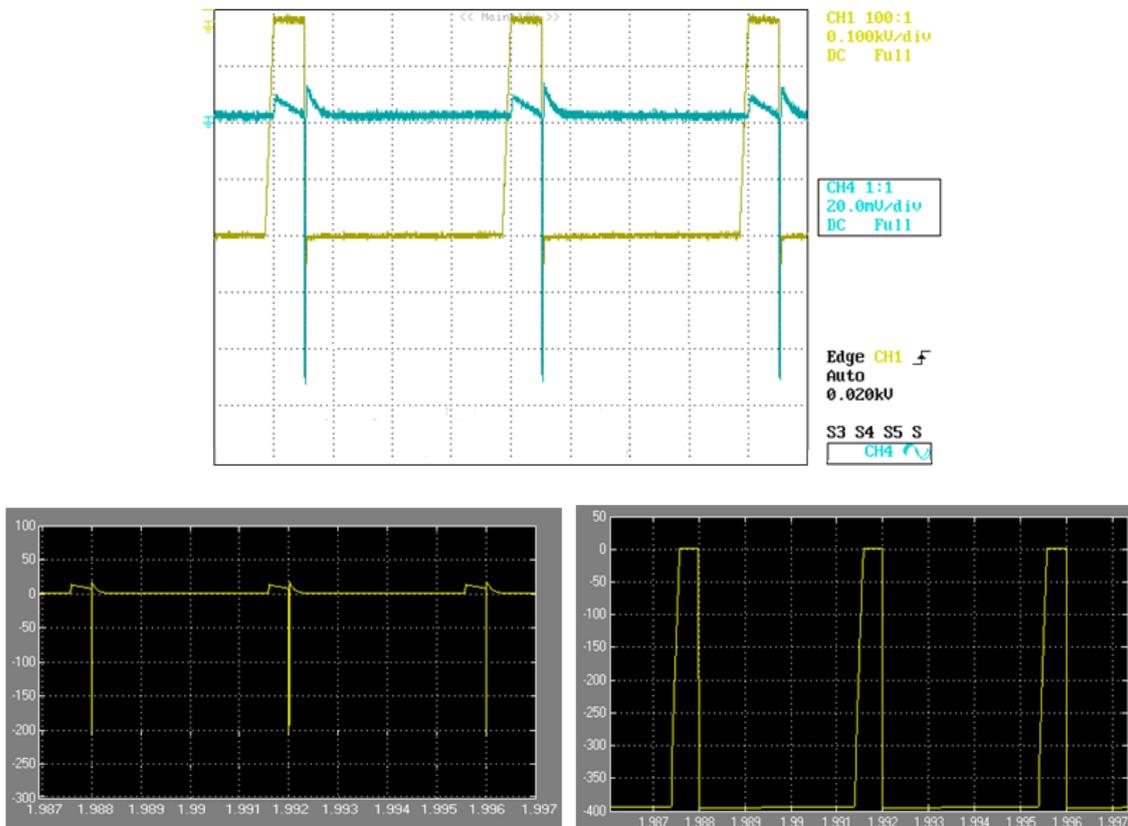


Figura 54 – Tensão aos terminais do diodo (V_{3-2}) e corrente que sai no ponto 2 do módulo.

7.3.2.2 Módulo A10 Gate Unit

Nos testes avançados do módulo A10 Gate Unit temos o módulo inserido com o circuito cc-cc do tipo redutor-elevador. Deste modo serão efectuados testes com o GTO com carga.

Na Figura 55 podemos observar os sinais da tensão na Gate V_{GK} (CH2:10V/div), e a corrente na gate I_{GK} (CH3: 10A/div) (sinal de disparo do GTO) na simulação e no ensaio no laboratório. Como podemos observar as formas de onda da simulação e do ensaio no laboratório são diferentes, devido ao carácter ideal dos blocos do Matlab/Simulink.

Na Figura 56 podemos observar esses mesmos sinais no ensaio do comboio em que V_{GK} (CH2: 10V/div) e I_{GK} (CH1:30A/div). Podemos observar que as formas de onda da Figura 55 e da Figura 56 são semelhante com algumas diferenças.

Como podemos verificar o sinal esperado era o obtido na simulação, mas podemos comprovar que o sinal obtido no laboratório é o correcto uma vez que é idêntico ao sinal obtido no comboio. Podemos verificar que quando o GTO passa a condução depois de alguns μ s, mantém a corrente de porta mínima que garante o disparo.

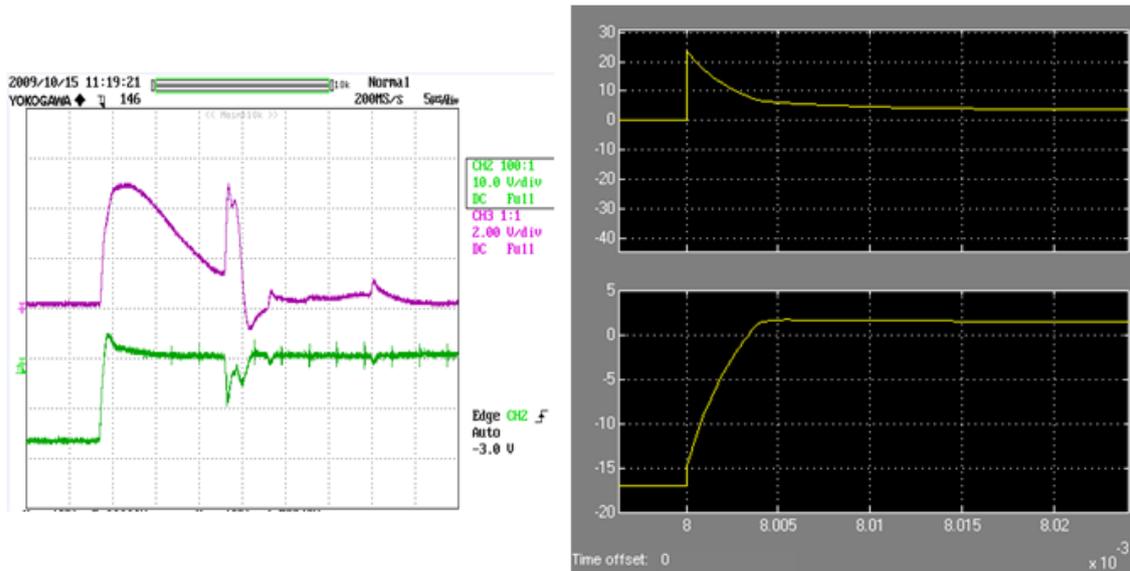


Figura 55 – Tensão e corrente na Gate (passagem a condução) (simulação e laboratório).

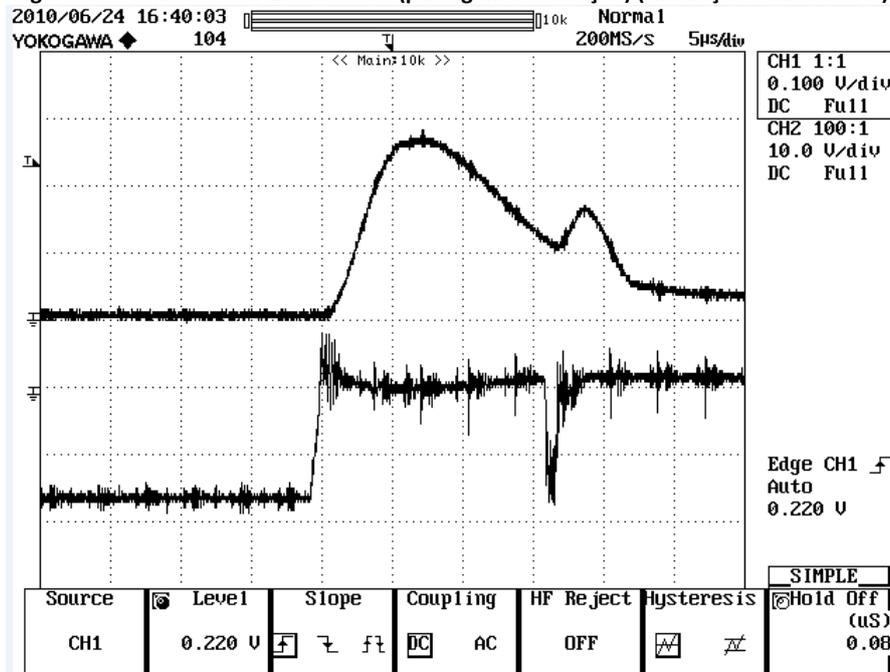


Figura 56 – Tensão e corrente na Gate (passagem a condução) (ensaio no comboio).

Na Figura 57 e na Figura 58 podemos observar a tensão e a corrente na gate, mas serão demonstradas numa janela de tempo mais reduzida de modo a verificar o tempo de passagem da condução ao corte do GTO.

Na Figura 58 podemos observar V_{GK} (CH2: 10V/div) e I_{GK} (CH1:70A) no ensaio do comboio

Existem algumas diferenças entre a simulação e o laboratório devido ao carácter ideal do “Matlab/Simulink”. Como podemos observar as formas de ondas e os tempos de comutação do GTO obtidas no laboratório e no comboio são idênticas. Deste modo foi possível efectuar um programa de testes uma vez que sabemos as formas de onda do módulo A10 Gate Unit.

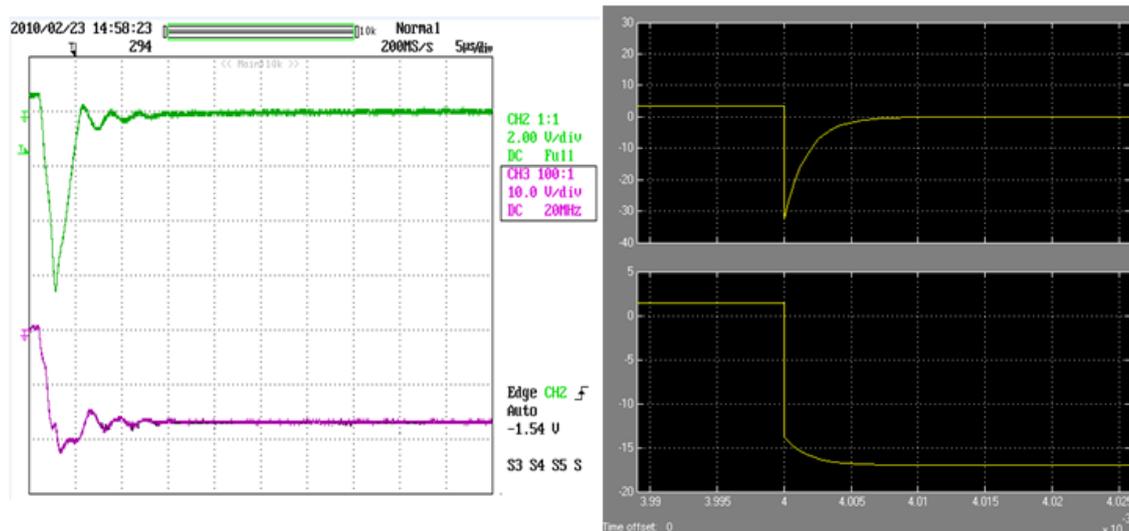


Figura 57 – Tensão e corrente na Gate (passagem ao corte) (simulação e laboratório).

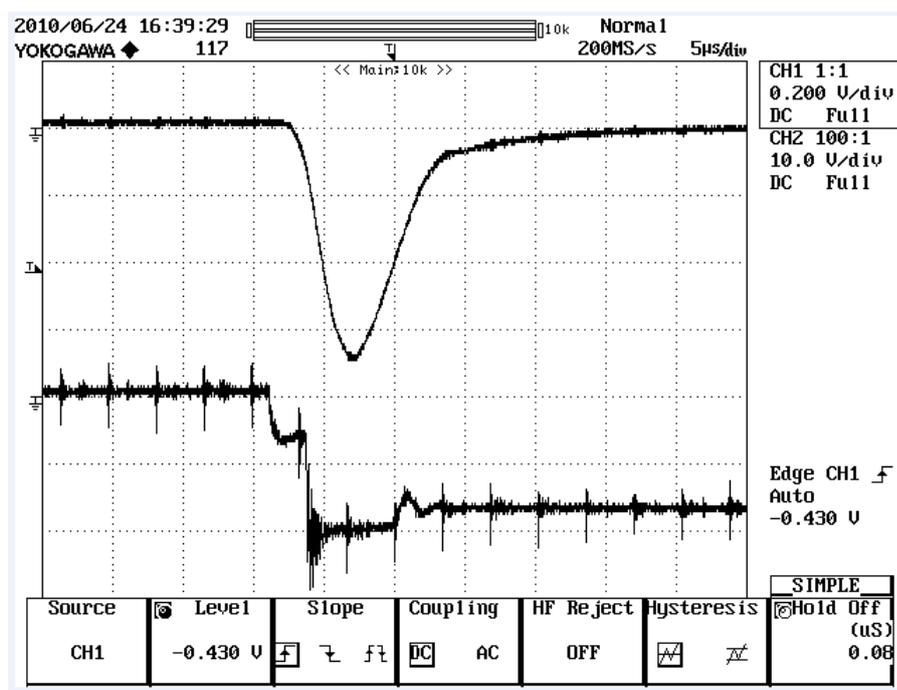


Figura 58 – Tensão e Corrente na Gate (passagem ao corte) (ensaio no comboio).

Como as formas de onda no módulo A30 e A40 são idênticas apenas foi apresentado as formas de onda do A30.

8. Programa para executar os testes

A pesquisa efectuada através das simulações e dos testes efectuados no laboratório e no comboio do módulo A10 Gate Unit e dos módulos A30 e A40 em perfeitas condições, serviram de base para a criação de um programa de testes desenvolvidos em “LabView” (Anexo V).

O programa de testes tem como base a comparação das formas de onda de referência e suas simulações, de modo a permitir identificar se os módulos de potência estão avariados e qual a causa da avaria, antes de serem enviados. Assim deste modo poderá evitar-se o envio de material que esteja em boas condições para Alemanha, ou em caso de avaria, podem ser enviados com a indicação da avaria.

8.1. Descrição do Programa.

De modo geral, apresenta-se na Figura 59 um fluxograma de modo a sintetizar o funcionamento do programa

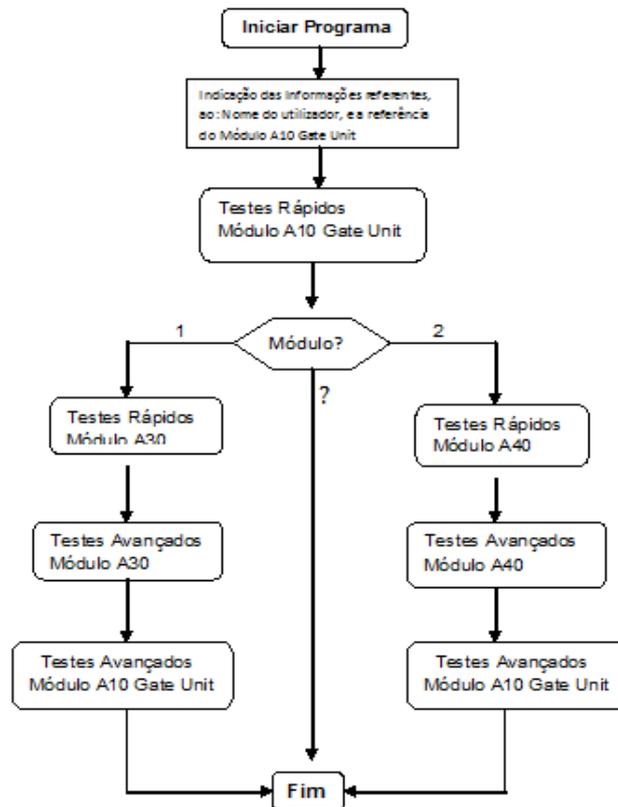


Figura 59 – Esquema Geral do Programa de testes.

Após iniciar o programa, este pedirá ao técnico para ceder indicações sobre si e a referência do módulo A10 Gate Unit.

Ao módulo A10 Gate Unit serão efectuados testes rápidos e caso não haja nenhuma avaria ele passará para os testes avançados. Mas para executar os testes avançados ao Modulo A10 Gate Unit é necessário estar ligado ao Modulo A30 ou A40, logo o programa

irá pedir novas indicações sobre o módulo que será testado com o A10 Gate unit de modo a ser possível efectuar-se os testes avançados do mesmo. Caso a resposta seja 1=Módulo A30 ou 2=Módulo A40, serão efectuados testes avançados ao módulo A10. É de notar que também serão efectuados testes rápidos e testes avançados ao módulo escolhido. Mas caso não seja escolhido nenhum destes dois valores o programa é terminado automaticamente.

8.1.1. Testes Rápidos

Na Figura 60 está representado o fluxograma dos testes rápidos do módulo A10 Gate Unit.

Como se pode observar se houver uma avaria num dos testes efectuados não é possível continuar a realizar os testes de forma a não degradar os outros componentes do módulo.

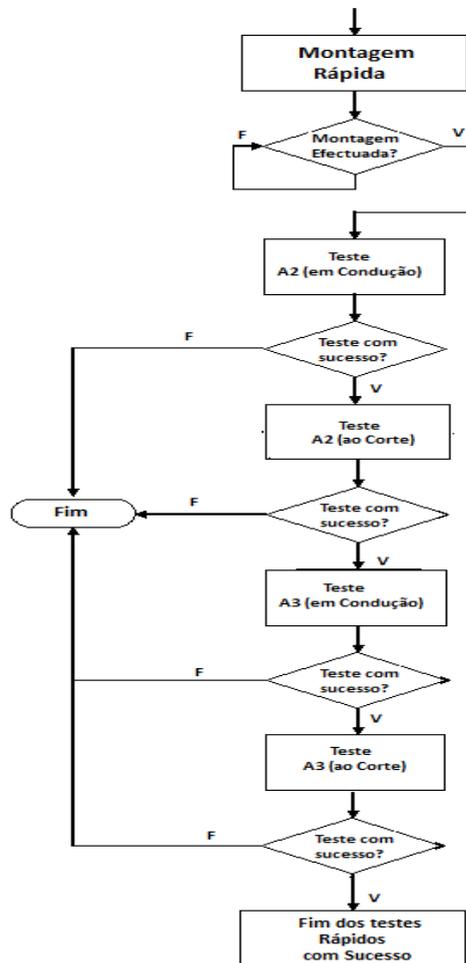


Figura 60 – Fluxograma Testes Rápidas do Módulo A10 Gate Unit.

8.1.2. Testes Avançados

Nos testes avançados ao módulo A10 Gate Unit teremos também os testes rápidos do módulo A30 ou A40, conforme a escolha do utilizador, uma vez que um dos componentes poderá estar avariado e deste modo poder afectar os testes ao módulo A10 Gate Unit. Assim sendo antes de efectuarmos testes avançados ao módulo teremos que efectuar testes rápidos e avançados ao módulo A30 ou A40.

Na Figura 61 apresenta-se o fluxograma dos testes avançados. No primeiro fluxograma está descrito os testes rápidos do módulo A30/A40 e no segundo fluxograma está descrito os testes Avançados do módulo A10 Gate Unit.

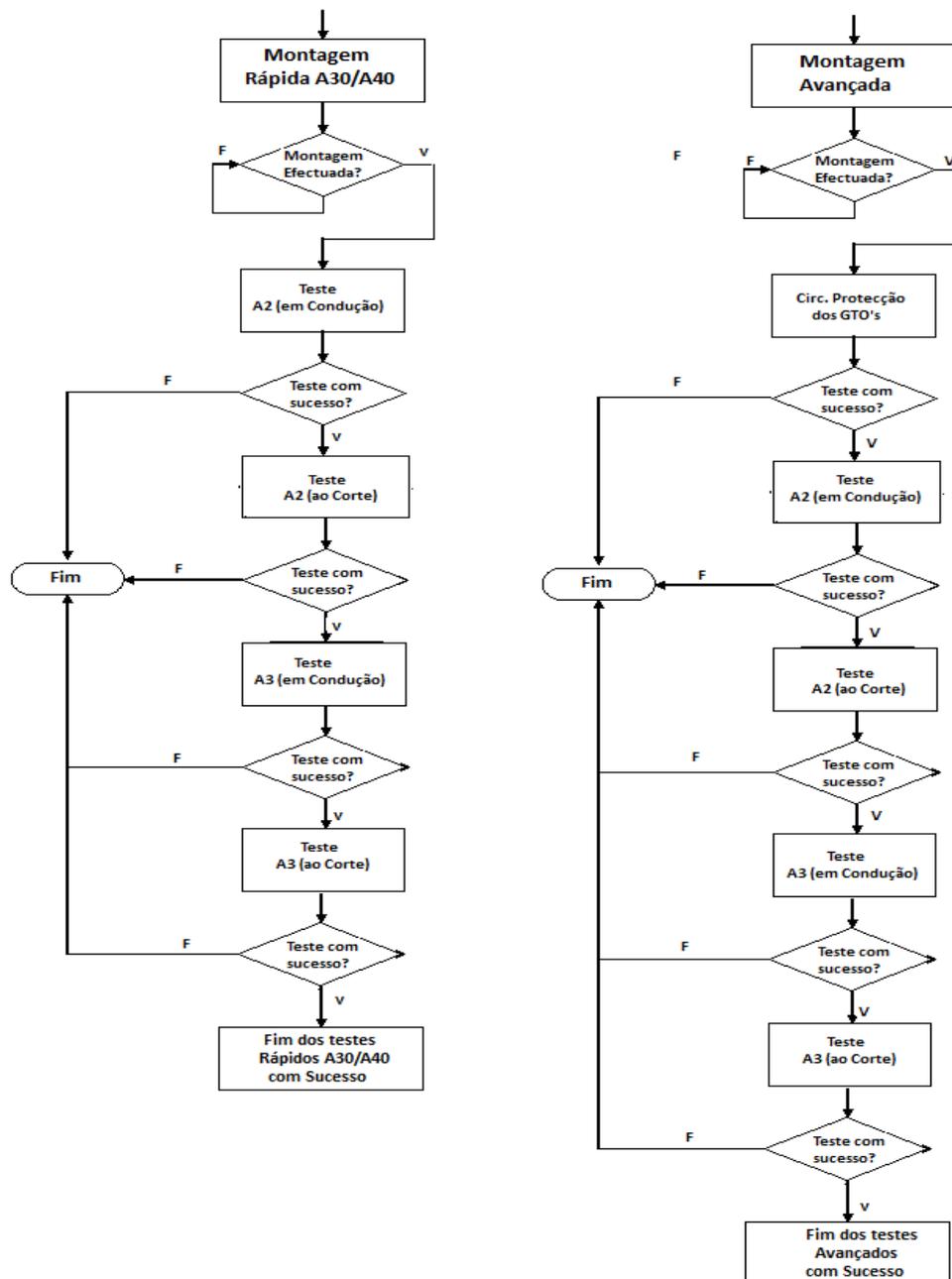


Figura 61 – Fluxograma Testes Avançados.

De maneira a perceber melhor o Programa de testes, foi criado um Manual do Utilizador (Anexo V) que indica todos os passos a o utilizador tem que executar de modo a ter o Relatório Final com os resultados dos testes.

9. Conclusões

Nesta tese de mestrado atingiram-se os objectivos inicialmente propostos de criar um método de testes e um programa semi-automático baseado nesses testes ao módulo A10 Gate Unit do conversor de tracção das motoras do ML90. Mais concretamente foi elaborado um estudo acerca do módulo nas diferentes montagens a que foi inserido.

Para cumprir os objectivos, foi necessário um estudo e uma aprendizagem de todo o conversor de tracção do comboio, de modo a adaptar as montagens necessárias ao material disponível no laboratório.

Concluiu-se ser possível comandar os módulos a através da TCU, mediante o uso de um programa de testes criado pelo fabricante “Siemens”, com o intuito de se testar se os módulos que efectuam o disparo dos semicondutores estão em boas condições. Com este mesmo programa foi possível controlar os intervalos de condução/corte dos tiristores (GTOs e tiristores Convencionais).

Para atingir os objectivos principais (Testes ao módulo A10 Gate Unit e criação do Programa de testes) foram criadas as condições para ensaiar e verificar o correcto funcionamento no laboratório do módulo A10 Gate Unit e numa segunda fase foram criadas as condições para ensaiar e verificar o correcto funcionamento do módulo A10 Gate Unit no comboio, de modo a termos informação suficiente para realizar o programa de testes.

Recorde-se que foram elaborados testes quando em vazio e quando inserido numa montagem redutora-elevadora pela necessidade de colocar o tiristor GTO em carga com uma tensão significativa.

Para efectuar-se os testes quando este está inserido numa montagem redutora-elevadora, recorreu-se a tese de mestrado do Engenheiro Rui Domingues [3] de forma a permitir um rápido conhecimento do conversor e as suas ligações, pois foi necessário efectuar novos estudos e simulações, uma vez que foi possível obter tensões da ordem dos 400V (diferente dos 250V testados pelo Engenheiro Rui).

Numa terceira fase desenvolveu-se um programa de testes em simultâneo com um manual do utilizador desse programa indicado. O programa foi elaborado em “LabView” e veio semi-automatizar o processo de testes na identificação de sinais. O programa de testes criado concebe no final dos testes realizados um relatório que serve de base para saber se os módulos estão ou não avariados de modo a evitar o envio para Siemens/Alemanha de material que está em bom funcionamento.

Resumindo, as contribuições fundamentais do programa de testes do módulo A10 Gate Unit do conversor de testes criado são:

- A possibilidade de testar e diagnosticar avaria nos módulos A10 Gate Unit, evitando em caso de bom estado o seu envio para Siemens /Alemanha.
- A possibilidade de testar e diagnosticar avarias nos módulos A30 e A40, evitando em caso de bom estado o seu envio para Siemens /Alemanha.
- Criação de um relatório com o resultado dos testes efectuados.

Como sugestões para futuros trabalhos podem referir-se:

- Realizar o mesmo tipo de testes aos módulos, com tensões e correntes maiores, partindo de uma fonte de maior potência.
- 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 um banco de ensaio mais completo, colocando duas TCU e dois conversores de tração, alimentados por 750V, e ligados a dois motores acoplados mecanicamente, funcionando um como motor e o outro como travão/gerador para a recuperação da energia.
- Um estudo aprofundado sobre os sinais que retornam do módulo A10 Gate Unit para a TCU de modo a ter um estudo mais completo do módulo.

10.

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] Paixão, Bruno da Silva C. Assis; “Conversor de tracção do material circulante ML90 do Metropolitano de Lisboa ”
- [13] www.ni.com/labview/

Especificações técnicas:

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

I.1.2. Disjuntor Principal 12Q1

O disjuntor principal tem a função de no caso de sobreintensidade, desligar o sistema de tracção isolando-o da linha. O poder de corte é de 50kA. O disjuntor dispõe de 2 dispositivos de protecção:

- Protecção de sobrecorrente
- Protecção contra curto-circuitos

A protecção de sobrecorrente é ajustável desde 2 kA até 4 kA. Este dispositivo de disparo é controlado magneticamente e desliga 20 ms depois de se ter atingido o valor de ajuste.

A protecção contra curto-circuito é ajustada para disparar a 3 kA. Neste caso supervisiona-se o tempo de subida da corrente de curto-circuito. Após a detecção de um curto-circuito os contactos abrem num intervalo de tempo entre 3 e 7 ms.

Especificações Técnicas:

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

I.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 situação pode ser executada pelo curto-circuitador que, após a sua activação 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. Após a sua actuação, a linha fica em curto-circuito fazendo com que o disjuntor da subestação seja disparado.

I.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. Deste modo, é necessário, um 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 63).

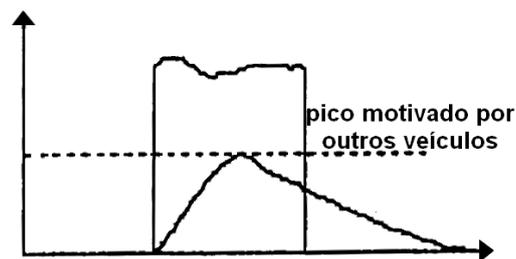


Figura 63 – Actuação do filtro de linha

I.1.5. Condensador da linha 13A1.C

O condensador de linha tem uma capacidade de 24mF de forma a garantir uma operação com segurança. Está equipado com resistências de descarga e permitem uma diminuição da tensão, durante a descarga, de 900V para 60V em menos de 2 minutos.

O condensador terá que ser pré-carregado durante o início da ligação do circuito., que é realizado pelo contactor 13A1.K1. Para limitar a corrente durante a pré-carga, estão intercaladas no circuito duas resistências 13A1. R102/R103. A tensão aos terminais do condensador é medida através do transdutor 13A1.T1.

I.1.6. Auto-indução de linha 13L1

A auto-indução de linha tem um valor superior à 7mH para uma corrente de 800A, 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 também pode ser encontrado o díodo de roda livre da indutância de linha (13V3).

Especificações técnicas:

- Corrente nominal 480A

I.1.7. Díodo de potência 13A1.V1

A necessidade de um díodo de protecção do condensador deve-se as possíveis inversões de polaridade.

Por exemplo, no caso de um curto-circuito na linha de 750 V são geradas condições de oscilação de corrente e o díodo impede a inversão de polaridade protegendo o condensador (Figura 64).

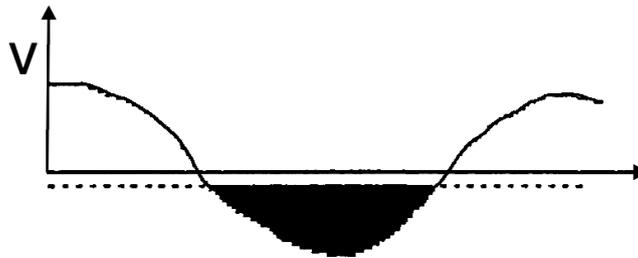


Figura 64 - Inversão de polaridade

I.1.8. Díodo de potência 13A1.V2

O díodo de potência 13A1.V2 tem a função de impedir que a corrente seja invertida quando em travagem e se houver avaria no 13A1.K1. Esta situação poderia destruir as resistências R102 e R103.

I.1.9. Transdutor 44T1

Transdutor de corrente para supervisão de 50Hz.

I.1.10. Conversor de Tracção 14A1

Para que os motores assíncronos trifásicos possam ser utilizados numa linha de alimentação DC (corrente contínua), é necessário efectuar a conversão da corrente contínua em corrente alternada trifásica durante a tracção e inversamente durante a travagem. O aparelho utilizado para esta conversão é designado por conversor de tracção.

Este conversor compreende:

- Conversor cc-cc de 2 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.

I.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 o modo PWM, a largura do impulso é 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 sentido do fluxo de energia é feito da linha para o circuito intermédio (bobine de alisamento) e em modo travagem com regeneração o fluxo é feito no sentido do circuito intermédio para a linha. Num conversor cc-cc de dois quadrantes existem 2 tiristores tipo GTO permitindo uma transição suave do modo tracção para o modo travagem, dado não existir qualquer contactor.

I.3. Conversor cc-cc de travagem BT1/BT2 (módulos A30 e A40)

Em modo de travagem é usada predominantemente a travagem regenerativa, sendo que neste modo a tensão da linha aumenta, e no caso se atingir à tensão máxima admissível, o conversor de travagem é accionado (travagem reostática).

O conversor de travagem consiste 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 receber toda a energia de travagem, então o conversor cc-cc de travagem não será accionado. Também é possível uma situação híbrida de travagem reostática e regenerativa que garante que seja enviada para a linha a máxima energia possível.

I.4. Circuito intermédio 14L1

Num ondulador alimentado por uma fonte de corrente, a corrente do circuito intermédio flui sempre com o mesmo sentido. A tensão no circuito intermédio muda de polaridade quando se passa do modo tracção para o modo de travagem ou vice-versa. A corrente no circuito intermédio é alisada pela bobine de alisamento.

I.5. Ondulador de corrente impressa WR

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

O ondulador é constituído por três braços ligados às três fases R, S, T (U, V, W) incluindo, em cada braço 2 tiristores e 2 díodos e entre cada 2 braços estão inseridos condensadores de comutação.

O ondulador tem a função de transformar a corrente do circuito intermédio, corrente continua I_D , num sistema trifásico de 3 correntes simétricas, I_U , I_V , I_W desfasadas de 120° e de

frequência variável. Para que esta transformação seja efectuada é necessário fazer-se a ligação simultânea se dois terminais do motor ao circuito intermédio.

As duas fases envolvidas na corrente de condução são comutadas seis vezes em cada ciclo da frequência fundamental, frequência esta que é dada pela unidade de controlo (TCU), de modo a que o ondulator possa fornecer ao motor correntes do tipo rectangular com 2 blocos de 120° em cada ciclo.

A comutação da corrente entre fases é inicializada pela ignição do tiristor seguinte. A corrente do tiristor que previamente esteve a conduzir, decresce rapidamente até à situação em que o tiristor é bloqueado automaticamente. Deste modo é suficiente a utilização de tiristores do tipo convencional, não sendo necessários GTOs.

Anexo II. Características do tiristores GTO GST

Os tiristores GTOs testados que se encontravam montados nos módulos A30 e A40 são do fabricante TOSHIBA modelo SG3000GHX24. Neste caso apenas tenho os parâmetros do modelo SG3000GXH24 mas como as características são relativamente iguais usei os parâmetros do modelo acima referido para ter como referencia os parâmetros fornecidos pelo fabricante e são tidos como referencia para determinar os limites funcionais do tiristor GTO em causa. As características técnicas destes tiristores GTO foram apresentadas na Tabela 1 (capítulo2).

A descrição mais detalhada do significado das características da **Tabela 1** encontra-se nos pontos seguintes deste anexo.

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

De seguida vai-se descrever as características dinâmicas do comando de porta, sendo que algumas delas não constavam nos documentos técnicos ("*datasheets*") encontrados, daí não estarem referidas na Tabela 1.

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 vai minimizar a queda de tensão de condução do GTO, fazendo conduzir francamente a junção porta cátodo. A corrente de porta I_{GF} , que tem um valor de cerca de 1A, quando mantida durante todo o intervalo de condução, promove a equitativa distribuição da corrente principal por todos os cátodos paralelizados, baixando portanto a tensão de condução.

I_{GM} - Impulso inicial de corrente de porta na passagem à condução (comutação ao fecho). Este impulso é necessário enquanto a corrente principal não atingir o valor da corrente de lançamento. Este impulso de corrente deve manter-se durante cerca de uma dezena de μs 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 - Mínima taxa 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, comandada pela porta, requer a polarização desta com uma tensão porta cátodo de valor aproximadamente de -15V. Os tempos de comutação e mesmo 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.

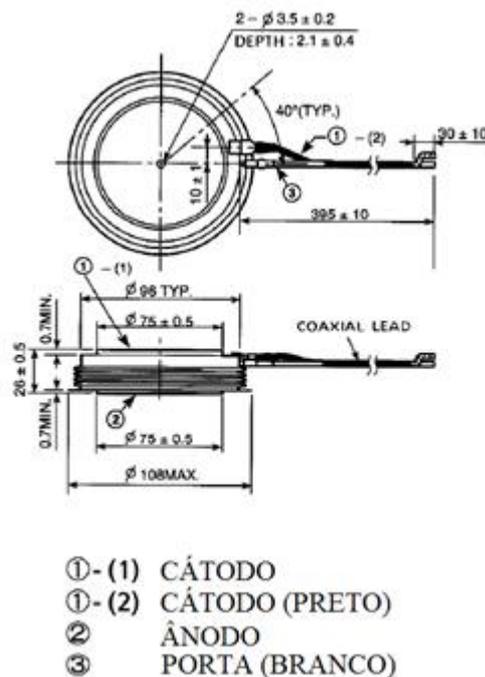


Figura 65 – Aspecto físico do GTO.

A Figura 65 mostra o aspecto físico do tiristor GTO usado, aspecto esse, nunca visto pelos utilizadores, pois o módulo é fechado.

II.2. Características dinâmicas ânodo-cátodo (Regime de comutação abrupta)

Este regime de funcionamento é caracterizado por ser o próprio GTO a forçar ou o anulamento das tensões (entrada à condução), ou o anulamento das correntes (entrada ao corte) e não o circuito exterior.

Este tipo de funcionamento requer a presença de um circuito de protecção (circuito RCD) que limita dv_{AK}/dt a um certo valor inferior ao valor crítico.

II.2.1. Entrada em condução

- t_d – Tempo de atraso (“delay time”);

Este tempo compreende o intervalo desde que é aplicada a tensão V_{GF} , até que a corrente principal atinja 10% do valor nominal e é especificado associado a um dado I_{GM} , a uma dada tensão de polarização directa e a um dado valor de di_G/dt . Neste caso o valor especificado pelo fabricante $3\mu s$.

- t_r – Tempo de subida (“rise time”);

Este tempo compreende o intervalo em que a corrente principal se situa entre 10% e 90% do valor nominal e é especificada nas mesmas condições de t_d . O fabricante especifica muitas vezes o valor máximo da derivada da corrente directa di_{GTO}/dt , imposto pelo GTO ao circuito.

- t_{gon} – Tempo de entrada em condução (“turn-on time”);

Este tempo corresponde à soma de t_r com t_d . A comutação corte/condução do tiristor GTO é relativamente rápida. O tempo de entrada em condução é da ordem de alguns μs variando com a derivada e amplitude do pico da corrente. Neste caso $10\mu s$.

- t_{wg} – Tempo mínimo de duração do pico IGM ou tempo mínimo de condução;

Este tempo representa um tempo mínimo, determinado pelo fabricante, para a duração do impulso de corrente I_{GM} e muitas vezes também para a duração mínima do intervalo de condução do GTO.

Um GTO deve-se deixar em condução durante um intervalo de tempo ligeiramente superior a t_{wg} antes de este poder ser passado ao corte. Este facto está relacionado com a dissipação devida ao pico de corrente I_{GM} e ao da descarga do condensador do circuito RCD de limitação de dv_{AK}/dt , dando origem a um aumento da temperatura na região na porta. Por este facto deve-se prever um tempo mínimo necessário para que a temperatura desça a níveis aceitáveis para que não haja destruição do GTO.

II.2.2. Entrada ao corte

- t_s – Tempo de armazenamento (“storage time”);

Este tempo compreende o intervalo desde que é aplicada a tensão negativa de porta (V_{GR}) até que a corrente principal desce para 90% do valor nominal e é especificado associado a uma dada tensão de repolarização directa, a um dado valor do condensador do circuito RCD e a um certo di_{GQ}/dt .

Durante o tempo de armazenamento (da ordem de alguns μs), a queda de tensão ânodo-cátodo aumenta ligeiramente, enquanto que a corrente inversa de porta, cresce com a taxa di_{GQ}/dt , geralmente limitada pela indutância parasita das ligações da porta cátodo.

Neste caso o valor especificado pelo fabricante $27\mu s$.

- t_f – Tempo de descida (“fall time”);

Este tempo compreende o intervalo em que a corrente principal se situa entre 90% e 10% do valor nominal, sendo especificado nas mesmas condições de t_s .

Durante o tempo de descida ou queda (inferior a $1\mu s$), a corrente de ânodo decresce muito rapidamente até se tornar igual ao valor da corrente de porta. O di_{GQ}/dt elevado correspondente a este anulamento, origina um di/dt de sinal contrário, mas também muito elevado no circuito RCD de limitação de dv_{AK}/dt devido à presença de indutâncias parasitas ou de limitação de di_{GQ}/dt que tentam manter a continuidade da corrente anódica. O di/dt de sinal contrário no circuito RCD provoca, nas suas indutâncias parasitas, um pico de sobretensão VSP característico da passagem ao corte dos tiristores GTO e muitas vezes indicativo do bom dimensionamento do circuito RCD.

Para limitar esse pico de tensão a um determinado valor (20%-30% da tensão suportada pelo GTO), é necessário usar circuitos RCD com baixas indutâncias parasitas, o que muitas vezes é realizado à custa da colocação de vários condensadores em paralelo a fim de diminuir a indutância intrínseca equivalente.

- t_{tail} – Tempo de decrescimento da corrente de cauda (“tail time”);

Este tempo compreende o intervalo seguinte a t_f durante o qual a corrente de cauda praticamente se anula e é especificado nas mesmas condições de t_s e tem uma duração tipicamente da ordem das dezenas de μs . Neste caso o valor especificado pelo fabricante $80\mu s$.

- t_q – Tempo de passagem ao corte (“turn off time”);

Este tempo corresponde à soma dos tempos t_s , t_f , t_{tail} . A sua duração é essencialmente determinada pela duração da corrente de recuperação.

- t_{offmin} – Tempo mínimo de duração do estado de corte.

Este tempo representa um tempo mínimo determinado pelo fabricante, para a duração do estado de corte do GTO. Neste caso o valor especificado pelo fabricante $30\mu s$.

Durante todo o intervalo em que o tiristor GTO deve permanecer bloqueado, a manutenção duma polarização negativa VGR na porta é considerada indispensável, pois melhora a capacidade do dispositivo suportar tensões directas mais elevadas.

II.2.3. Características limite.

De seguida vai-se descrever as características limite dos GTOs, sendo que, como anteriormente, algumas delas não constavam nos documentos técnicos (“datasheets”) encontrados, daí não estarem referidas na **Tabela 1**.

As correntes e tensões aos terminais de um tiristor GTO estão limitadas essencialmente por fenómenos energéticos (elevados níveis de tensões e correntes correspondem a elevadas potências dissipadas que podem levar à fusão do semiconductor) e de basculamento (“latchup”) profundo (elevadas correntes directas fazem diminuir b_{OFF} o que

implica retirar uma cada vez maior corrente da porta excedendo eventualmente a sua capacidade de actuação junto dos cátodos).

II.2.4. 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, que neste caso foi -2V.

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.2.5. Limitações em corrente: Correntes máximas

Na **Tabela 1** foram também apresentados 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.2.6. 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.2.7. 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.2.8. 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 díodos FD

Os díodos testados que se encontravam montados no módulo A30 e A40 são do fabricante SIEMENS modelo SSI. As características técnicas destes díodos estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 : Características técnicas do díodo 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

Dado que existem características na Tabela 2 que não foram descritas nos Anexo I, de seguida apresenta-se uma descrição mais detalhada destas.

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 reaplicada.

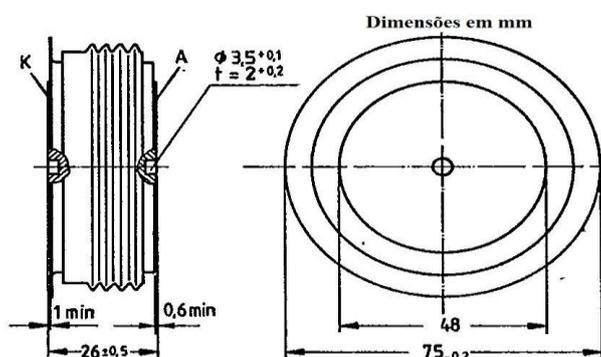


Figura 66 – Aspecto físico do díodo testado.

Anexo IV. Características dos tiristores BT

Os tiristores convencionais testados que se encontravam montados no módulo A30 e A40 são do fabricante SIEMENS modelo BSt. As características técnicas destes tiristores estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 : 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

Dado que existe uma característica na Tabela 3 que não foi descrita no Anexo I e no Anexo III, uma descrição mais detalhada é feita de seguida.

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 reaplicada (" V_{RRM} applied after surge"). Este parâmetro é útil para o dimensionamento das protecções fusíveis em sistemas de potência, e obtém-se por integração do quadrado da corrente I_{FSM} ao longo do tempo determinado $T/2$.

A Figura 67 mostra o aspecto físico do tiristor convencional testado, aspecto esse que, tal como no caso dos GTOs, nunca foi visto pelos utilizadores, pois o módulo é fechado.

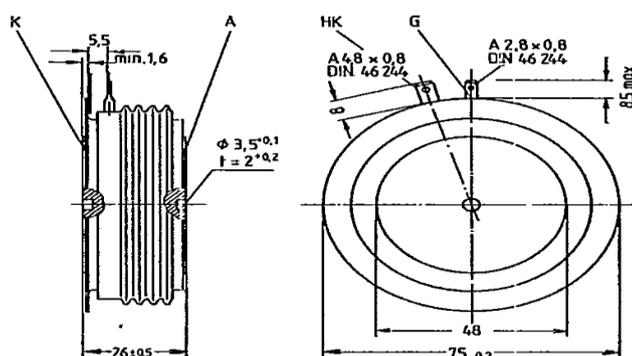


Figura 67 – Aspecto físico do Tiristor testado

Anexo V. Manual do Utilizador

Programa de Testes

O utilizador na interface inicial do programa tem no menu toda a listagem do material que é necessário para se efectuar os vários testes.

Material necessário para os testes:

- . Fonte DELTA ELEKTRONICA SM7020-D
- . Fonte DELTA ELEKTRONICA E015-2
- . Osciloscópio YOKOGAWA DL1735E
- . 2 x Multímetro TESTEC TT-SI9110
- . Amperímetro TEKTRONIX TM502A
- . Díodo Siemens SSL20100 (D1)
- . Condensador 47mF (Cf)
- . 4 x Condensador 6mF (C0)
- . Bobine 26,5mH (Li)
- . Resistência 660Ohm (Rf)
- . Resistência 150Ohm (R0)
- . Resistência 1800Ohm (R0)
- . Resistência 30Ohm (R1)
- . Resistência 2,8Ohm (RD)
- . Cabos de ligação

Instruções:

- . Ligar o programa "Neumon" que se encontra no Ambiente de Trabalho para efectuar os disparos dos semicondutores
- . Ligar a Fonte E015-2, a uma tensão de 7V como alimentação dos multímetros TESTEC
- . Carregar no botão  para iniciar o Labview
- . Carregar no botão "Iniciar Programa" para iniciar os testes ao módulo de potência
- . Seguir as indicações dadas ao longo do programa, conforme os resultados dos testes
- . Pasta Relatórios irá receber os relatórios de cada teste efectuado, sendo o nome formado pela referência do módulo e a data.
- . O programa sai automaticamente após alguma detecção de avaria ou no fim de todos os testes efectuados

Iniciar Programa


Metropolitano de Lisboa, E.P.E.

Após carregar em iniciar o programa surge uma janela a pedir os dados do utilizador e a referência do módulo A10 Gate Unit à ser usado

Prompt User for Input

Nome do Utilizador

Referência do Módulo A10 Gate Unit

OK

Após preencher os dados e carregar "OK" o programa irá encaminhá-lo para a montagem do módulo A10 Gate Unit

Montagem – Montagem A10 Gate Unit

No menu Montagens encontramos um submenu Montagem do A10 Gate Unit que está descrita as ligações a efectuar-se para realizar os testes rápidos e os testes avançados do módulo A10 Gate Unit.

1. Certificar que a TCU, CCU esta desligada Antes de efectuar qualquer ligação

2. Ligar as fichas X1, X2, e X3 a unidade A1 do módulo A10 Gate Unit

3. Ligar a TCU ao PC através do cabo na conexão G019 (Fig.)

4. Ligar a unidade A50/A60 ao TCU através da carta C023

5. Ligar a unidade A50/A60 ao Módulo A30/A40 através dos cabos representados na Figura.

6. Ligar a Fonte de alimentação da TCU, CCU

7. Ligar o Programa "Neumon" que se encontrar no Ambiente de Trabalho para efectuar os disparos dos semicondutores

Neumon

Efectuar disparo dos semicondutores:

1. Premir "Enter" para que apareça no monitor o símbolo "^^"
2. Escrever "P", aparecendo no monitor "PROGRAMA_DE_TESTE", seguido de "Enter"
3. Escrever "BS", seguido de "Enter", aparecendo no monitor:
TEMPO DE CONDUÇÃO TIRISTOR PRINCIPAL (0...100):
4. Escrever "BS", seguido de "Enter", aparecendo no monitor:
TEMPO DE LIGAÇÃO TRAVAGEM DE RECURP. (0...100):
5. Escrever "15", seguido de "Enter"

Pausa do envio de sinais de disparo:

6. Escrever "BS", seguido de "Enter"

Envio novamente de sinais de disparo:

7. Repetir os passos 4 e 5

Cabo de ligação dos módulos A50/A60 aos terminais GK do tiristor convencional dos módulos A30/A40

Unidades de conexão dos impulsos actuadores A50 e A60

Cabo para ligação da TCU ao PC
Indicação do local onde se liga o cabo

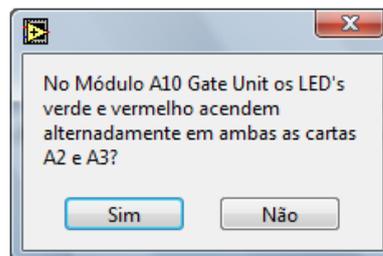
Fichas X1, X2 e X3 e suas ligações a unidade A1 do módulo A10 Gate Unit

Testes

Após efectuar-se todas as ligações necessárias carregar no botão "Testes", o programa passa para o menu A10 Gate Unit, submenu testes rápidos, colocando o utilizador a efectuar o 1º teste.

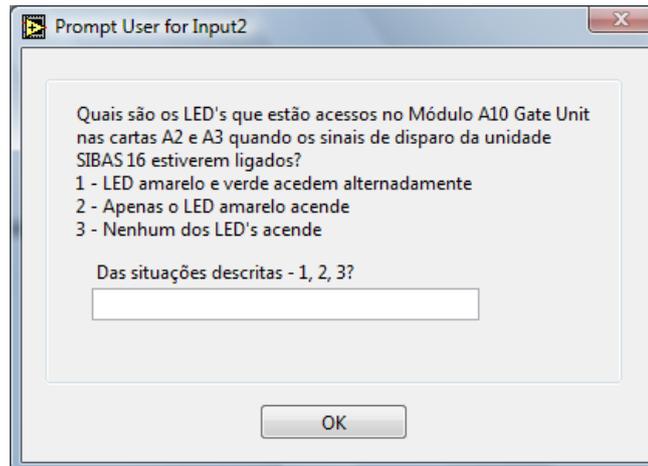
Testes rápidos

O primeiro teste rápido que será efectuado será a verificação dos LED's da Gate Unit, em que o utilizador tem que olhar para a parte de baixo dos módulos e ver na unidade A2 e A3 quais são os LED's que estão acessos, e logo a seguir pode carregar no "Ok"

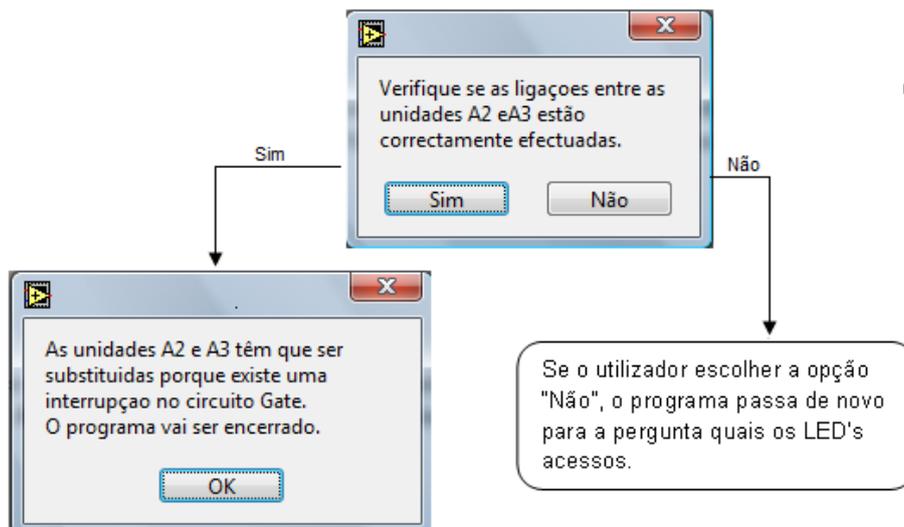


Se o utilizador escolher a opção "Sim" as gates estão a funcionar bem e o programa passa para os testes de Aquisição de sinais do A10 Gate Unit.

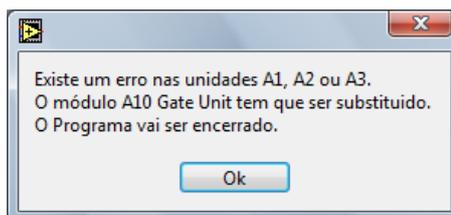
Se o utilizador escolher a opção “Não” é provável que uma das unidades (A1,A2 ou A3) encontra-se avariada e aparece a mensagem abaixo indicada:



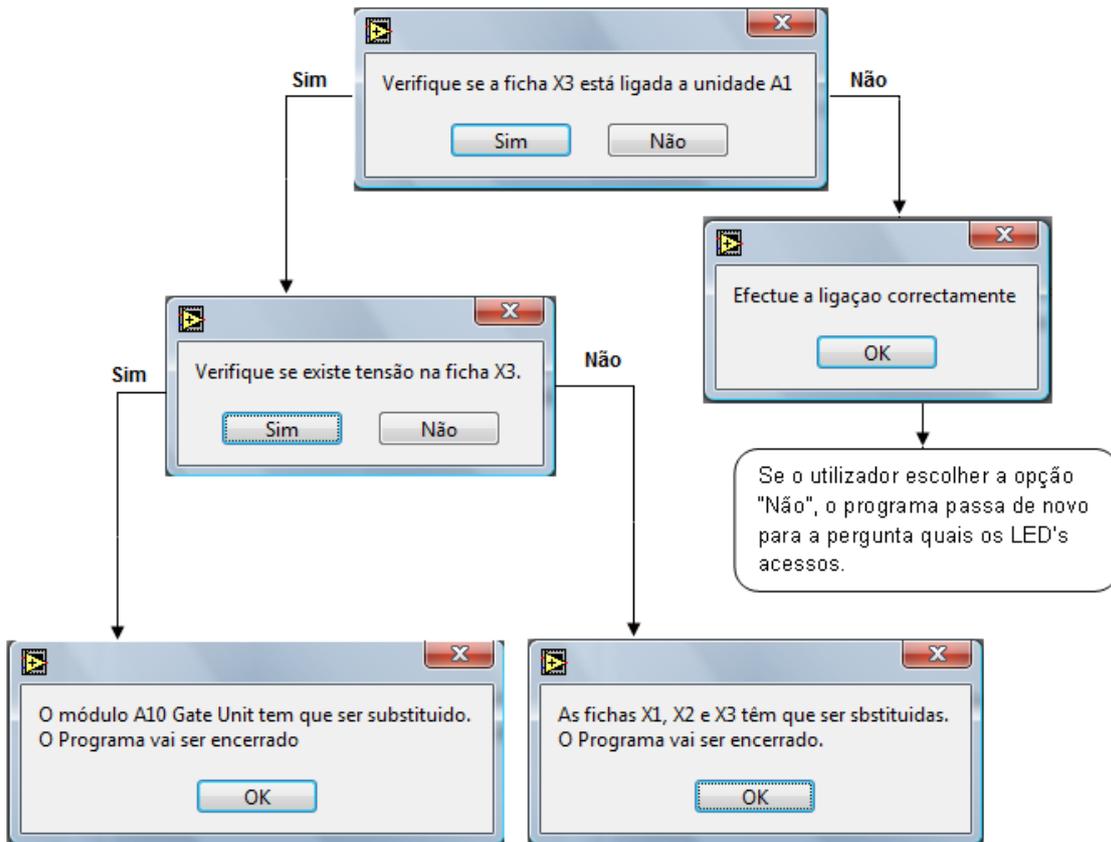
Se o utilizador escolher a opção 1, aparecerá as mensagens que estão abaixo referidas na forma de fluxograma:



Se o utilizador escolher a 2, o módulo encontra-se avariado e aparece a mensagem abaixo referida e sai do programa

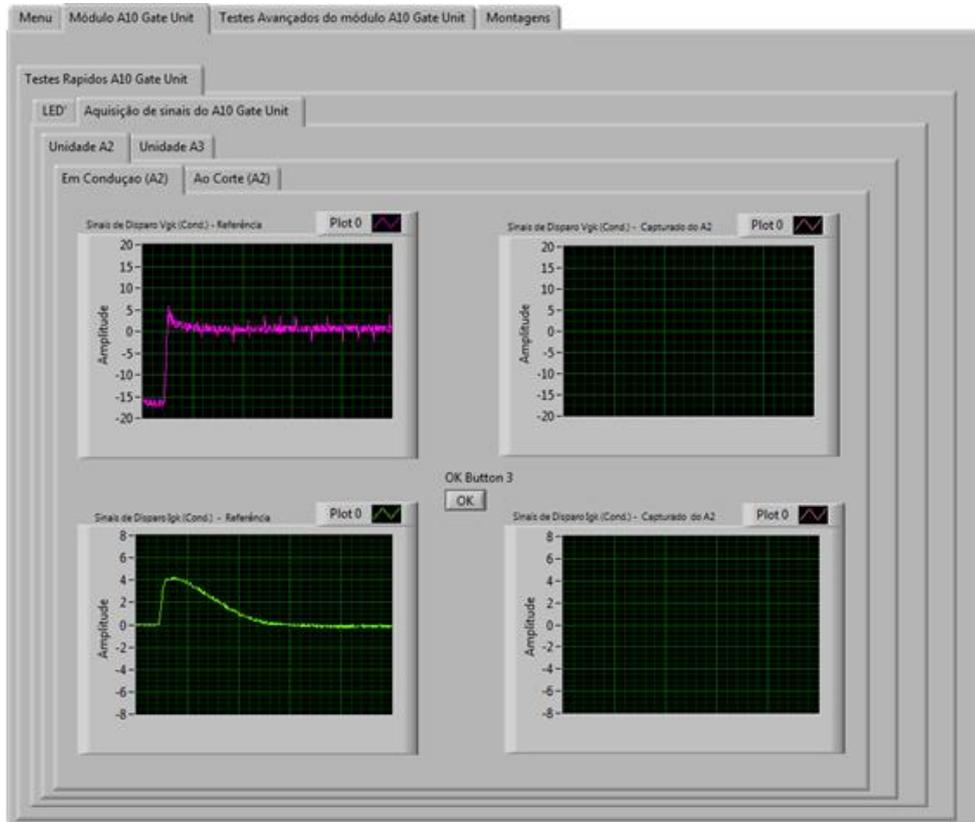


Se o utilizador escolher a opção 3 aparecerá as mensagens abaixo indicadas na forma de fluxograma:

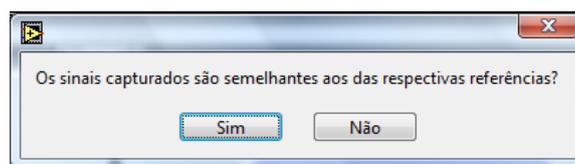


Testes Rápidos – Aquisição de sinais do A10 Gate Unit

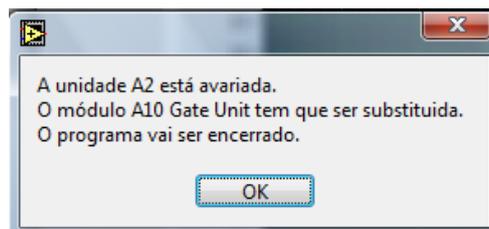
Na aquisição de sinais o 1º teste a ser efectuado é à unidade A2.



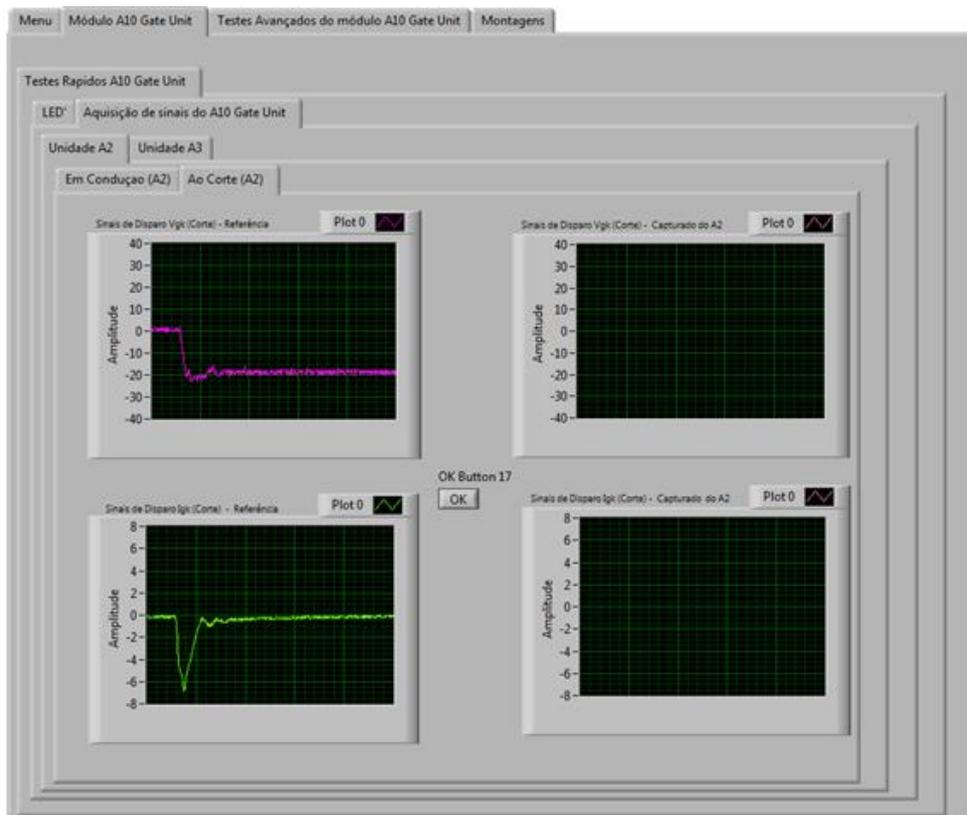
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:



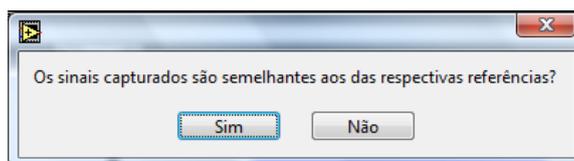
Se o utilizador escolher a opção “Não” o módulo encontra-se avariado e aparece a janela abaixo indicada e sai do programa:



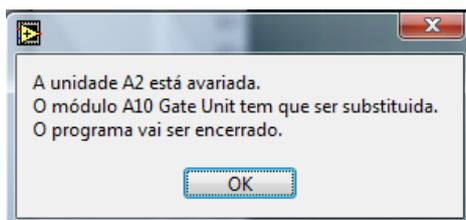
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste à unidade A2 (em condução), em seguida o programa passa para a janela abaixo indicada



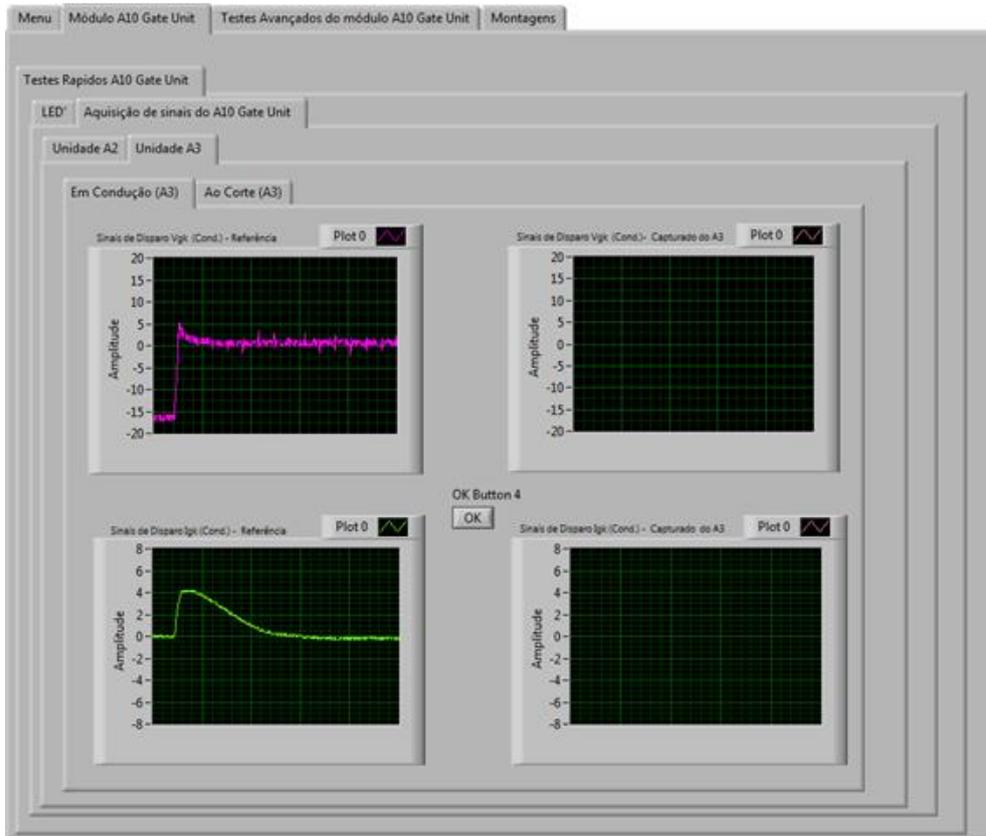
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:



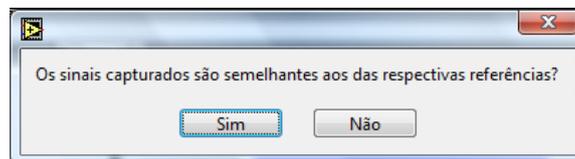
Se o utilizador escolher a opção “Não” o módulo encontra-se avariado e aparece a janela abaixo indicada e sai do programa:



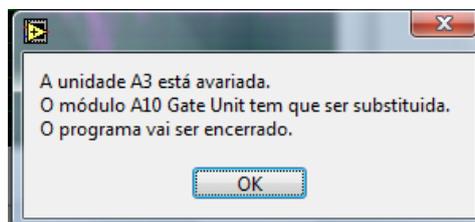
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste à unidade A2 (ao corte), em seguida o programa passa para a janela abaixo indicada



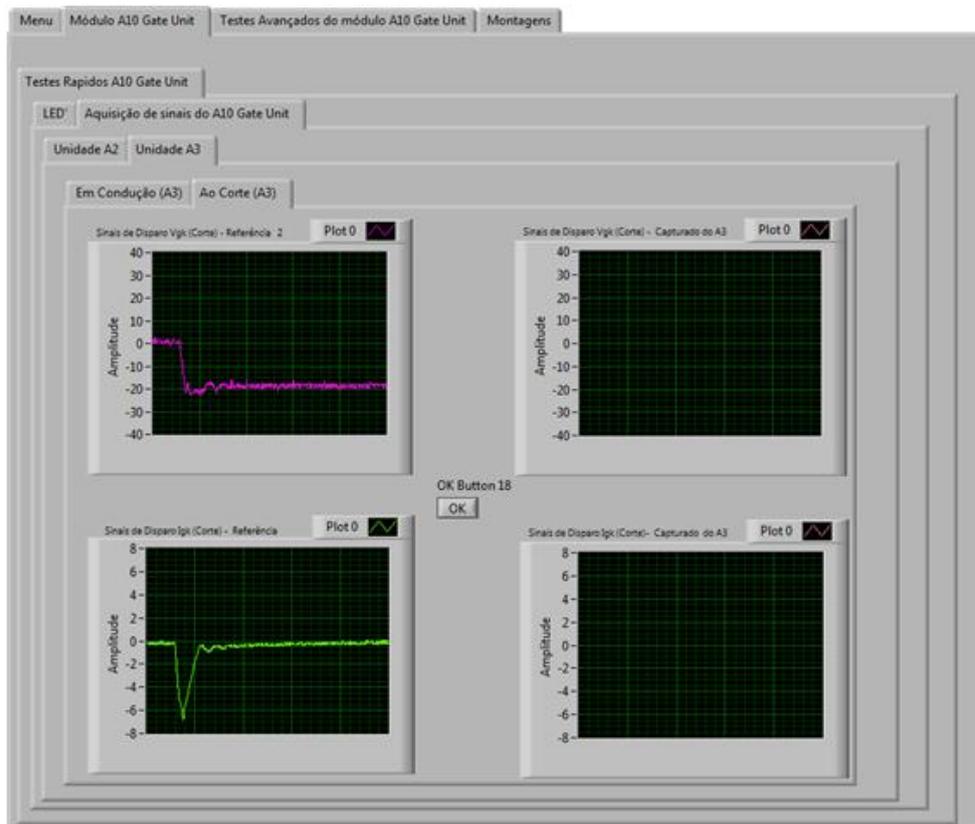
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:



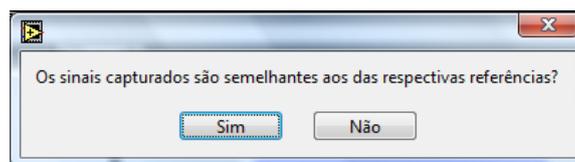
Se o utilizador escolher a opção “Não” o módulo encontra-se avariado e aparece a janela abaixo indicada e sai do programa:



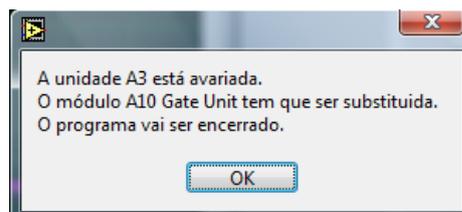
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste à unidade A3 (em condução), em seguida o programa passa para a janela abaixo indicada:



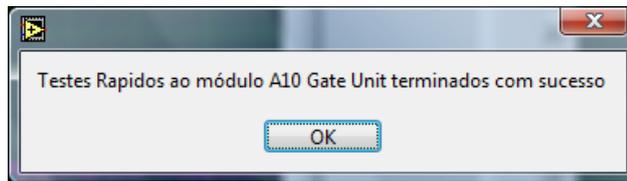
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:



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

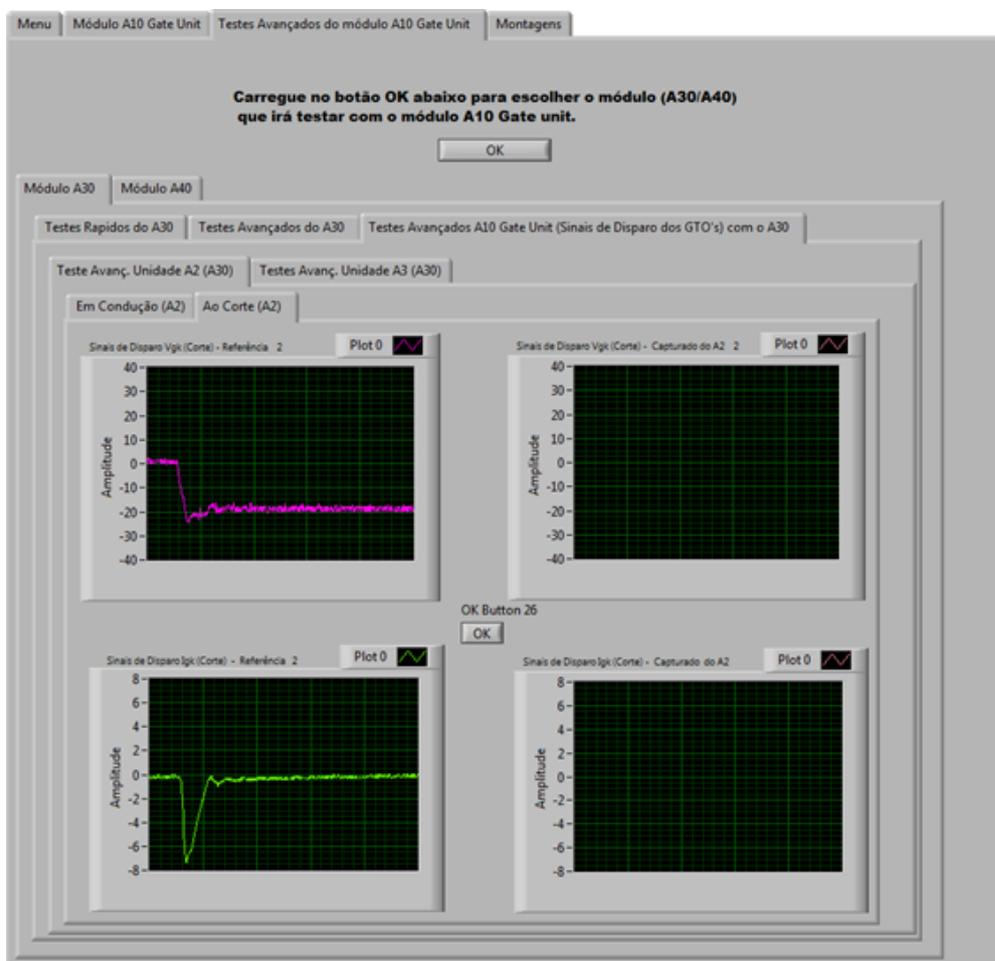


Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste à unidade A3 (ao corte), terminando deste modo os testes rápidos com sucesso



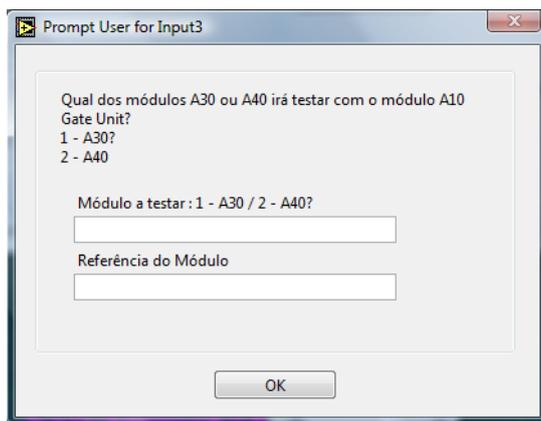
Montagem – Testes Avançados

O programa encaminha o utilizador para a janela apresentada na figura abaixo indicada:

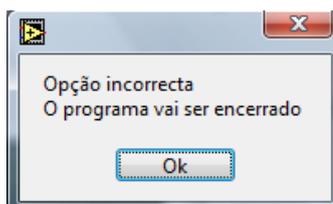


O utilizador terá que carregar “Ok” para poder escolher qual dos módulos (A30/A40) irá utilizar para efectuar os testes avançados do A10 Gate Unit em questão.

O utilizador a carregar no botão “Ok” surge uma janela a pedir informação do módulo que será testado e a sua referência.



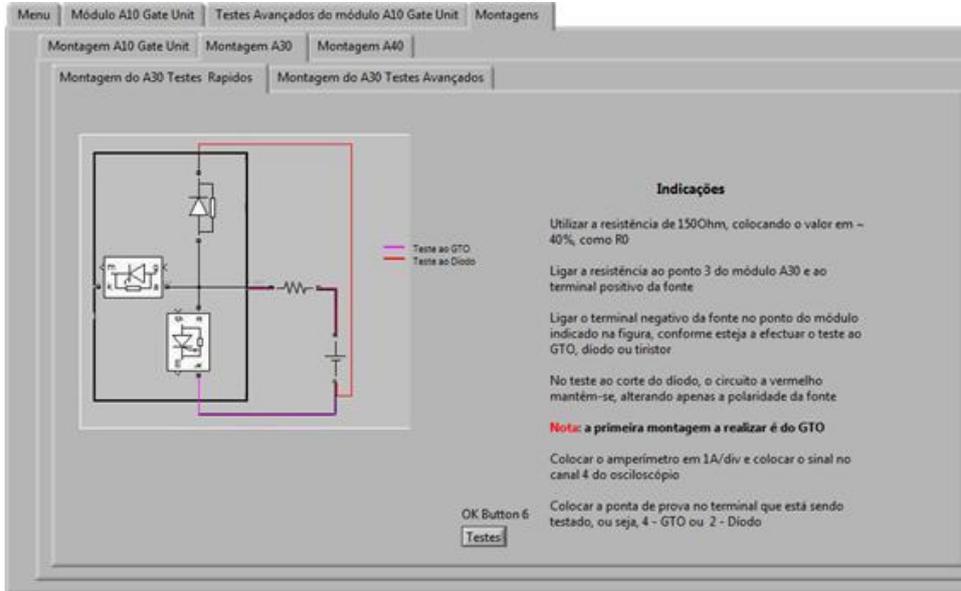
O utilizador terá que escolher o módulo, e o programa vai encaminhá-lo directamente para as montagens correspondentes. Se escolher 1, o programa irá realizar os testes do A30 com o A10 Gate Unit, mas se o escolher 2, o programa irá realizar os testes do A40 com o A10 Gate Unit. Caso o utilizador escolha uma opção diferente, o programa indica opção inválida e é fechado.



Se o utilizador escolher um dos valores correctos (1, ou 2), o programa inicialmente encaminhará o utilizador a efectuar testes rápidos ao módulo escolhido (A30 ou A40) de modo a realizar o máximo de despistes de avarias possíveis.

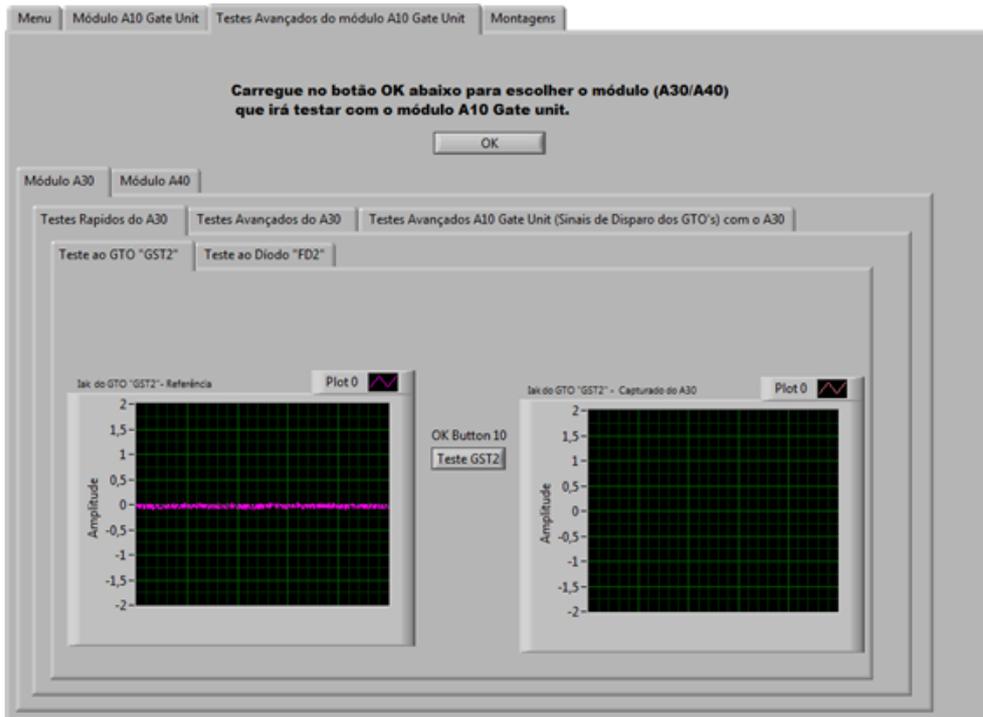
Montagem – Testes Rápidos

No menu Montagens encontramos um submenu Montagem do A30 que está descrita as ligações a efectuar-se para realizar os testes rápidos e os testes avançados do módulo A30

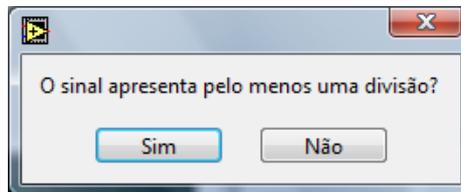


Ao carregar no botão “Testes” o programa passa para o menu Módulo A30, testes rápidos, colocando o utilizador no 1º teste a executar

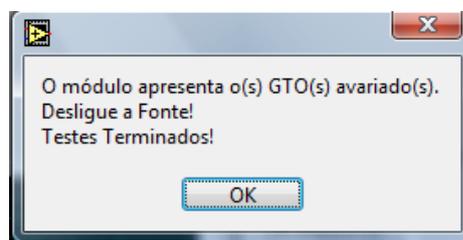
Testes Rápidos do A30



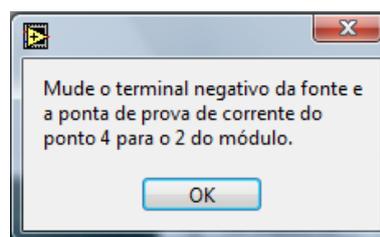
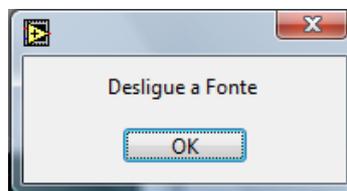
Ao carregar no botão “Teste GST2” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:

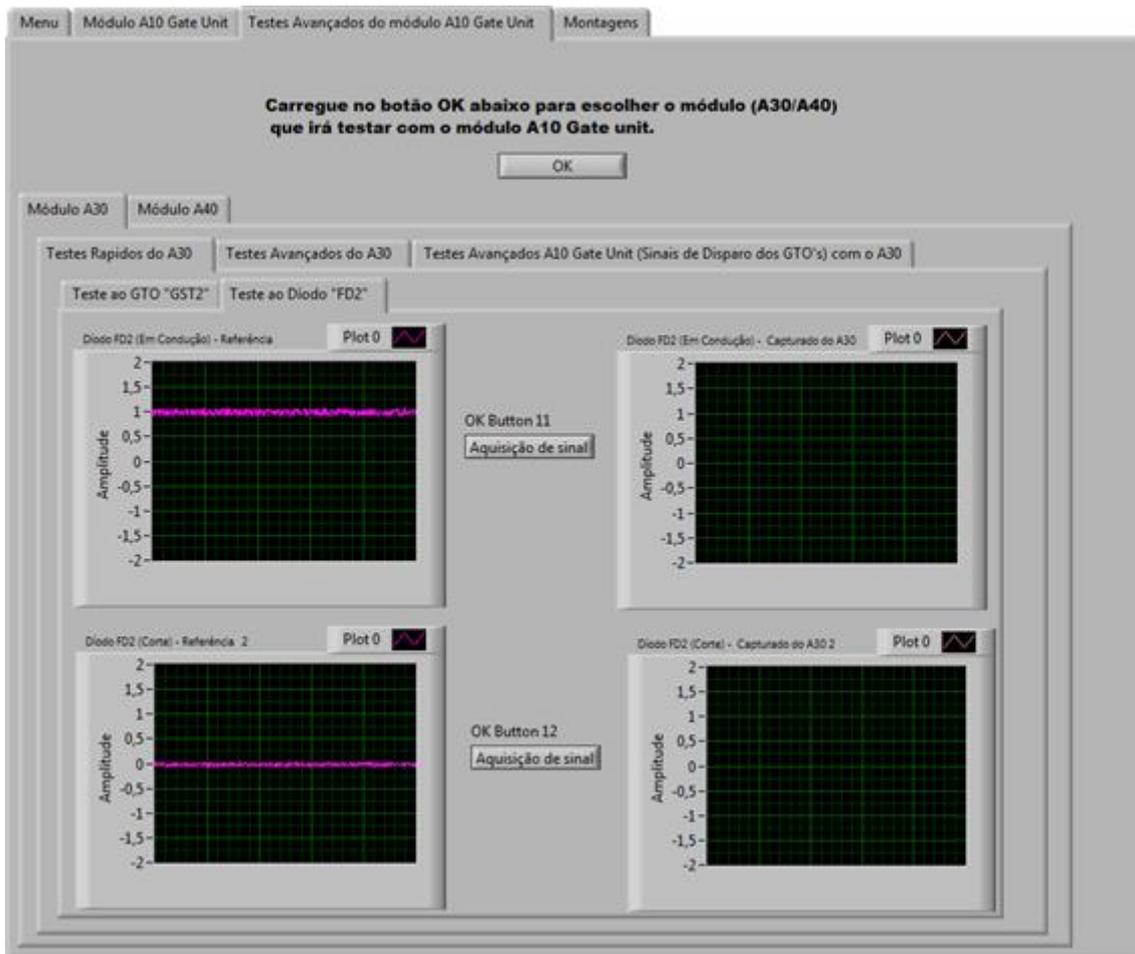


Se o utilizador escolher a opção “Sim” o módulo encontra-se avariado e aparece na janela a mensagem abaixo indicada e sai do programa:



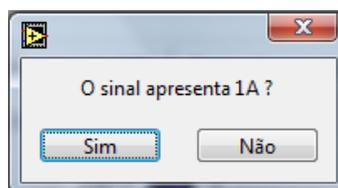
Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo passou com sucesso no teste ao GTOs. O utilizador terá que executar as alterações necessárias para efectuar o teste seguinte:



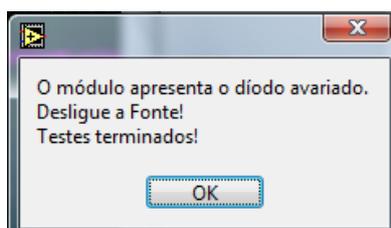


Nos testes ao Díodo FD2, vai se testar o díodo em condução e ao corte, em que ordem de execução dos testes é de cima para baixo.

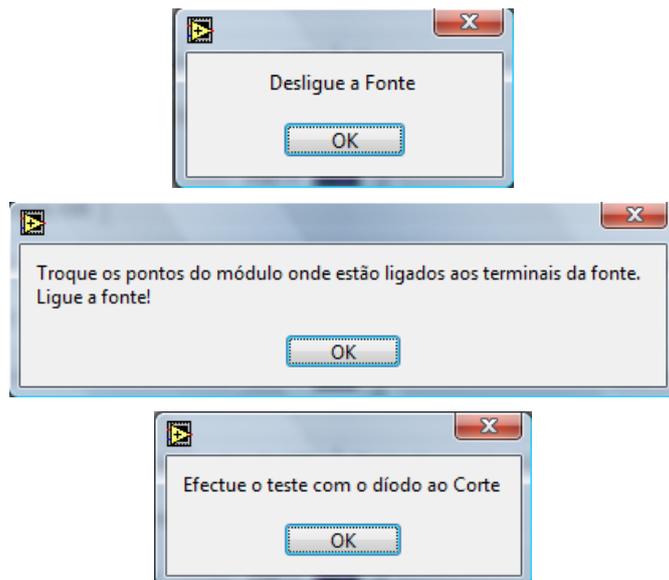
Ao carregar no botão “Aquisição de sinal” (Díodo em condução) o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a seguinte janela:



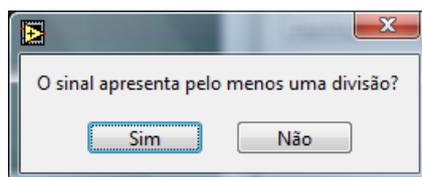
Se o utilizador escolher a opção “Não” o módulo encontra-se avariado e aparece na janela a mensagem abaixo indicada e sai do programa:



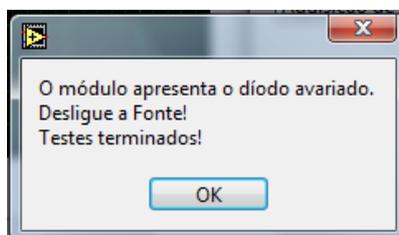
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o díodo será agora testado na situação de corte.



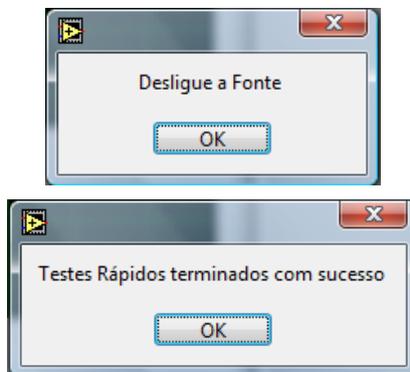
Ao carregar no botão “Aquisição de sinal” (Díodo ao corte) o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a seguinte janela:



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

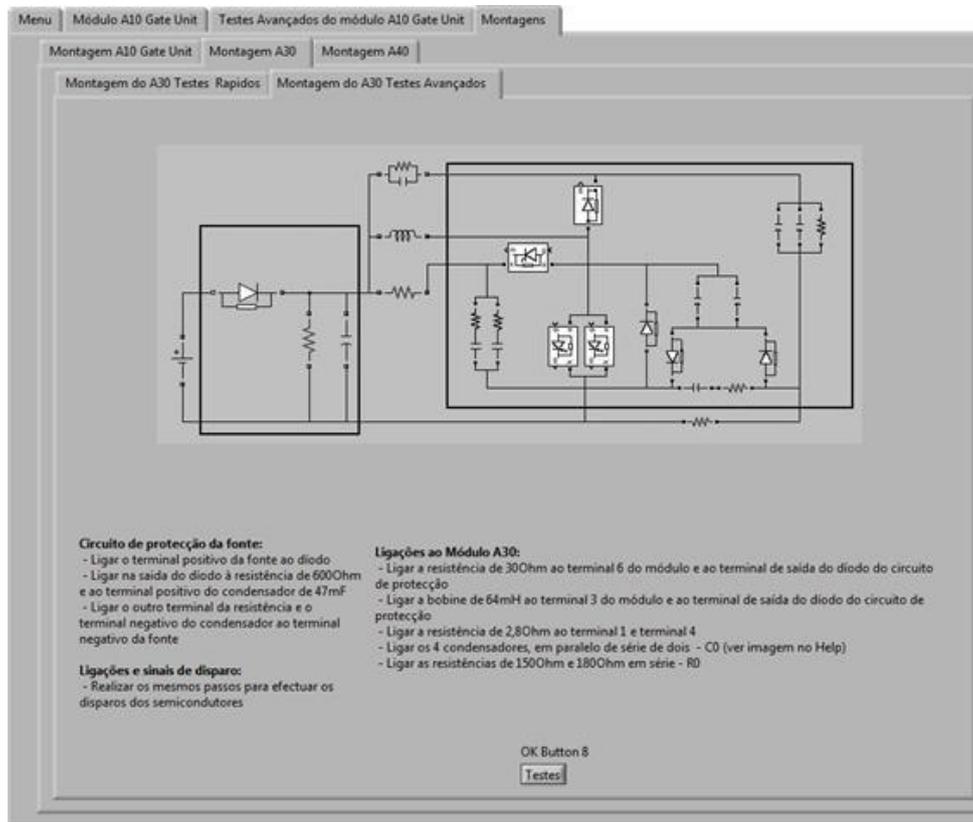


Se o utilizador escolher a opção “Não”, o módulo passou com sucesso no teste ao díodo, terminando os testes rápidos. Seguindo a informação que se segue:

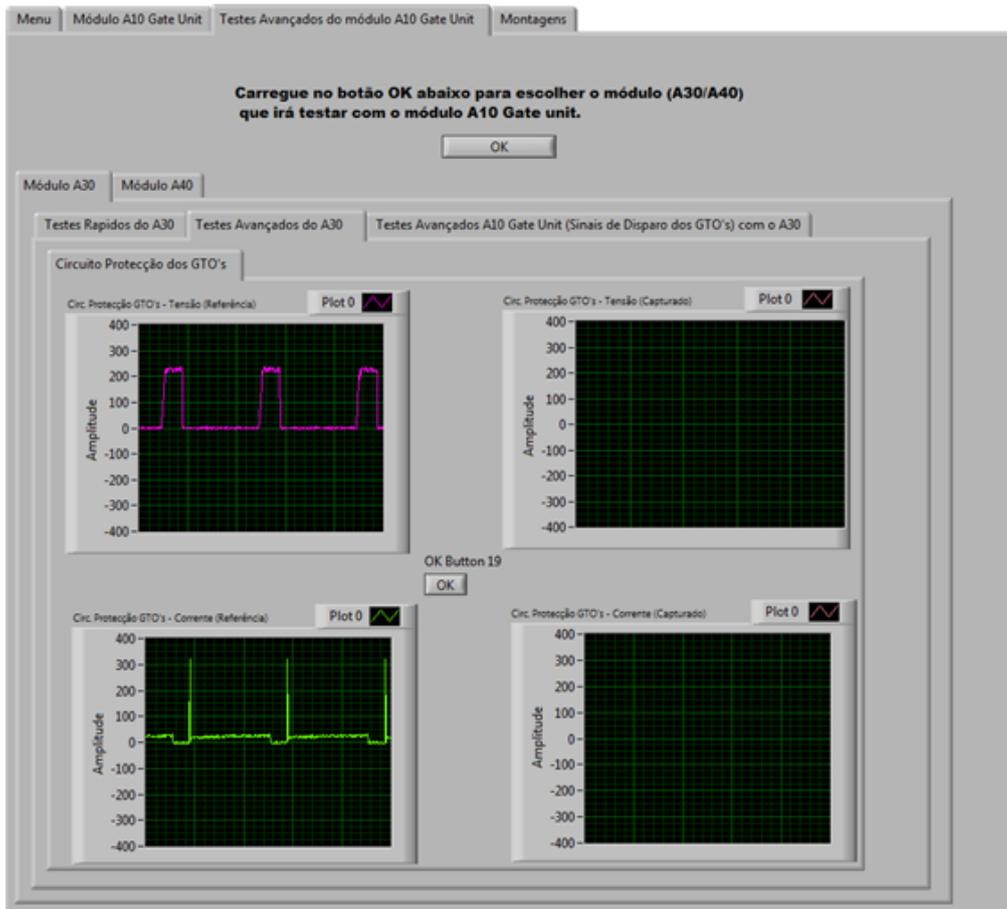


Montagem – Testes Avançados

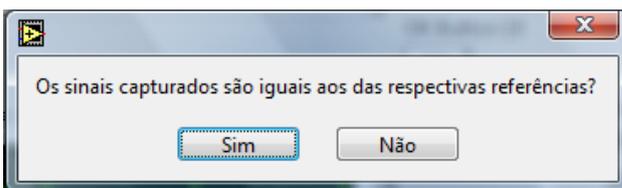
O programa encaminha o utilizador para a janela apresentada na figura abaixo indicada:



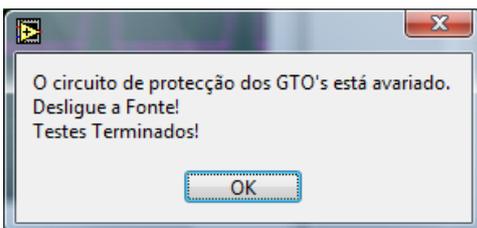
Ao carregar no botão “Testes” o programa passa para o menu Módulo A30, testes avançados, colocando o utilizador no 1º teste a executar:



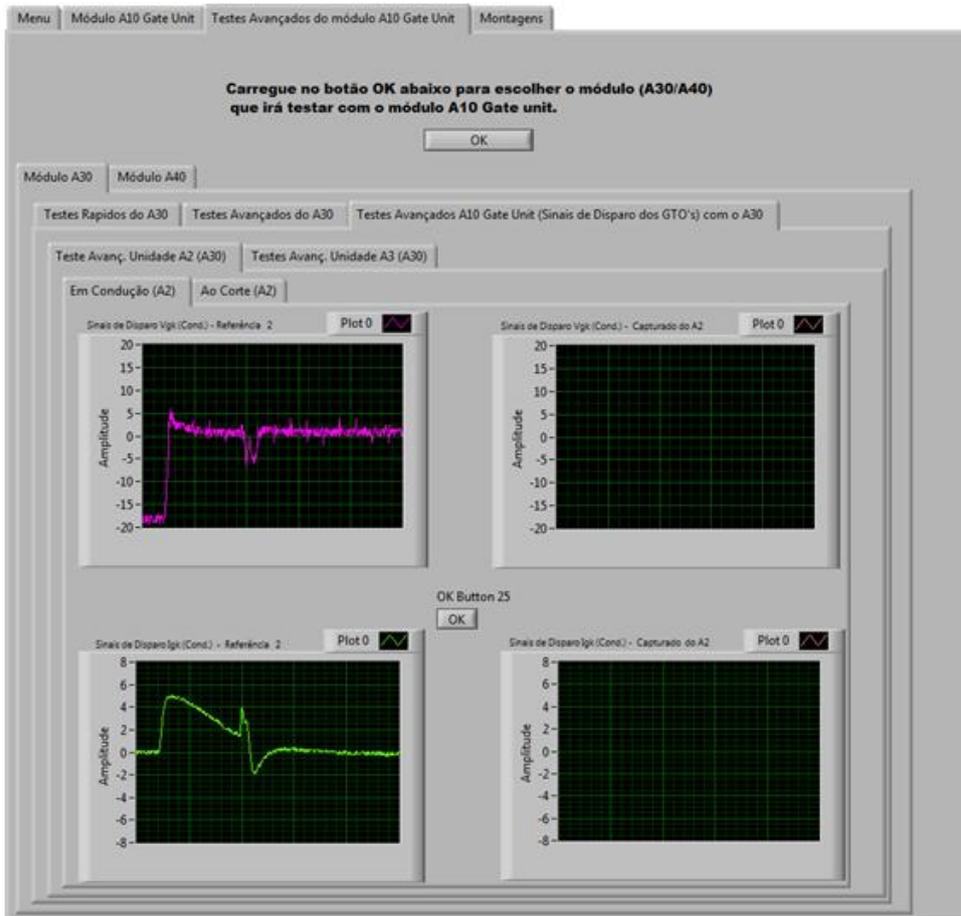
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar os sinais do osciloscópio para a Janela dos sinais capturados, aparecendo na janela a mensagem abaixo indicada:



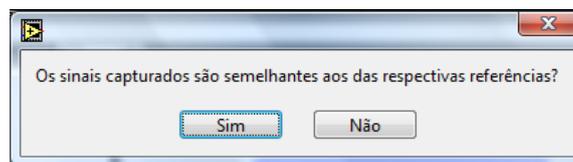
Se o utilizador escolher a opção “Não” o módulo encontra-se avariado e aparece na janela a mensagem abaixo indicada e sai do programa:



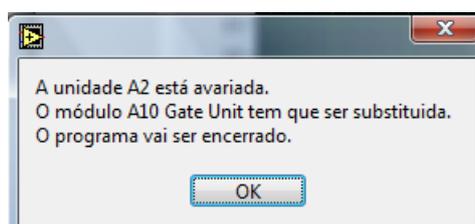
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste ao circuito de protecção dos GTOs. Em seguida o programa passa para a janela abaixo indicada:



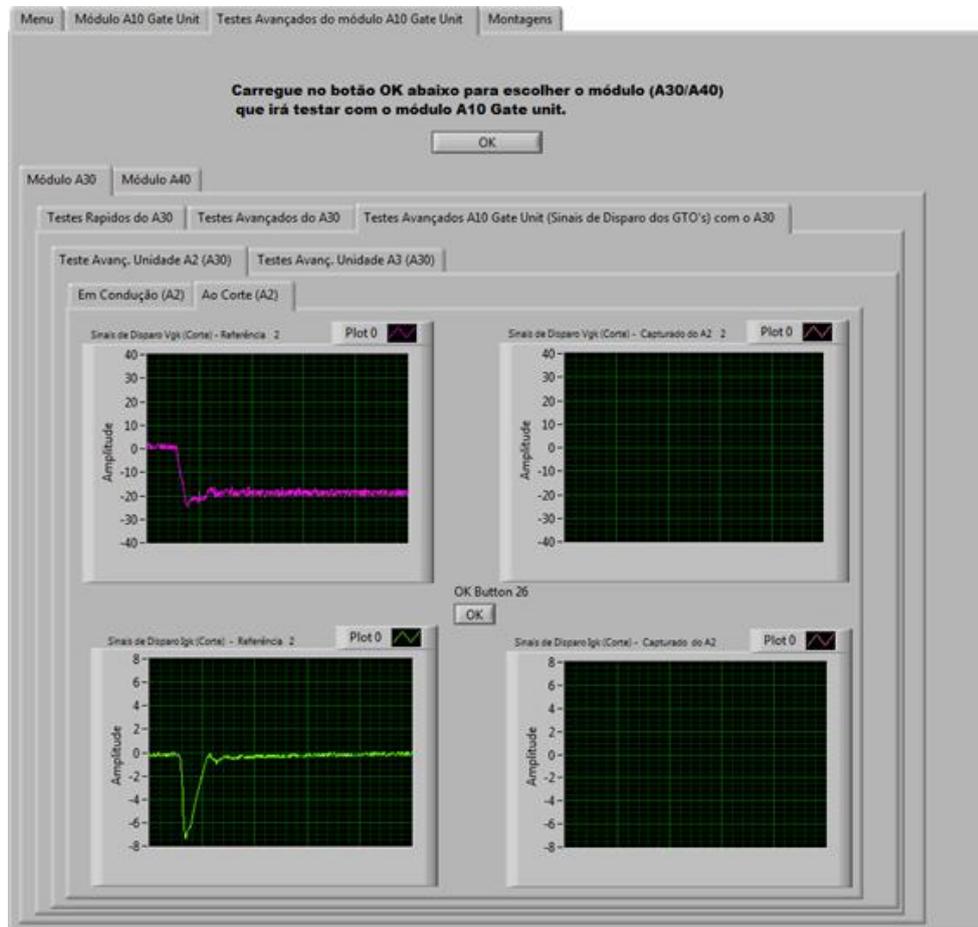
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:



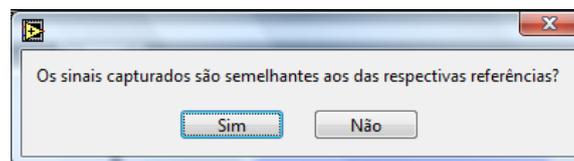
Se o utilizador escolher a opção “Não” o módulo encontra-se avariado e aparece a janela abaixo indicada e sai do programa:



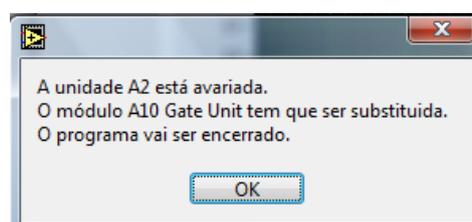
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste à unidade A2 (em condução), em seguida o programa passa para a janela abaixo indicada



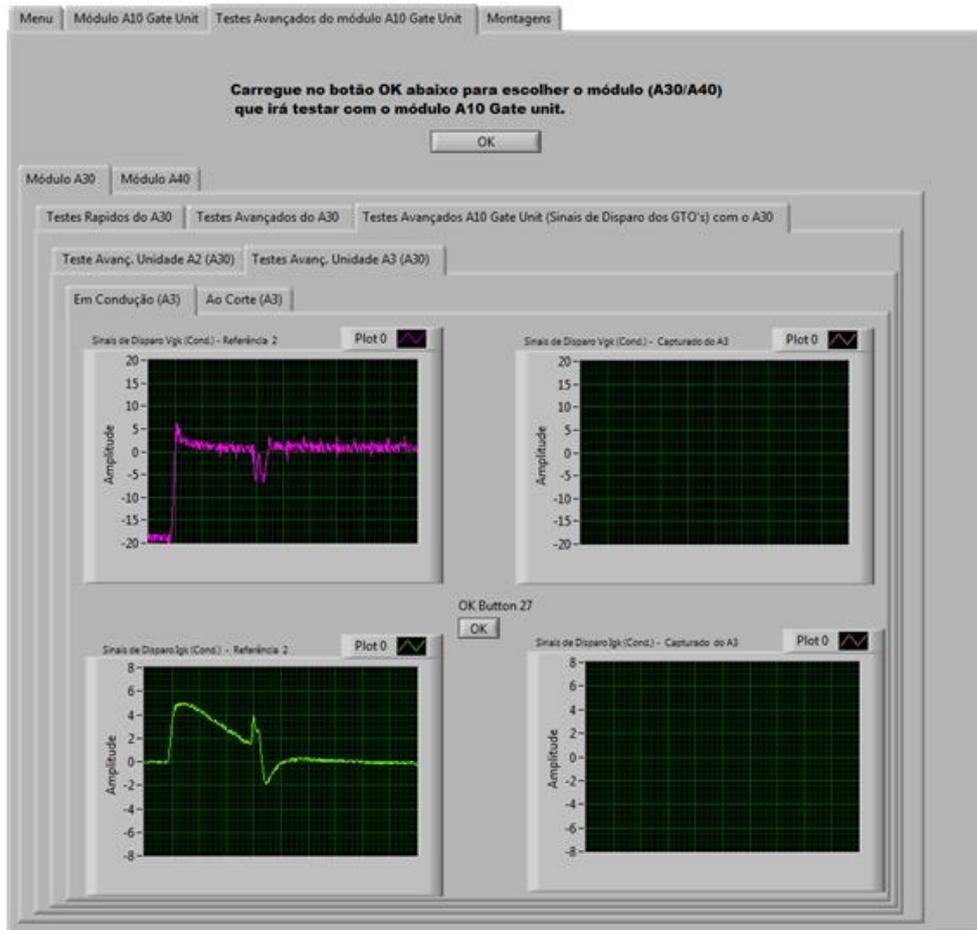
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:



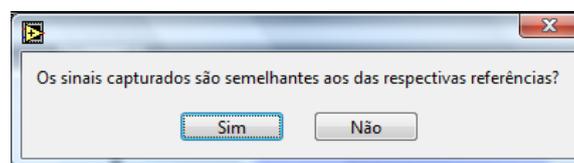
Se o utilizador escolher a opção “Não” o módulo encontra-se avariado e aparece a janela abaixo indicada e sai do programa:



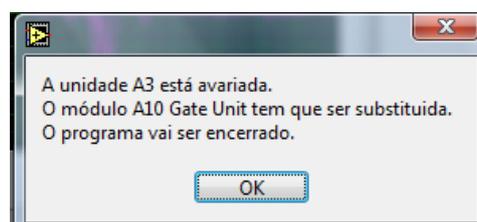
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste à unidade A2 (ao corte), em seguida o programa passa para a janela abaixo indicada



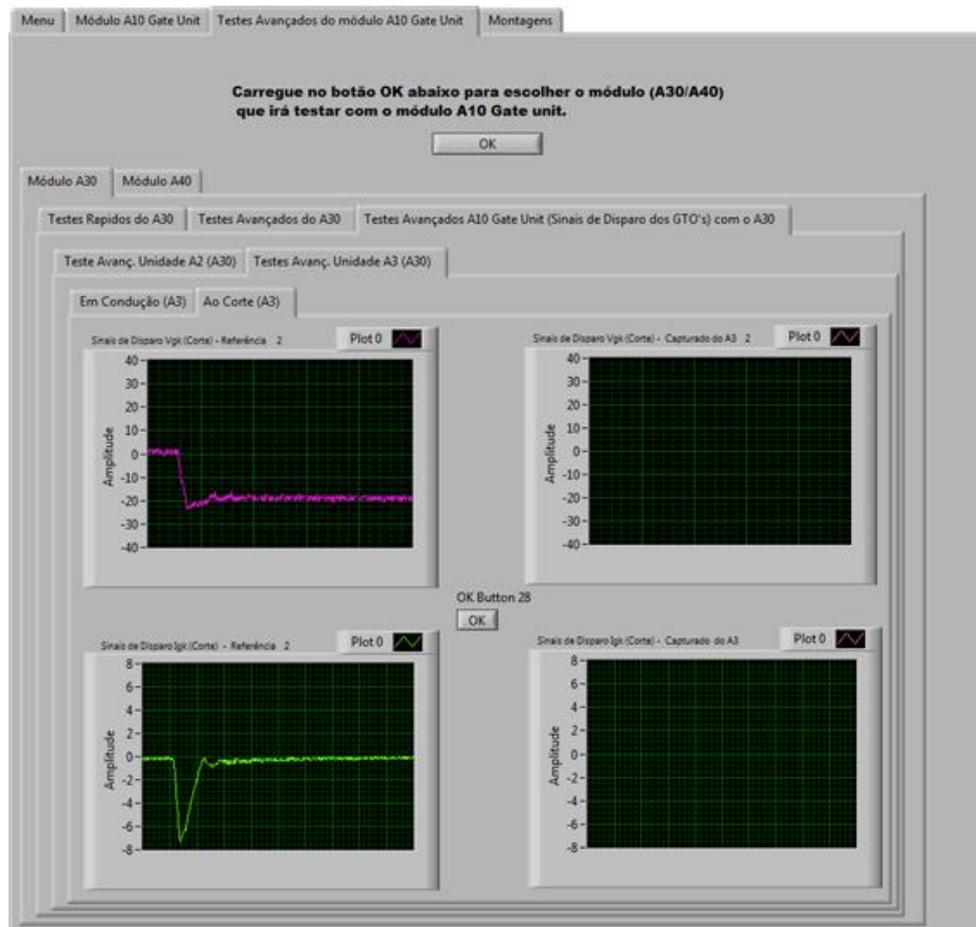
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:



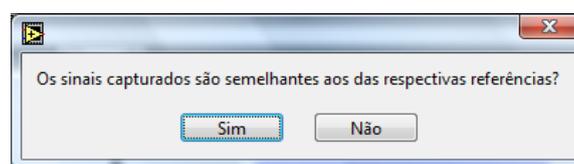
Se o utilizador escolher a opção “Não” o módulo encontra-se avariado e aparece a janela abaixo indicada e sai do programa:



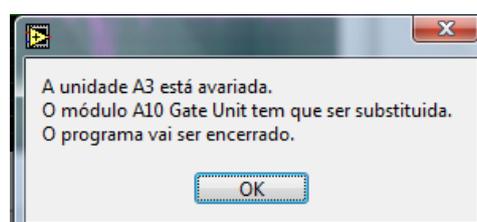
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste à unidade A3 (ao corte), em seguida o programa passa para a janela abaixo indicada:



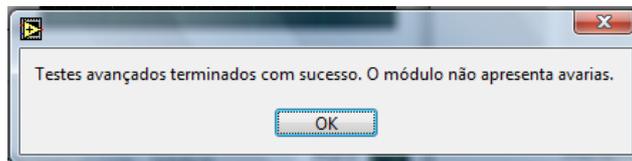
Ao carregar no botão “Ok” o programa vai copiar o sinal do osciloscópio para a Janela do sinal capturado, aparecendo a janela abaixo indicada:



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



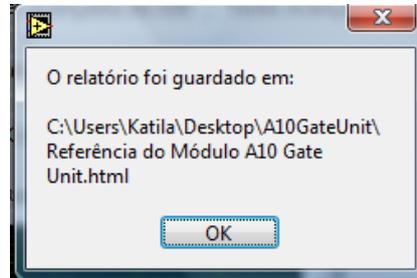
Se o utilizador escolher a opção “Sim”, o módulo passou com sucesso no teste à unidade A3 (ao corte), terminando deste modo os testes avançados com sucesso



Aqui, apenas foi apresentado no caso de o utilizador escolher o módulo A30 para efectuar os testes avançados do módulo A10 Gate Unit, mas no Manual do Utilizador temos também a situação no caso do utilizador escolher o módulo A40 para efectuar os testes Avançados do módulo A10 Gate Unit.

Relatório

Quando o programa termina, no caso de sucesso ou quando um dos módulos apresenta uma avaria, num dos testes efectuados, aparece uma janela com a mensagem da localização do ficheiro que é criado com o relatório dos testes efectuados.



O nome do ficheiro é a referência do módulo A10 Gate Unit, que o utilizador indica no início do Programa.

Relatório de Testes Módulo A10 Gate Unit

```
Nome do Utilizador - Nome do Utilizador
10-09-2010
03:11

Referência do Módulo A10 Gate Unit - Referência do Módulo A10 Gate
Unit

TESTES RÁPIDOS DO MÓDULO A10 GATE UNIT
LED's ..... Com Sucesso
Unidade A2 ..... Com Sucesso
Unidade A3 ..... Com Sucesso
TESTES AVANÇADOS DO MÓDULO A10 GATE UNIT
Unidade A2 ..... Com Sucesso
Unidade A3 ..... Com Sucesso

Módulo a testar : 1 - A30 / 2 - A40 - 1

Referência do Módulo (A30/A40) - Referência do Módulo
TESTES RÁPIDOS DO MÓDULO A30/A40
GTO's ..... Sem Sucesso
Díodo ..... Com Sucesso
TESTES AVANÇADOS DO MÓDULO A30/A40
Circuito de Proteção dos GTO's ..... Com Sucesso

AVARIAS:
Avarias não registadas nos testes efectuados.
```

Metropolitano de Lisboa, EPE

Programa para efectuar os disparos dos semicondutores

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

O terminal existente no banco de ensaios tem o nome de “Neumon”.

O utilizador terá que entrar no programa e seguir as indicações antes de realizar cada os testes do Módulo A10 Gate Unit, seja para testes rápidos ou avançados:

- (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 (6) e (7).

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

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