



**Universidade do Minho**



## High Voltage Wiring Harness Test Equipment

Projeto n.º 2013/34065

Divmac - Projectos Automatismos e Periféricos Industriais, SA

**J. G. Pinto**

**Raul Almeida**

**José Cunha**

**Luís Freire**

**J. C. Aparício Fernandes**

**Júlio S. Martins**

**João L. Afonso**

## ÍNDICE

<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Trabalho Realizado e Resultados Alcançados.....</b>	<b>4</b>
2.1 Fonte de Alimentação Programável de Baixa Tensão .....	4
2.1.1 <i>Especificações da Fonte</i> .....	4
2.1.2 <i>Estágio de Alimentação da Fonte</i> .....	5
2.1.3 <i>Estágio de Saída da Fonte</i> .....	6
2.1.4 <i>Estágio de Controlo da Fonte</i> .....	9
2.1.5 <i>Estágio de Instrumentação da Fonte</i> .....	10
2.1.6 <i>Implementação da Fonte de Alimentação</i> .....	14
2.1.7 <i>Desenvolvimento de Circuitos Auxiliares de Teste</i> .....	15
2.2 Matriz de Comutação de Alta Tensão .....	16
2.2.1 <i>Seleção dos Interruptores da Matriz</i> .....	16
2.2.2 <i>Mecanismos de Proteção da Matriz</i> .....	17
2.3 Fonte de Alimentação Programável de Alta Tensão.....	18
2.3.1 <i>Especificações da Fonte de Alta Tensão</i> .....	18
2.3.2 <i>Topologia da Fonte de Alta Tensão</i> .....	19
2.3.3 <i>Comparação das Topologias</i> .....	24
2.3.4 <i>Instrumentação da Fonte de Alta Tensão</i> .....	25
<b>3. Conclusões .....</b>	<b>28</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos da fonte de alimentação programável de baixa tensão.....	5
Figura 2 – Esquema principal do estágio de alimentação da fonte programável de baixa tensão. ....	6
Figura 3 – Resultados de simulação do estágio de alimentação da fonte programável de baixa tensão. ....	6
Figura 4 – Esquema simplificado do estágio de saída da fonte de alimentação programável de baixa tensão...	7
Figura 5 – Resultados experimentais obtidos com a fonte de alimentação programável de baixa tensão: (a) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal quadrangular de 1 kHz e carga puramente resistiva; (b) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga puramente resistiva; (c) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga indutiva; (d) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga capacitiva; (e) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga puramente resistiva; (e) Espectro harmónico da tensão de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga puramente resistiva.....	8
Figura 6 – Placa de controlo da <i>Texas Instruments TMDSCNCD28335</i> . ....	10
Figura 7 – Esquema de medição de corrente no na linha de retorno. ....	11
Figura 8 – Esquema de ligação dos amplificadores operacionais às resistências de medida.....	12
Figura 9 – Medição de corrente no lado da alimentação positiva da fonte. ....	12
Figura 10 – Esquema geral da colocação das resistências para medição das grandezas elétricas. ....	13
Figura 11 – Esquema do circuito de medição de resistências e condensadores.....	14
Figura 12 – Modelo distribuído de uma linha de transmissão. ....	14
Figura 13 – Esquema simplificado da fonte de alimentação programável de baixa tensão. ....	15
Figura 14 – Esquema elétrico das fontes de corrente de precisão desenvolvidas: (a) Fonte de corrente de 1 mA; (b) Fonte de corrente de 1 A. ....	15
Figura 15 – Configuração da matriz de comutação de alta tensão. ....	16
Figura 16 – Exemplo de relés do fabricante <i>Pickering</i> com contactos de potência acessíveis pela parte superior: (a) Com contactos da bobina para PCB; (b) Com contactos da bobina acessíveis pela parte superior.....	17
Figura 17 – Esquema de proteção da matriz com resistências de descarga. ....	18
Figura 18 – Topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência.....	20
Figura 19 – Resultados de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência. ....	20
Figura 20 – Topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de baixa tensão. ....	21
Figura 21 – Resultados de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de baixa tensão. ....	22
Figura 22 – Topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de alta tensão.....	23
Figura 23 – Resultados de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência com conversor linear de alta tensão. ....	24
Figura 24 – Esquema de ligação das resistências de medição da corrente na linha de retorno da fonte de alta tensão. ....	25
Figura 25 – Esquema de ligação dos amplificadores operacionais às resistências de medida. ....	26
Figura 26 – Diagrama de blocos dos circuitos de instrumentação de corrente na linha de alta tensão da fonte. ....	27
Figura 27 – Esquema geral da colocação das resistências de medida na fonte de alta tensão. ....	27

## 1. Introdução

Este relatório tem por objetivo descrever as atividades desenvolvidas pela Associação Universidade - Empresa para o Desenvolvimento – TecMinho, no âmbito do projeto “High Voltage Wiring Harness Test Equipment”.

Trata-se de um projeto da Divmac - Projetos Automatismos e Periféricos Industriais, SA, para o desenvolvimento de um equipamento para teste de cablagem para a indústria aeronáutica e ferro carril, para o qual, a TecMinho foi subcontratada para participar na realização de estudos, especificação e desenvolvimento de alguns dos módulos funcionais, nomeadamente:

- Desenvolvimento de uma fonte de alimentação programável de baixa tensão.
  - Estudo da melhor topologia de conversores eletrónicos de potência para obter uma fonte de tensão e de corrente ajustáveis, e com funcionamento nos modos *Source* e *Sink*;
  - Estudo e especificação dos componentes necessários para realizar medições de corrente e tensão com elevada precisão;
  - Construção de um protótipo laboratorial da fonte programável de baixa tensão.
- Consultoria e assistência técnica no desenvolvimento de uma fonte de alta tensão.
  - Estudo da melhor topologia de conversores eletrónicos de potência para obter uma fonte de tensão DC ajustável até 6000 V, e AC sinusoidal ajustável até 6000 V (valor de pico);
  - Estudo da melhor solução técnica que garanta as seguintes características:
    - Implementação de um limite de corrente ajustável;
    - Utilização da fonte para efetuar a medição de resistência de isolamento e de rigidez dielétrica;
    - Proteção anti-arco, de curto-circuito, de sobretensão e de temperatura excessiva, incluindo proteções implementadas diretamente por hardware.
- Consultoria e assistência técnica no desenvolvimento de uma Matriz de Comutação de Alta Tensão.
  - Estudo dos componentes e do *layout* mais adequados para as matrizes de comutação;
  - Assistência na definição dos ensaios preliminares aos componentes da Matriz de Comutação de Alta Tensão (com baixa corrente).

## 2. Trabalho Realizado e Resultados Alcançados

### 2.1 Fonte de Alimentação Programável de Baixa Tensão

Neste tópico são descritas as atividades realizadas no âmbito do desenvolvimento da fonte de alimentação programável de baixa tensão. Relativamente a este módulo funcional a TecMinho ficou responsável pelo estudo da melhor topologia de conversores eletrónicos de potência para obter uma fonte de tensão e corrente ajustável, e com funcionamento nos modos *Source* e *Sink*. Isto foi realizado através do estudo e especificação dos componentes necessários para realizar medições de corrente e tensão com elevada precisão, e pela construção de um protótipo laboratorial.

Numa fase inicial são apresentadas as especificações pretendidas para a fonte, tendo em conta a sua utilização no equipamento de teste de cablagem. Seguidamente são descritos os diversos estágios que constituem a fonte e são apresentados os resultados de simulação e experimentais obtidos com o protótipo desenvolvido.

#### 2.1.1 Especificações da Fonte

Após análise detalhada do conjunto de ensaios que se pretende fazer com o equipamento, foi realizada uma análise das funcionalidades que deveriam ser embutidas na fonte programável de baixa tensão para permitir a realização desses testes, obtendo-se as seguintes especificações:

- Tensão ajustável;
- Corrente ajustável;
- Funcionamento como *Source/Sink*;
- Medições a 2 e 4 pontos;
- Três modos de funcionamento:
  - Tensão constante: Mantem a tensão constante programada desde que não seja atingido o limite de corrente programado;
  - Corrente constante: Mantem a corrente constante programada desde que não seja atingido o limite de tensão programada;
  - Teste: Executa um ciclo de medição completo guardando o valor de tensão e corrente medidos (gera rampa de subida da tensão programada, aguarda tempo de estabilização programado, efetua medição e gera rampa de descida de tensão).

- Proteção anti-arco, de curto-circuito, de sobre tensão e de temperatura excessiva;
- Possibilidade de isolar eletricamente as linhas SEP/SEN entre a fonte e o exterior através de dois relés em série (redundância);
- Incorporação de uma linha de segurança externa que desarme a fonte (por exemplo cortando a alimentação dos relés) quando está a flutuar, e com rearme quando ligada a 0 V;
- Incorporação de uma função que permita gravar em conjunto as leituras do voltímetro e do amperímetro durante um intervalo de tempo limitado (dependendo da memória disponível) depois de ser definida uma base de tempo para as leituras e para as escalas do voltímetro e amperímetro.

Para facilitar o desenvolvimento dos diversos circuitos necessários para a fonte de alimentação programável de baixa tensão, foi idealizada uma arquitetura modular em que a fonte é dividida em quatro estágios principais, de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 1.

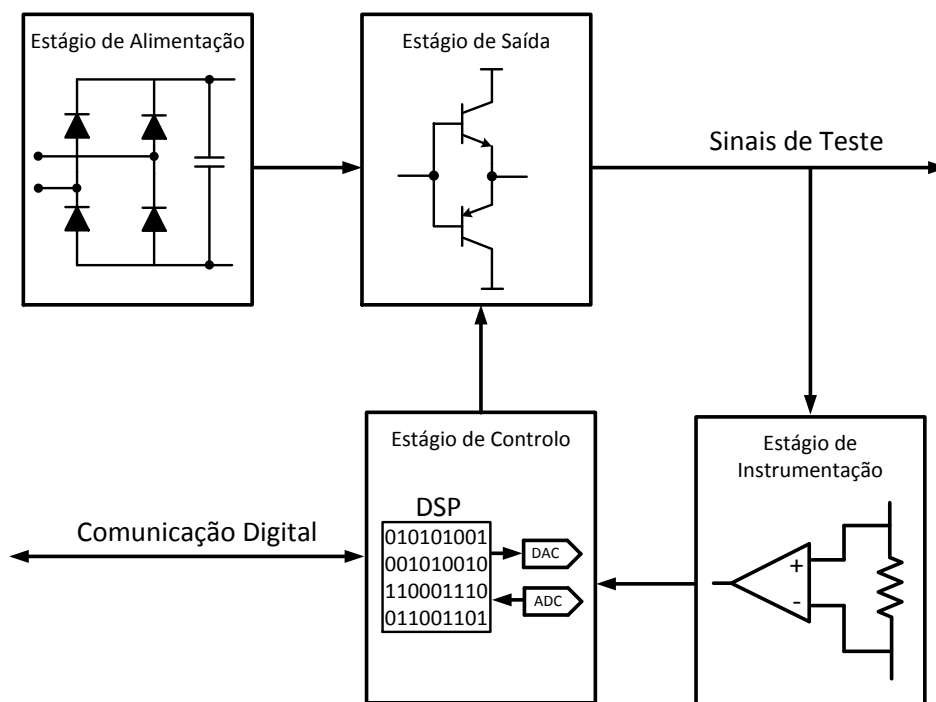


Figura 1 – Diagrama de blocos da fonte de alimentação programável de baixa tensão.

### 2.1.2 Estágio de Alimentação da Fonte

A fonte deve ser alimentada diretamente a partir da rede elétrica, sendo o estágio de alimentação da fonte responsável por produzir todos os níveis de alimentação necessários aos diversos circuitos da fonte, a partir de com uma tensão alternada sinusoidal com valor

eficaz de 230 V e frequência de 50 Hz. Na Figura 2 apresenta-se o esquema principal do estágio de alimentação da fonte programável de baixa tensão.

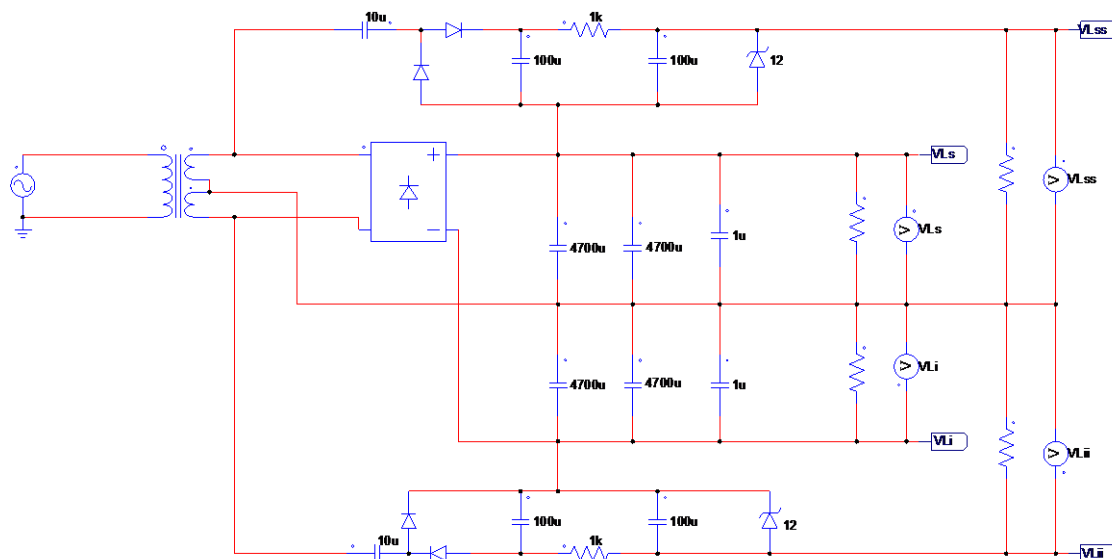


Figura 2 – Esquema principal do estágio de alimentação da fonte programável de baixa tensão.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados de simulação obtidos com o esquema da Figura 2. Como é possível verificar o circuito produz quatro tensões com valores muito próximos dos pretendidos.

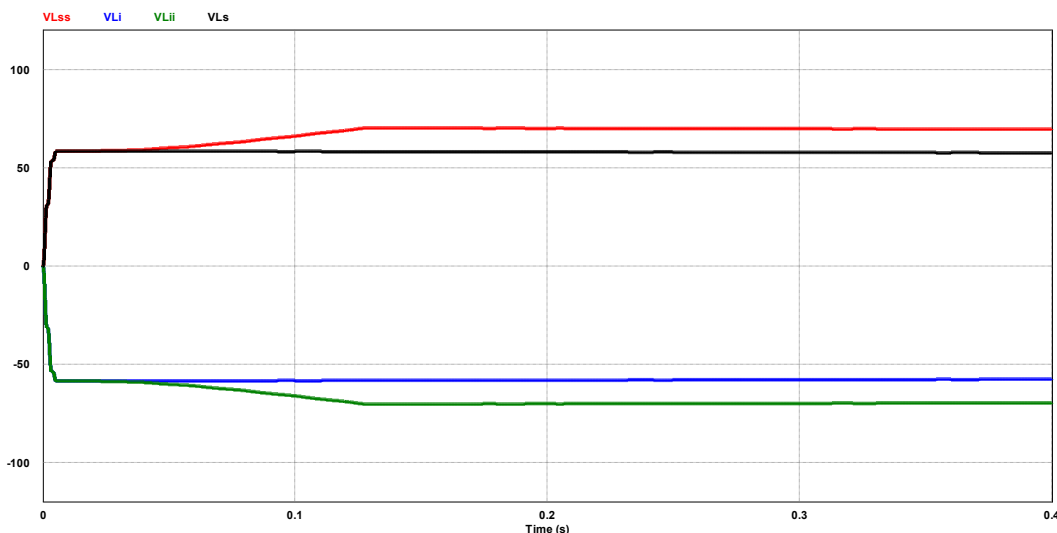


Figura 3 – Resultados de simulação do estágio de alimentação da fonte programável de baixa tensão.

### 2.1.3 Estágio de Saída da Fonte

De acordo com as especificações iniciais, a fonte deve funcionar nos modos de fonte de tensão controlada e fonte de corrente controlada, permitindo fornecer energia ou

receber energia das cablagens em teste. Assim, o andar de saída da fonte tem de permitir o funcionamento nos quatro quadrantes ou seja:

- Quadrante I – tensão de saída positiva e corrente positiva;
- Quadrante II – tensão de saída positiva e corrente negativa;
- Quadrante III – tensão de saída negativa e corrente negativa;
- Quadrante IV – tensão de saída negativa e corrente positiva.

Para atender a estes requisitos foi necessário projetar e desenvolver um circuito com um andar de saída do tipo *push-pull*. Na Figura 4 apresenta-se o esquema simplificado do estágio de saída da fonte.

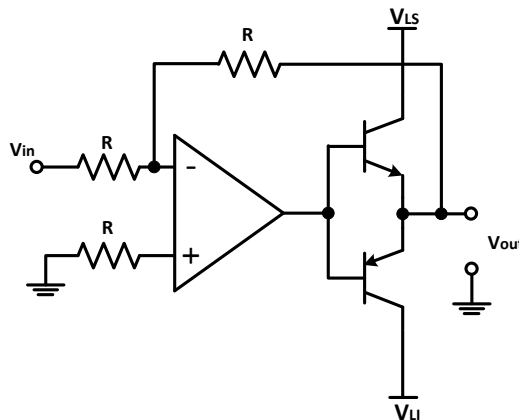


Figura 4 – Esquema simplificado do estágio de saída da fonte de alimentação programável de baixa tensão.

Com a topologia apresentada na Figura 4, controlando a tensão da entrada do amplificador operacional é possível controlar a saída da fonte quer para o modo de tensão constante quer para o modo de corrente constante, a variável de realimentação do sistema de controlo vai ser respetivamente a tensão ou a corrente de saída em função do modo em que a fonte esteja a ser controlada.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados experimentais obtidos com o andar de saída proposto. Por forma a determinar quer a linearidade quer o tempo de resposta do circuito, foram utilizados diferentes sinais de teste tais como ondas quadradas, ondas triangulares e ondas sinusoidais. Para aferir o comportamento do circuito com diferentes tipos de carga, foram também realizados ensaios com cargas indutivas e cargas capacitivas. Para demonstrar a qualidade do sinal produzido, apresenta-se também uma análise espectral da tensão de saída da fonte em resposta a uma senoide de 1 kHz.



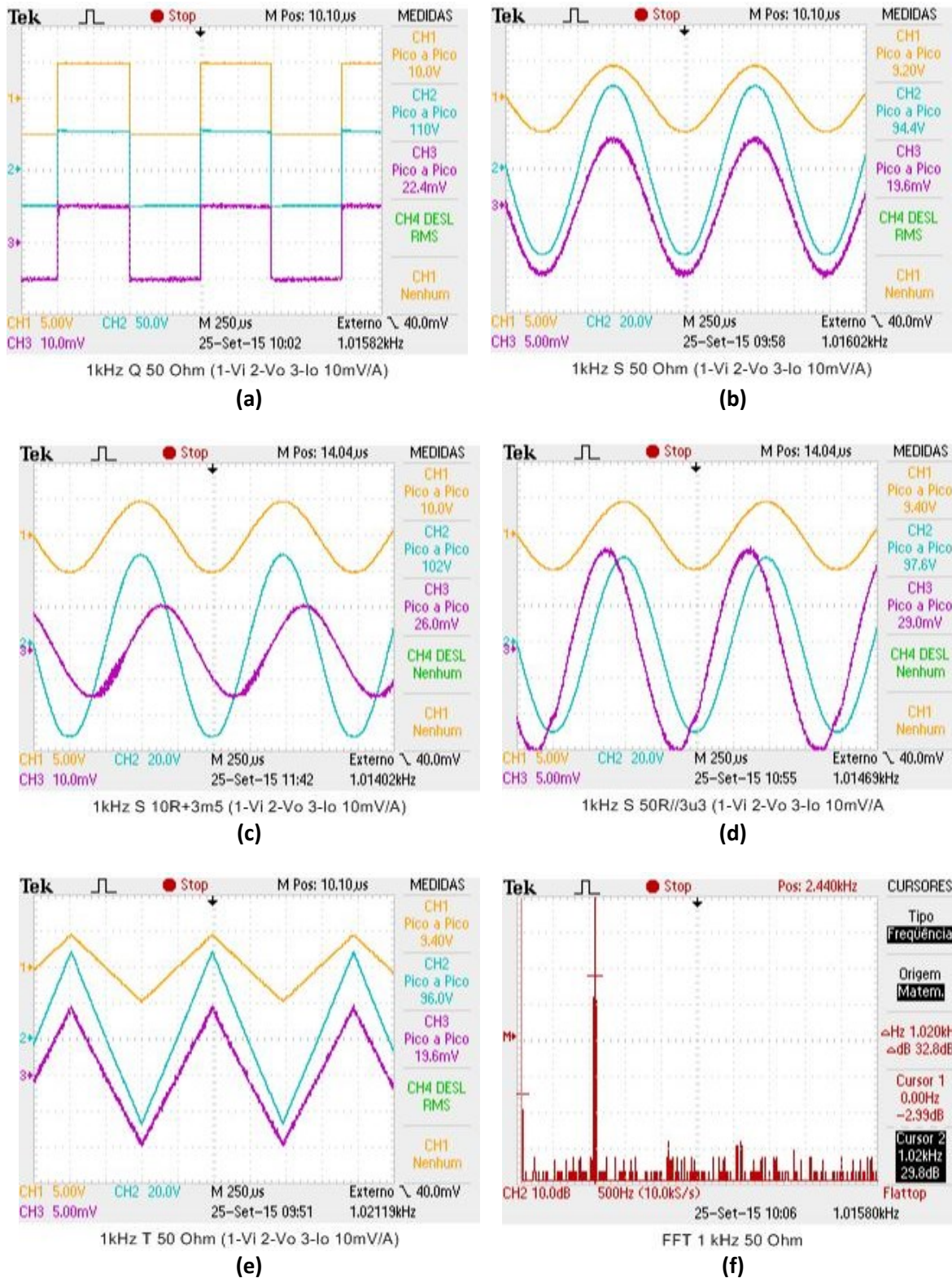


Figura 5 – Resultados experimentais obtidos com a fonte de alimentação programável de baixa tensão: (a) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal quadrangular de 1 kHz e carga puramente resistiva; (b) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga puramente resistiva; (c) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga indutiva; (d) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga capacitiva; (e) Tensão de entrada, tensão e corrente de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga puramente resistiva; (f) Espectro harmónico da tensão de saída com um sinal sinusoidal de 1 kHz e carga puramente resistiva.

## 2.1.4 Estágio de Controlo da Fonte

De acordo com as especificações iniciais a fonte tem de realizar um conjunto de procedimentos de acordo com ordens recebidas da unidade de comando central do equipamento de teste. Durante a fase de especificação optou-se pela utilização de tramas de comunicação digitais, por permitirem maior flexibilidade ao equipamento e por serem mais imunes a possíveis ruídos eletromagnéticos que possam existir nas zonas de teste onde o equipamento será utilizado. Assim, para permitir uma interface digital de comunicação optou-se por utilizar um controlador digital para a fonte de alimentação. Realizou-se um estudo comparativo de diversas topologias de controlador digital que poderiam ser utilizados nesta aplicação e a escolha acabou por recair num DSP (*Digital Signal Processor*) *TMS320F28335* da *Texas Instruments*. Trata-se de um DSP de 32 bits com suporte nativo de operações com vírgula flutuante, capaz de executar 150 milhões de instruções de multiplicação e acumulação por segundo com um circuito de relógio a 150 MHz. A seleção deste DSP foi determinada por diversos fatores, dos quais destacam-se:

- Ser uma aposta recente da *Texas Instruments*, pelo que poderá ser utilizada em trabalhos e desenvolvimentos futuros;
- Pertencer à mesma família do DSP *TMS320F2812* que vinha a ser utilizado em trabalhos anteriores da equipa de projeto e por isso exigir um tempo de aprendizagem menor;
- Integrar uma quantidade assinalável de periféricos muito úteis em aplicações de eletrónica de potência;
- Possuir memória *Flash* interna, o que simplifica o desenvolvimento das placas de circuito impresso, por estar tudo disponível num único circuito integrado.

No protótipo inicial optou-se por utilizar um módulo de desenvolvimento *TMSDOCK28335* da *Texas Instruments*. Este módulo inclui uma placa de controlo *TMDSCNCD28335* com o DSP *TMS320F28335*, apresentada na, e uma placa de suporte que inclui um *Debugger* do tipo *XDS100 V1.0*, que pode ser utilizado para programar as memórias RAM e *Flash* do DSP e para fazer a depuração do código.

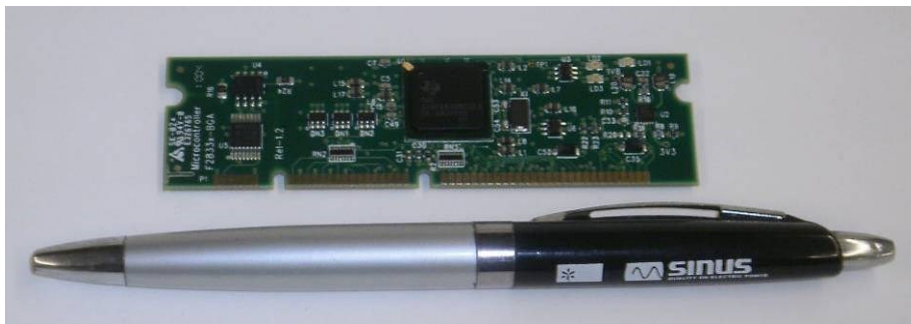


Figura 6 – Placa de controlo da *Texas Instruments TMDSCNCD28335*.

Toda a teoria de controlo e algoritmos necessários ao controlo da fonte foram codificados em linguagem C através da ferramenta de desenvolvimento disponibilizada pela *Texas Instruments*, o *Code Composer Studio™*.

### 2.1.5 Estágio de Instrumentação da Fonte

A medição da corrente de saída da fonte é realizada em dois pontos do circuito, na linha de alimentação positiva e na linha de retorno à massa da fonte. As medições na linha de retorno são utilizadas para as medições de precisão, já as medições na linha de alimentação positiva são utilizadas para detetar possíveis falhas no sistema que não possam ser detetadas apenas com as medições na linha de retorno. Um exemplo de aplicação é a deteção de curto-circuitos, uma vez que um curto-circuito na linha de alimentação positiva não será detetável pelas medições de corrente no lado da linha de retorno.

#### 2.1.5.1 Medição da Corrente na Linha de Retorno

A corrente medida no lado de baixa tensão é utilizada como malha de realimentação para o controlo da fonte de alimentação, bem como nas medições registadas para análise posterior pela unidade de comando central. Neste lado a corrente deverá ser medida com o máximo de precisão possível. Para a medição de corrente utiliza-se o método convencional, que passa pela colocação de uma resistência de baixo valor na linha de massa da fonte. Estas resistências necessitam de uma baixa tolerância e essencialmente que o valor de resistência não se altere com a variação da temperatura. A corrente ao atravessar a resistência provoca uma queda de tensão, sendo portanto esta tensão utilizada para fazer a correspondência com a corrente que está a ser fornecida/absorvida pela fonte. Como o valor desta resistência é baixo serão utilizados amplificadores operacionais de precisão para amplificar a tensão da resistência de medida, tornando

assim este valor significativo para ser convertido para um valor digital por intermédio do um ADC.

Na Figura 7 é possível verificar a forma de medição da corrente na linha de retorno. Como é possível verificar pela figura são utilizadas duas resistências de medida, uma com um valor mais baixo e outra com valor mais alto, isto para obter duas escalas de medição distintas. Com esta solução é possível obter uma boa precisão quer para correntes altas como para correntes mais pequenas. A resistência de medida de valor mais elevado é utilizada apenas para medição de correntes até cerca de 100 mA, para medição de correntes mais elevadas é utilizada a resistência com valor mais baixo. Quando é utilizada a escala para corrente elevada é atuado um relé que faz um curto-circuito à resistência de medição mais elevada, eliminando assim a queda de tensão nessa resistência.

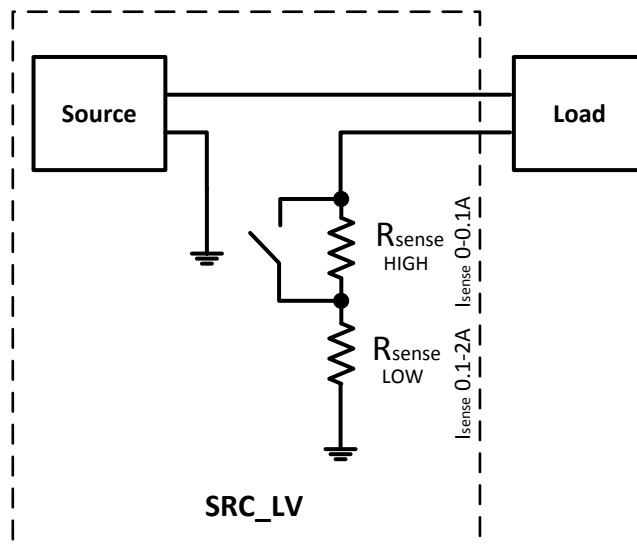


Figura 7 – Esquema de medição de corrente na linha de retorno.

Como é necessário medir a corrente nos dois sentidos (devido aos modos *source/sink* da fonte de alimentação) e por forma a obter a maior resolução possível são utilizados dois amplificadores operacionais para cada escala de corrente, tal como é apresentado na Figura 8. A ideia por detrás desta solução é aproveitar ao máximo o valor de saída do amplificador operacional, sem ser necessidade de acrescentar valores de *offset* na tensão de saída, assim sendo um dos amplificadores operacionais mede a tensão quando esta é positiva (quando a fonte está no modo *Source*), o outro amplificador operacional funciona quando a tensão é negativa (quando a fonte está no modo *Sink*). Desta forma não se perde metade da resolução, como aconteceria se fosse utilizado apenas um amplificador operacional com uma tensão de *offset*.

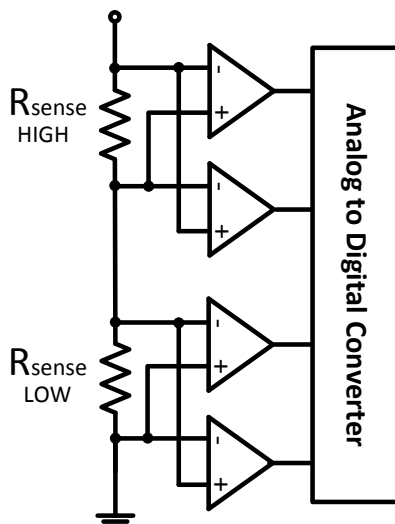


Figura 8 – Esquema de ligação dos amplificadores operacionais às resistências de medida.

### 2.1.5.2 Medição da Corrente na Linha de Alimentação Positiva

A medição da corrente no lado de alimentação pode ser realizada com menos precisão, a ideia é que esta medição seja apenas utilizada para detetar problemas no sistema que possam danificar a fonte de alimentação, como por exemplo curtos-circuitos. Para isso será utilizar um circuito integrado dedicado, normalmente referenciado na literatura por *current shunt monitor*. Estes circuitos integrados dedicados à medição de corrente permitem uma tensão de modo comum elevada, característica que os torna muito interessantes para esta aplicação em particular. Tal como é apresentado na Figura 10, neste caso é utilizado apenas um amplificador operacional, uma vez que não é necessária uma resolução muito elevada. Usualmente os *current shunt monitor* já são providos internamente ou externamente da possibilidade de utilização de uma tensão de referência para ajustar um valor de *offset*, sendo assim capazes de medir correntes de forma bidirecional.

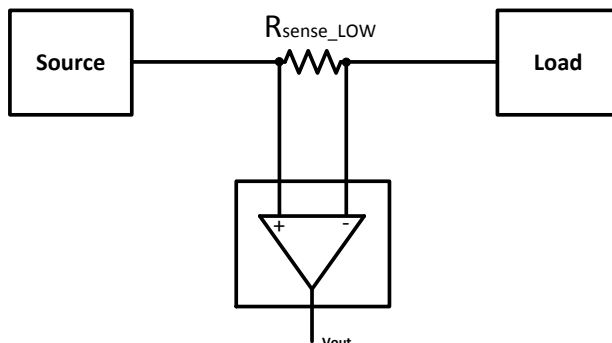


Figura 9 – Medição de corrente no lado da alimentação positiva da fonte.

### 2.1.5.3 Medição da Tensão de Saída

A medição da tensão é realizada diretamente na saída da fonte de alimentação, eliminando-se assim o erro provocado pelas quedas de tensão nas resistências de medição de corrente. A medição de tensão recorre à utilização de um divisor resistivo. As resistências utilizadas têm de possuir um valor elevado para que a corrente que as percorre seja mínima. Caso assim não seja a corrente consumida para medir a tensão iria provocar um erro significativo na medição da corrente. Para medir a tensão é utilizado um amplificador operacional com montagem diferencial aplicado ao divisor resistivo. Nesta aplicação, o amplificador operacional utilizado terá de ter como uma corrente de polarização muito pequena por forma a ser possível utilizar resistências de valor elevado no divisor resistivo sem comprometer da medição de tensão. Relativamente à saída, deve ser seleccionado um amplificador diferencial com uma impedância de saída com um valor próximo da impedância de entrada do ADC para que sejam garantidos bons resultados na amostragem digital. Na Figura 10 é apresentado um esquema geral da colocação das resistências para medição de corrente e tensão, pode então verificar-se que o divisor resistivo para medição de tensão é ligado em paralelo com a saída da fonte.

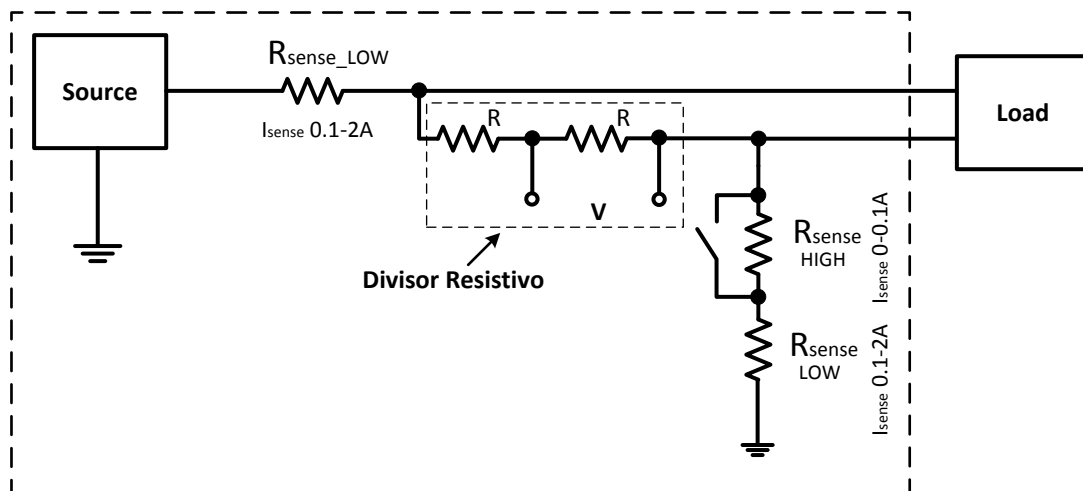


Figura 10 – Esquema geral da colocação das resistências para medição das grandezas elétricas.

### 2.1.5.4 Medição de Resistências e Condensadores de Baixo Valor

Uma das funcionalidades pretendidas para a fonte de baixa tensão é a capacidade de medição de condensadores e resistências de baixo valor. Uma vez que o estágio de saída da fonte é capaz de produzir sinais sinusoidais com amplitude e frequência variáveis, pode-se aproveitar este estágio para fazer a medição de resistências e condensadores de baixo valor. Para isso acrescenta-se um circuito que possa medir com precisão a tensão e a corrente no componente em teste. O processo de medição da corrente é executado

através de um conversor corrente/tensão utilizando um amplificador operacional com muito baixa corrente de polarização. Na Figura 13 apresenta-se o esquema do circuito utilizado na medição de resistências e condensadores.

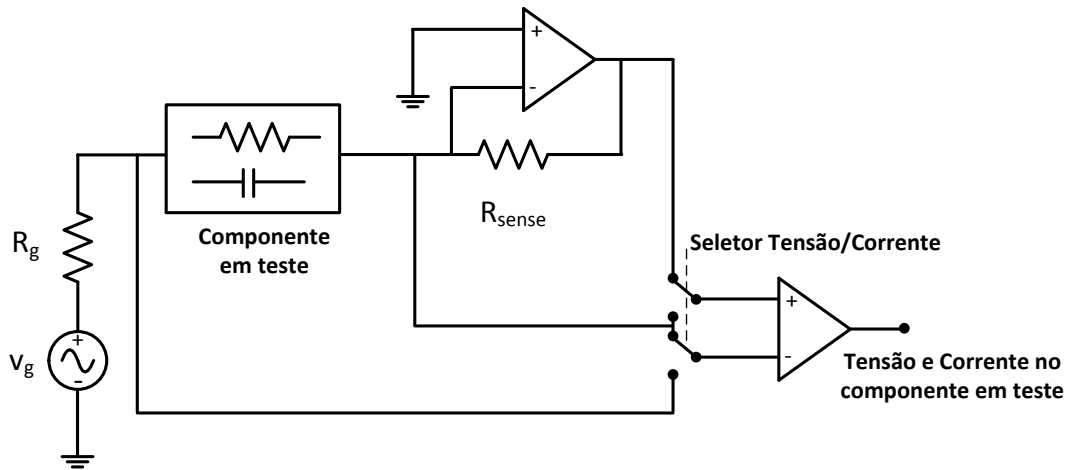


Figura 11 – Esquema do circuito de medição de resistências e condensadores.

O circuito apresentado mede de forma precisa os condensadores e as resistências junto à saída da fonte de baixa tensão. A utilização das matrizes de comutação para fazer a medição remota dos componentes implica em perda de precisão na medição, pois os cabos e interruptores da matriz comportam-se como uma linha de transmissão, alterando a característica do componente quando visto do lado da fonte. Assim, quanto mais longe estiver o componente a medir pior será a precisão da medição. Na Figura 14 apresenta-se o modelo distribuído de uma linha de transmissão. Quanto mais longos forem os cabos, e quantas mais matrizes de comutação existirem entre a fonte de baixa tensão e o componente em teste, menor é a precisão do equipamento.

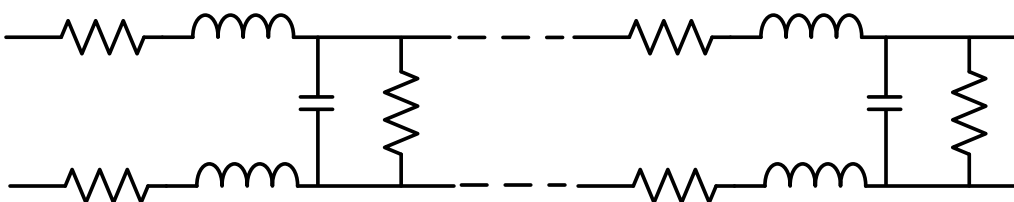


Figura 12 – Modelo distribuído de uma linha de transmissão.

### 2.1.6 Implementação da Fonte de Alimentação

Como já foi referido anteriormente, o comando da fonte é inteiramente digital, pelo que o controlo da tensão de saída é realizado através de um DAC para converter o valor digital da ordem de comando para um valor analógico que atua sobre o amplificador operacional que controla a tensão de saída

Quanto ao controlo em si, este é composto por diversos algoritmos digitais que reagem à definição do modo de operação (tensão ou corrente constante), sendo utilizadas como variáveis de realimentação a tensão a e corrente de saída, respetivamente.

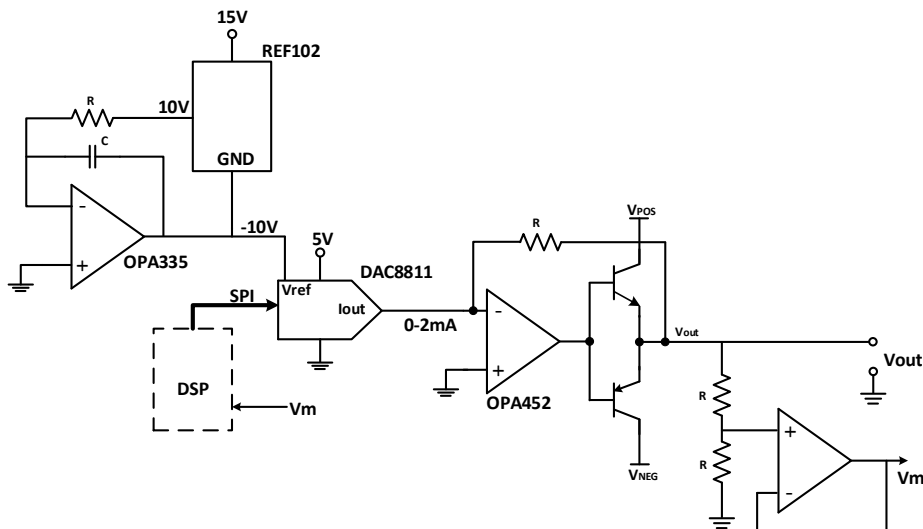


Figura 13 – Esquema simplificado da fonte de alimentação programável de baixa tensão.

### 2.1.7 Desenvolvimento de Circuitos Auxiliares de Teste

No decurso das atividades relacionadas com a fonte de alimentação programável de baixa tensão, foram também desenvolvidas duas fontes de corrente de precisão por forma a testar e validar os circuitos de instrumentação nomeadamente a medição de corrente de precisão. Na Figura 14 é apresentado o esquema elétrico das fontes de corrente desenvolvidas. Na Figura 14 (a) é apresentado o esquema da fonte de corrente de precisão de 1 mA e na Figura 14 (b) é apresentado o esquema da fonte de corrente de precisão de 1 A.

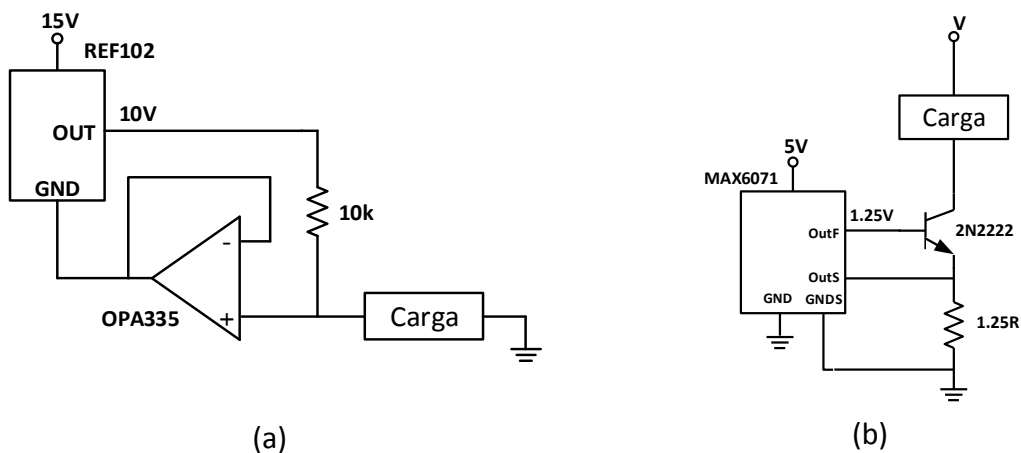


Figura 14 – Esquema elétrico das fontes de corrente de precisão desenvolvidas: (a) Fonte de corrente de 1 mA; (b) Fonte de corrente de 1 A.



## 2.2 Matriz de Comutação de Alta Tensão

Relativamente a este módulo funcional a TecMinho ficou responsável pelo estudo dos componentes e do *layout* mais adequados para as matrizes de comutação, bem como pela assistência na definição dos ensaios preliminares aos componentes da Matriz.

A matriz de comutação de alta tensão tem como principal finalidade permitir vários pontos de teste a partir da mesma fonte e do mesmo equipamento de instrumentação. Para que esses testes sejam possíveis é necessário fazer o reencaminhamento dos sinais de tensão ou corrente até aos pontos de teste pretendidos.

Na Figura 15 apresenta-se o desenho de uma possível configuração da matriz de comutação de alta tensão. Nesta configuração a matriz assenta na utilização de duas linhas SEP e SEN que permitem aplicar a tensão da fonte de alta tensão entre qualquer dois pontos de teste ( $T_1 \dots T_n$ ). Assim partindo da leitura da instrumentação de corrente e tensão da própria fonte de alimentação de alta tensão é possível realizar de forma sequencial o teste aos diversos pontos da cablagem.

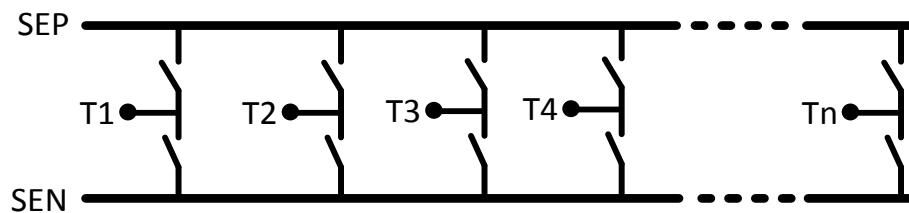


Figura 15 – Configuração da matriz de comutação de alta tensão.

### 2.2.1 Seleção dos Interruptores da Matriz

Foi realizado um levantamento com as características pretendidas de relés disponíveis comercialmente. Durante esta pesquisa verificou-se que em todos os fabricantes consultados existia um vazio entre relés com tensão de retenção em aberto entre os 5 kV e os 10 kV. Assim, face às especificações de tensão para os ensaios em alta tensão a teria de recair sobre os relés de 10 kV. Relativamente a este ponto salienta-se que vários dos fabricantes consultados possuem modelos de relés muito equivalentes ao nível de características elétricas e mecânicas pelo que a opção poderá recair sobre o modelo cujo fabricante ofereça melhores condições comerciais.

Quanto à forma de utilização dos relés para implementar a matriz, considerados diversas soluções nomeadamente a utilização de PCBs cerâmicos para garantir maior rigidez dielétrica, apontou-se para uma solução em que os relés poderiam ter os contactos da bobina apropriados para PCB e os contactos de potência disponíveis na parte superior, permitindo efetuar as ligações da matriz diretamente aos conectores por intermédio de

condutores com isolamento apropriados para o efeito. Esta solução apesar de mais trabalhosa na fase de fabrico das equipamentos, pois o processo de soldadura dos contactos de potência dos relés e todo o processo de cablagem ser mais exigente. Ao nível do PCB, esta estratégia simplifica muito o desenho, pois passa a conter apenas as pistas de sinal para ativar as bobinas dos relés, e por esse motivo não exige considerações de desenho especiais. Na Figura 16 apresenta-se um exemplo de um relé do fabricante *Pickering* que pode ser aplicado na matriz de comutação com a topologia proposta.

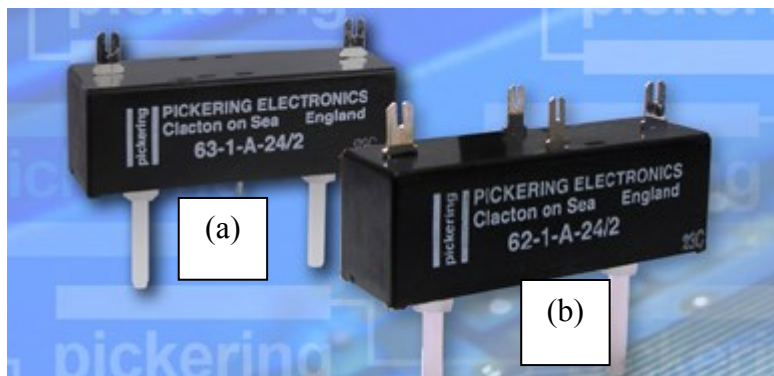


Figura 16 – Exemplo de relés do fabricante *Pickering* com contactos de potência acessíveis pela parte superior: (a) Com contactos da bobina para PCB; (b) Com contactos da bobina acessíveis pela parte superior.

## 2.2.2 Mecanismos de Proteção da Matriz

Nas especificações da fonte programável de alta tensão faz parte a proteção contra sobretensões e contra sobrecorrentes. Estas especificações destinam-se a proteger não só o equipamento de ensaios mas também a cablagem em teste e os operadores. Apesar de esta proteção estar prevista na fonte de alimentação, devido à capacidade de armazenamento de energias da cablagem e dos diversos interruptores da matriz, especialmente em situações em as matrizes estão geograficamente dispersas, poderá ser útil incluir um mecanismo de proteção em cada um dos módulos da matriz. Uma proteção fácil de implementar e que pode fornecer uma proteção efetiva contra sobretensões é a utilização de resistências de descarga controladas por uma linha dedicada a situações de erro. Desta forma, sempre que alguma anomalia seja detetada, pode ser acionado o sinal de erro, despoletando a entrada imediata de diversas resistências em paralelo com as linhas de SEP e SEN da matriz, provocando uma descida praticamente instantânea da tensão em todos os pontos do equipamento e da cablagem em teste. Esta proteção pode ser disparada sempre que sejam detetadas fugas ou sobrecorrentes, sinónimo de rompimento de rigidez dielétrica da cablagem, ou contactos indevidos entre pontos de teste ou com a terra de proteção. Na Figura 17 apresenta-se um esquema de proteção da

matriz com resistências de descarga. Para que a proteção da matriz seja mais efetiva o interruptor de erro deve ser muito rápido a fechar o circuito, não se colocando qualquer restrição temporal quanto ao tempo de abertura. Por motivos de segurança os interruptores de erro poderão mesmo permanecer fechados até o sinal de erro seja desabilitado por um operador do equipamento.

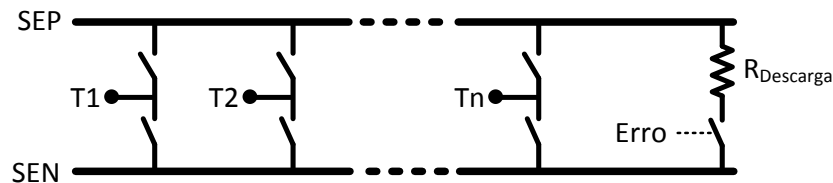


Figura 17 – Esquema de proteção da matriz com resistências de descarga.

## 2.3 Fonte de Alimentação Programável de Alta Tensão

Relativamente a este módulo funcional, a TecMinho ficou responsável pelo estudo da melhor topologia de conversores eletrónicos de potência para obter uma fonte de tensão DC ajustável até 6000 V e AC sinusoidal ajustável até 6000 V (valor de pico), bem como pelo estudo da melhor solução técnica que garanta a implementação de um limite de corrente ajustável, a utilização da fonte para efetuar a medição de resistência de isolamento e rigidez dielétrica, e ainda pela implementação de um conjunto de proteções, nomeadamente: anti-arco, de curto-circuito, de sobretensão e de temperatura excessiva, incluindo proteções implementadas diretamente por hardware.

De acordo com as especificações elaboradas para o equipamento de teste, existe a necessidade de produzir uma tensão elevada de forma controlada por forma a efetuar medição da resistência de isolamento e a testes de rigidez dielétrica às cablagens. Para que o equipamento possa realizar todos os ensaios, é necessário produzir tensões contínuas programáveis entre zero e 6000 V e tensões alternadas sinusoidais com amplitude de até 6000 V (valor de pico).

### 2.3.1 Especificações da Fonte de Alta Tensão

Após análise detalhada do conjunto de ensaios que se pretende fazer com o equipamento, foi realizada uma análise das funcionalidades que deveriam ser embutidas na fonte programável de alta tensão para permitir a realização desses testes, obtendo-se as seguintes especificações:

- Tensão ajustável;
- Limite de corrente ajustável;
- Proteção anti-arco, de curto-circuito, de sobretensão e de temperatura excessiva;

- Possibilidade de isolar eletricamente as linhas SEP/SEN entre a fonte e o exterior através de dois relés em série (redundância);
- Inclusão de uma linha de segurança externa que desarme a fonte (por exemplo cortando a alimentação dos relés) quando está a flutuar, e rearme quando ligada a 0 V;
- Inclusão de uma função que permita gravar em conjunto as leituras do voltímetro e do amperímetro durante um intervalo de tempo limitado (dependendo da memória disponível) depois de definida uma base de tempo para as leituras e as escalas do voltímetro e do amperímetro.

### 2.3.2 Topologia da Fonte de Alta Tensão

Para atender aos diversos requisitos da fonte programável de alta tensão foi realizado um estudo sobre as diversas topologias que poderiam ser utilizados no desenvolvimento da fonte. Para cada uma das topologias foi realizada uma análise criteriosa das vantagens e desvantagens por forma a conduzir ao melhor compromisso entre desempenho e dificuldade/custo de desenvolvimento.

#### 2.3.2.1 Topologia Baseada em Conversores Comutados de Alta Frequência

Na Figura 18 apresenta-se um possível esquema elétrico para uma topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência. Esta topologia assenta na utilização de dois conversores do tipo *Buck* com transformador elevador de alta frequência. Como os conversores apenas permitem produzir tensões unidirecionais, e devido à necessidade de se produzir sinais alternados, um dos conversores (Conversor 1) é utilizado para produzir um valor médio relativo ao ponto de referência comum e o outro conversor (Conversor 2) produz o valor de saída pretendido. Assim, se a tensão do Conversor 2 for superior à tensão do Conversor 1, temos na saída um sinal positivo. Se a tensão do Conversor 2 for inferior à tensão do Conversor 1, temos na saída um sinal negativo. Desta forma para produzir um sinal alternado sinusoidal, o Conversor 2 deve gerar um sinal sinusoidal com valor médio exatamente igual ao do Conversor 1 para na saída se obter um sinal sem valor médio. Como o Conversor 1 e o Conversor 2 apenas permitem fluxo unidirecional de energia, para que a topologia apresentada funcione nos quatro quadrantes tem de existir duas resistências ( $R_{4\_Quadrantes}$ ) em paralelo com a saída dos dois conversores. O valor desta resistência é extremamente importante ao nível da resposta dinâmica da fonte, sendo que quanto menor o seu valor melhor será a resposta dinâmica. Por outro lado, quanto menor for o valor destas

resistências maior será a potência dissipada nas resistências e nos conversores comutados. Para se conseguir bons resultados com esta topologia, os conversores necessitam de operar com tensões ligeiramente superiores aos valores de saída pretendidos.

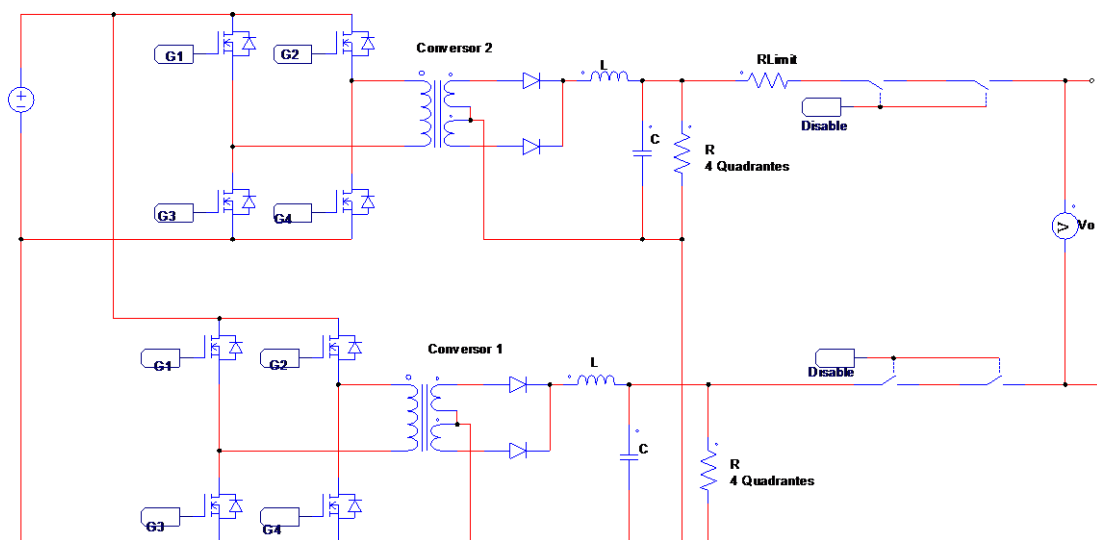


Figura 18 – Topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência.

Na Figura 19 apresenta-se o resultado de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência. Como se pode ver pela figura, o Conversor 1 produz uma tensão de saída constante e o Conversor 2 produz uma tensão sinusoidal com valor médio. Na saída da fonte obtemos um sinal puramente alternado sinusoidal com a amplitude pretendida.

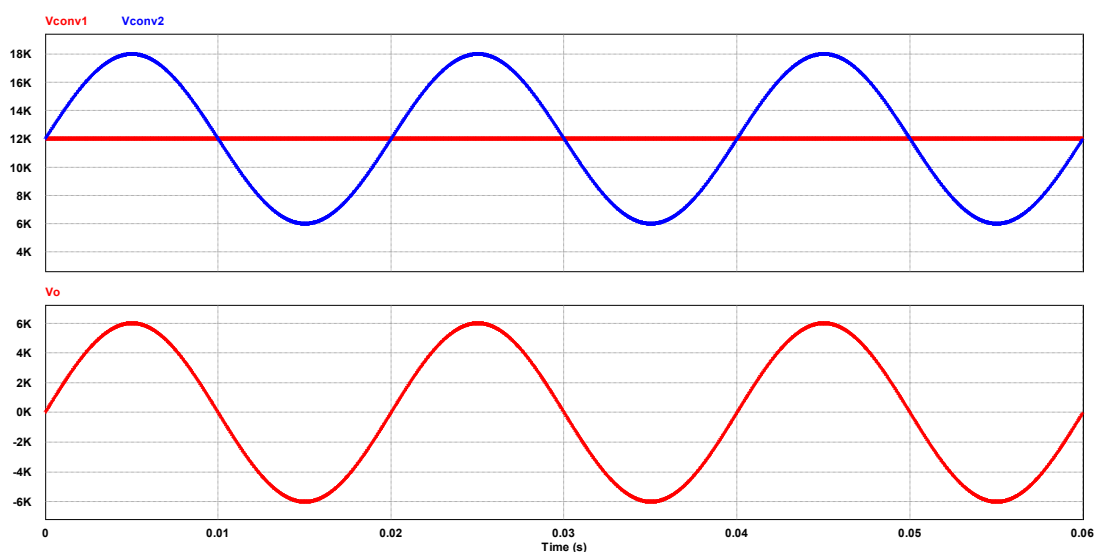


Figura 19 – Resultados de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência.

A topologia de fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência apresenta como principais pontos fortes a facilidade de implementação e o custo reduzido dos componentes, contudo, face à estratégia utilizada para produzir os sinais alternados, não é possível garantir precisão muito elevada nos sinais produzidos. Outra desvantagem desta topologia resulta da utilização de conversores comutados que produzem níveis significativos de ruído eletromagnético de alta frequência. Esse ruído pode afetar tanto a qualidade dos sinais produzidos quanto a qualidade das medições efetuadas.

### 2.3.2.2 Topologia Baseada em Conversores Comutados de Alta Frequência e Conversores Lineares de Baixa Tensão

Na Figura 18 apresenta-se um possível esquema elétrico para uma topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de baixa tensão. Esta topologia assenta na utilização de um conversor comutado do tipo *Buck* com transformador elevador de alta frequência para produzir as tensões de teste em CC e um conversor linear com transformador elevador de baixa frequência para produzir as tensões de teste em AC. Para configurar a fonte que será utilizada num determinado tipo de teste existe um seletor implementado por relés.

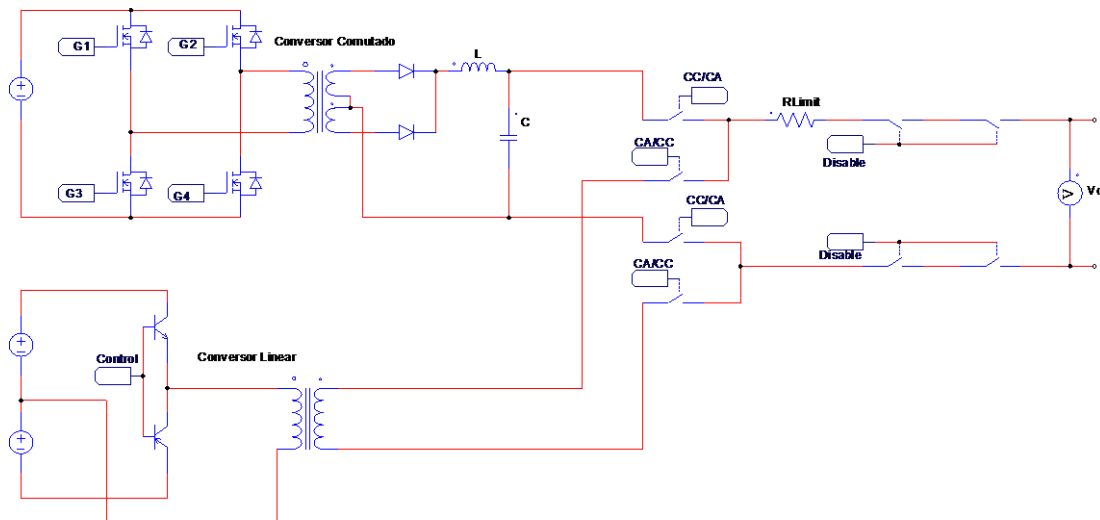


Figura 20 – Topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de baixa tensão.

Na Figura 21 apresenta-se o resultado de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de baixa tensão. Esta topologia apenas permite produzir tensões de teste CC ou CA em função do modo de teste selecionado.

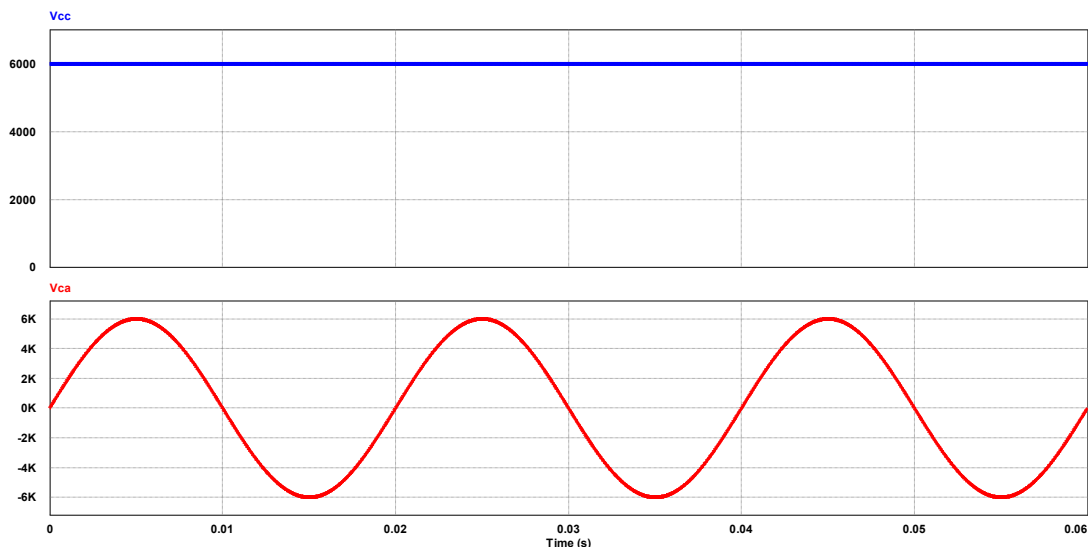


Figura 21 – Resultados de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de baixa tensão.

A topologia de fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de baixa tensão apresenta como principais pontos fortes a facilidade de implementação. Como os conversores de potência operam em baixa tensão podem ser desenvolvidos por recurso a componentes de custo reduzido. No entanto, esta topologia utiliza um transformador elevador que opera em baixa frequência. Por consequência da utilização do transformador de baixa frequência, no modo CA, apenas é possível produzir sinais puramente alternados, ou seja, sinais com valor médio nulo. Para se conseguir bons resultados numa gama alargada de frequência, deve ser utilizado um transformador adequado, pode por exemplo ser empregue um transformador com núcleo de ferrite em vez de núcleo de ferro. Tendo em conta as características da aplicação, esse transformador terá de ser sobredimensionado por forma a operar na zona linear durante toda a gama de operação pretendida para a fonte. A maior desvantagem da presente topologia reside na impossibilidade de realizar ensaios com forma de onda arbitrária.

### 2.3.2.3 Topologia Baseada em Conversores Comutados de Alta Frequência e Conversores Lineares de Alta Tensão

Na Figura 22 apresenta-se um possível esquema elétrico simplificado para uma topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de alta tensão. Esta topologia assenta na utilização de um conversor comutado para produzir as tensões CC que alimentam o circuito (este conversor não está representado na figura) e por conversor linear de alta tensão para produzir as tensões de teste em CC ou CA. Como se pode ver pela figura o conversor

linear terá de ser composto por diversos transístores (bipolares na topologia apresentada) em série para suportarem tensões ligeiramente superiores às que é necessário produzir.

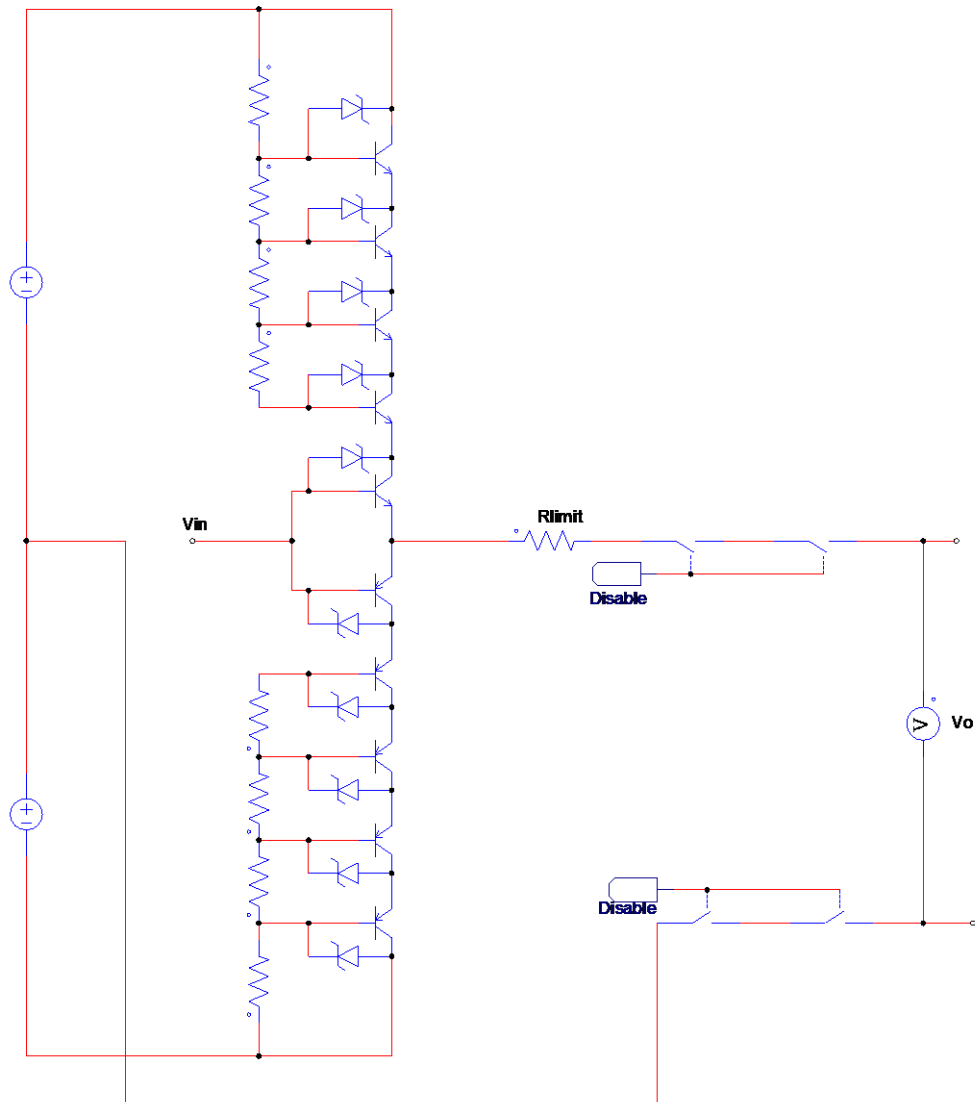


Figura 22 – Topologia da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de alta tensão.

Na Figura 23 apresenta-se o resultado de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de alta tensão. Esta topologia permite gerar tensões de teste CC ou CA em função do sinal aplicado à entrada do conversor linear.

A topologia de fonte de alimentação de alta tensão baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de alta tensão apresenta como principais pontos fortes a qualidade dos sinais produzidos e a possibilidade de gerar sinais de teste com forma de onda arbitrária. Como o conversor linear opera em alta tensão exige a utilização de diversos transístores ligados em série por forma a suportar as altas tensões necessária durante os testes. Desta forma, o custo e o volume desta topologia serão mais elevados.



Devido à necessidade de ligação de vários transístores em série, é necessário um conjunto de proteções individuais para cada um dos transístores o que aumenta a dificuldade de implementação desta topologia.

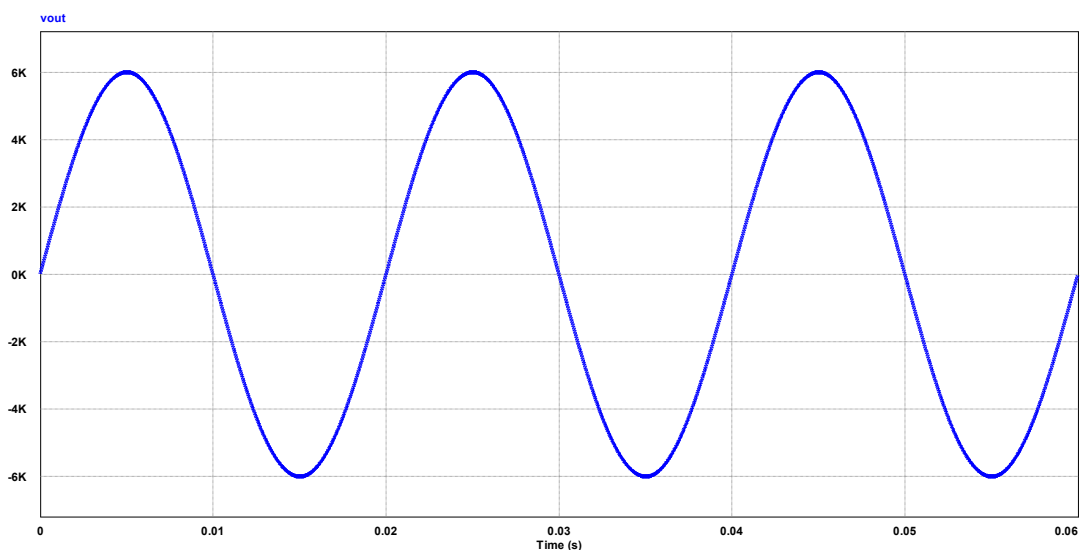


Figura 23 – Resultados de simulação da fonte de alimentação de alta tensão baseada em conversores comutados de alta frequência com conversor linear de alta tensão.

### 2.3.3 Comparação das Topologias

Cada uma das topologias estudadas para fonte programável de alta tensão apresenta vantagens e desvantagens. Assim, na Tabela 1 apresenta se uma comparação qualitativa das diversas topologias estudadas. Na tabela, a topologia baseada em conversores comutados de alta frequência é designada por Topologia 1, a topologia baseada num conversor comutado de alta frequência e num conversor linear de baixa tensão é designada por Topologia 2 e a topologia baseada em conversores comutados de alta frequência e conversores lineares de alta tensão é designada por Topologia 3.

Tabela 1 – Comparação qualitativa das diversas topologias para a fonte de alimentação programável de alta tensão.

Características	Topologia 1	Topologia 2	Topologia 3
Custo dos componentes	Bom	Médio	Fraco
Simplicidade de implementação	Bom	Bom	Fraco
Tamanho da fonte	Bom	Médio	Médio
Versatilidade	Médio	Faco	Bom
Precisão	Fraco	Médio	Bom
Robustez e tolerância a falhas	Bom	Bom	Médio

Face às exigências do projeto ao nível de versatilidade e precisão nos ensaios a efetuar, verifica-se que a melhor topologia para a fonte de alta tensão é a baseada em conversores comutados de alta frequência e conversores lineares de alta tensão.

## 2.3.4 Instrumentação da Fonte de Alta Tensão

### 2.3.4.1 Medição da Corrente na Linha de Retorno

A medição da corrente na linha de retorno destina-se a ser tratadas pela unidade de comando central do equipamento para aferir a rigidez dielétrica das cablagens em teste. Assim, a corrente deverá ser medida com o máximo de precisão possível. Por forma a permitir uma gama de medição mais alargada são utilizadas duas resistências de medida, uma com um valor mais baixo e outra com valor mais alto, isto para obter duas escalas de medição distintas. Com esta solução é possível obter uma boa precisão quer para correntes altas como para correntes mais pequenas. Quando é utilizada a escala para corrente elevada é atuado um relé que faz um curto-circuito à resistência de medição mais elevada, eliminando assim a queda de tensão nessa resistência. Na Figura 24 é possível verificar a forma de ligação das resistências de medição da corrente na linha de retorno da fonte de alta tensão.

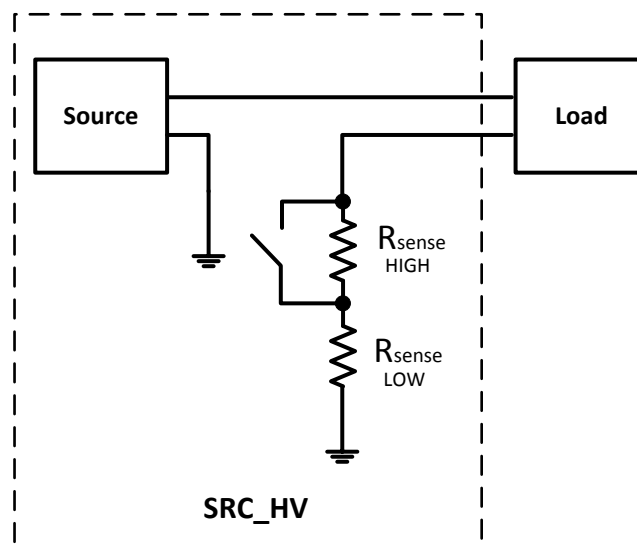


Figura 24 – Esquema de ligação das resistências de medição da corrente na linha de retorno da fonte de alta tensão.

Como é necessário medir a corrente nos dois sentidos e de forma a obter a maior resolução possível são utilizados dois amplificadores operacionais para cada escala de corrente, tal como é apresentado na Figura 25.

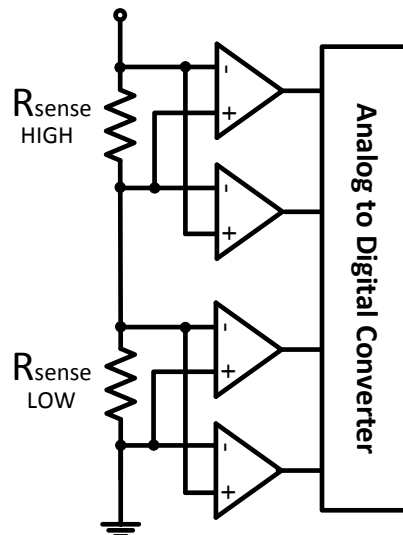


Figura 25 – Esquema de ligação dos amplificadores operacionais às resistências de medida.

#### 2.3.4.2 Medição da Corrente na Linha de Alimentação

A medição da corrente no lado de alimentação pode ser realizada com menos precisão, a ideia é que esta medição seja apenas utilizada para detetar problemas no sistema que possam danificar a fonte de alimentação ou a cablagem em teste. Assim, para medir a corrente nesta linha é utilizada resistência shunt e amplificadores operacionais de precisão. Devido à tensão elevada que a linha de alimentação da fonte pode ter relativamente à linha de retorno, a alimentação e as saídas dos circuitos de instrumentação tem de ser galvanicamente isoladas. Na topologia adotada a tensão de alimentação dos circuitos de instrumentação é conseguida com recurso a um conversor CC-CC comutado com isolamento galvânico adequado. A saída dos circuitos de instrumentação seria realizada por intermédio de uma comunicação digital (SPI) com acopladores óticos. Desta forma é necessário incluir um ADC e um microcontrolador no lado isolado da medição. A opção por microcontrolador no lado isolado da medição permite mais flexibilidade no protocolo de comunicação, podendo por exemplo ser enviado um código de redundância cíclica (CRC) para garantir que os dados na transmissão não são corrompidos. Esse próprio microcontrolador poderia receber ordens para adquirir o sinal a uma taxa fixa, implementar um filtro digital ou outro tipo de pré-processamento sobre as amostras recolhidas. Como uma das funcionalidades principais da medição da corrente na linha de alimentação é a deteção de erros, então optou-se por incluir uma saída digital extra para indicação prioritária de condições de erro. Essa saída pode ser ativada diretamente por detetor de corrente máxima implementado diretamente por *hardware* ou por uma linha do microcontrolador. Na Figura 26 apresenta-se um diagrama de blocos dos circuitos de instrumentação de corrente na linha de alta tensão da fonte.

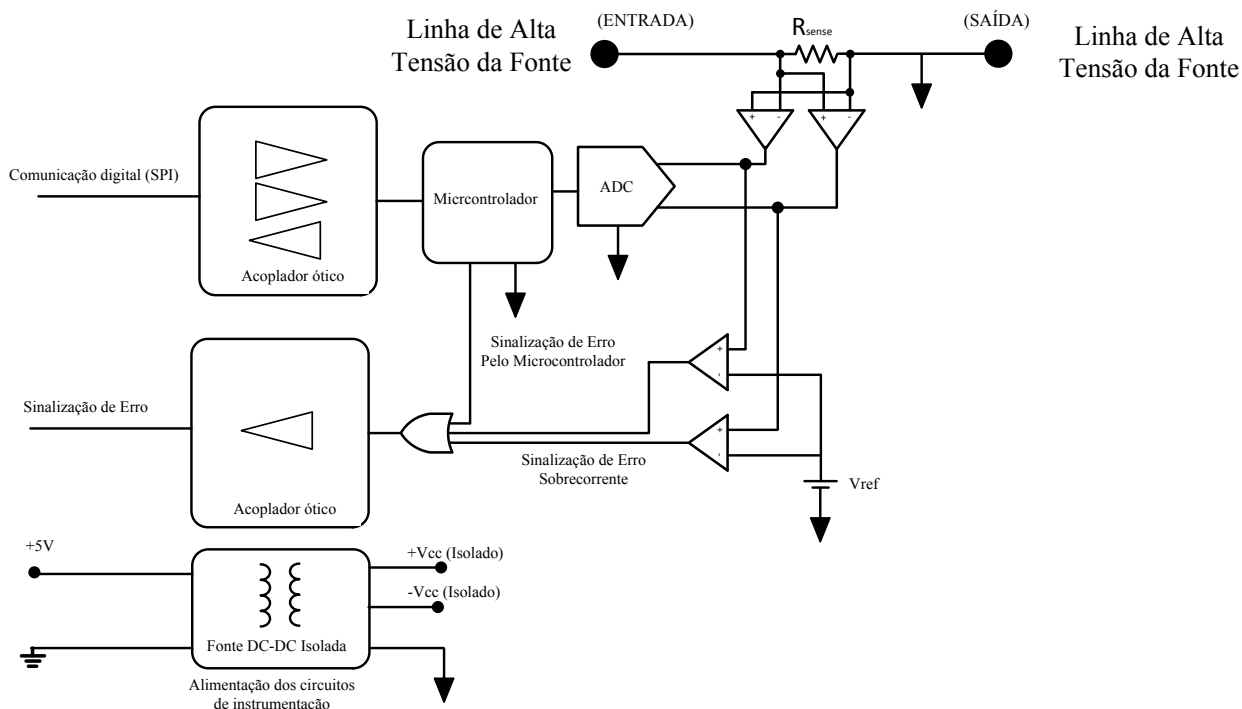


Figura 26 – Diagrama de blocos dos circuitos de instrumentação de corrente na linha de alta tensão da fonte.

### 2.3.4.3 Medição da Tensão de Saída

A medição da tensão é realizada diretamente na saída da fonte de alimentação, eliminando-se assim o erro provocado pelas quedas de tensão nas resistências de medição de corrente. A medição de tensão recorre à utilização de um divisor resistivo. As resistências utilizadas têm de possuir um valor elevado para que a corrente que as percorre seja mínima. Para medir a tensão é utilizado um amplificador diferencial aplicado ao divisor resistivo. Nesta aplicação, o amplificador operacional utilizado terá de ter como uma corrente de polarização muito pequena por forma a ser possível utilizar resistências de valor elevado no divisor resistivo sem comprometer da medição de tensão. Na Figura 27 é apresentado um esquema da colocação das resistências para medição da tensão. Como se pode ver pela figura o divisor resistivo é ligado em paralelo com a saída da fonte.

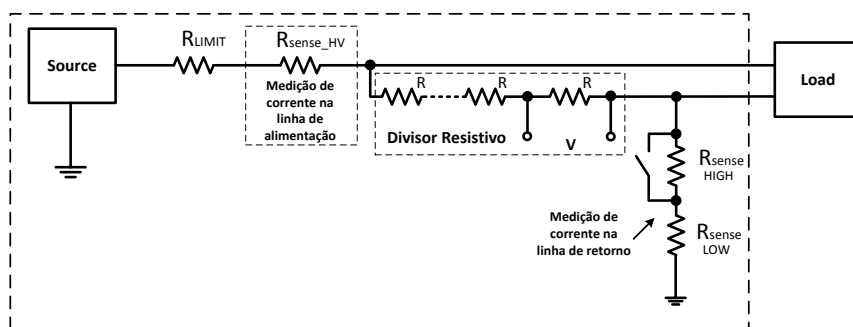


Figura 27 – Esquema geral da colocação das resistências de medida na fonte de alta tensão.

### 3. Conclusões

Este relatório descreve as atividades desenvolvidas no âmbito do projeto “High Voltage Wiring Harness Test Equipment” para o qual TecMinho foi subcontratada pela Divmac para participar na realização de estudos, especificação e desenvolvimento de uma fonte de alimentação programável de baixa tensão e para prestar consultoria e assistência técnica no desenvolvimento de uma fonte de alta tensão e de uma matriz de comutação de alta tensão.

No que diz respeito à matriz de comutação, após o levantamento pela existência de relés disponíveis comercialmente para o efeito verificou-se em todos os fabricantes consultados que existia um vazio entre os 5 kV e os 10 kV ao nível da tensão de retenção em aberto, assim face aos valores mínimos pretendidos a opção teria de recair sobre os de 10 kV.

No que diz respeito à fonte de tensão em altas tensões, após uma análise detalhada das funcionalidades que deveriam ser embutidas, foram estudadas diferentes topologias que poderiam ser utilizadas na construção da fonte. Para cada uma das topologias foi realizada uma análise criteriosa das vantagens e desvantagens por forma a conduzir ao melhor compromisso entre desempenho e dificuldade/custo de desenvolvimento. Relativamente ao desenvolvimento da fonte de alimentação programável de baixa tensão, após análise detalhada das características pretendidas para o equipamento de ensaio, foi realizada uma especificação das funcionalidades que deveriam ser implementadas. Por forma a facilitar o desenvolvimento, foi idealizada uma arquitetura modular em quatro estágios principais.

O primeiro estágio, denominado “alimentação da fonte”, é responsável por gerar duas tensões para alimentar o estágio de saída.

Para o estágio de controlo da fonte foi adotado um DSP *TMS320F28335* da *Texas Instruments*.

Para o estágio de instrumentação da fonte foram estudados e desenvolvidos diversos circuitos de medição e condicionamento de sinal.

Para o estágio de saída foram realizados diversos estudos sobre a melhor topologia para os conversores de potência a utilizar bem como para os componentes necessários.