

PEA3502 LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

INVERSOR PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES

W. KAISER 06/2020

1. OBJETIVOS

Familiarização com a operação de lâmpadas fluorescentes em baixa e alta frequência. Análise e dimensionamento de um conversor CC/CA utilizando elo ressonante e comutação não dissipativa para alimentação de lâmpadas fluorescentes em alta frequência.

2. LÂMPADA FLUORESCENTE

As lâmpadas comerciais utilizadas para iluminação podem ser classificadas, de acordo com o seu mecanismo básico de produção de luz, em lâmpadas incandescentes e lâmpadas de descarga. De acordo com a pressão, as lâmpadas à descarga elétrica podem ser classificadas em: alta pressão e baixa pressão. As lâmpadas à descarga de baixa pressão utilizam vapores metálicos (mercúrio ou sódio) a pressões da ordem de 10^{-3} atmosferas e a radiação emitida pela descarga apresenta uma distribuição espectral, onde se destacam as raias predominantes dos átomos que constituem o vapor metálico.

Desenvolvida na década de 40 e conhecida comercialmente como lâmpada tubular fluorescente em função da geometria do seu tubo de descarga, este tipo de lâmpada encontra aplicações em praticamente todos os campos de iluminação. O tubo de descarga, de vidro transparente, é revestido internamente com uma camada de pó branco, genericamente conhecido como "fósforo". O "fósforo" atua como um conversor de radiação, ou seja, absorve um comprimento de onda específico ($\lambda=253.7$ nm) de radiação ultravioleta, produzida por uma descarga de vapor de mercúrio a baixa pressão e emite radiação na faixa visível do espectro.

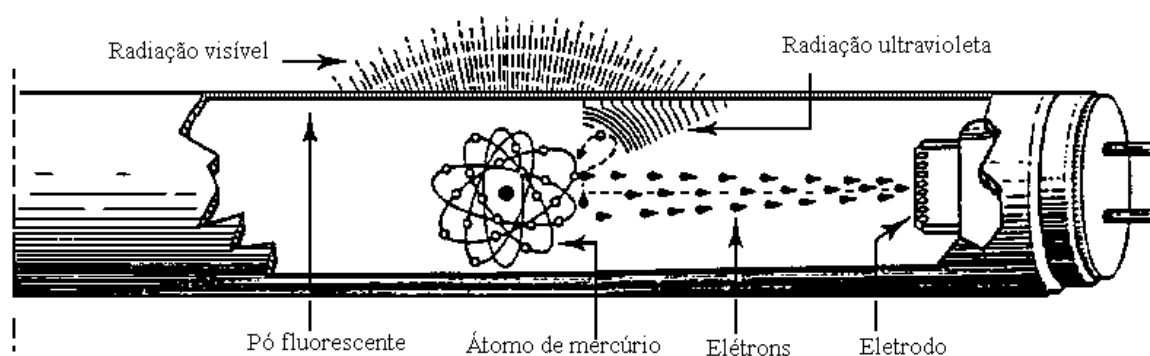


Fig. 1 - Estrutura interna e princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente

As lâmpadas fluorescentes comercialmente disponíveis utilizam bulbos de vidro transparente, historicamente designados por uma letra **T** (de tubular) seguida de um número que indica o seu diâmetro máximo em oitavos de polegada. Por exemplo, T12 significa um bulbo tubular com diâmetro de 12/8 polegadas.

Os filamentos das lâmpadas fluorescentes são construtivamente semelhantes aos das lâmpadas incandescentes, porém operam em temperaturas mais baixas (800 °C a 1100 °C) e apresentam um revestimento de material com baixa função de trabalho (por ex. óxido de bário) que emite elétrons por efeito

termo-iônico. Durante a partida, os filamentos são alimentados por uma fonte de tensão, sendo aquecidos pela circulação da corrente, até atingir a temperatura de emissão desejada, a qual é mantida pelo calor gerado na descarga com a lâmpada já em funcionamento.

Os elétrons emitidos por um dos filamentos (catodo) são acelerados em direção ao outro (anodo) pelo campo elétrico estabelecido por uma tensão externamente aplicada. Inicialmente forma-se uma descarga com o gás de enchimento ("filling gas"), em geral argônio. Os elétrons produzidos excitam os átomos do vapor de mercúrio, que emitem radiação ultravioleta, sensibilizando a camada de "fósforo" aplicada na parede interna do tubo.

As características luminosas (temperatura de cor correlata, eficácia luminosa e reprodução de cores) da lâmpada fluorescente são determinadas pela composição e espessura do pó fluorescente ("fósforo"). Os "fósforos" são compostos que emitem luz por fluorescência quando expostos à radiação ultravioleta. São fabricados a partir de compostos de elevada pureza, cuja estrutura cristalina é modificada pela adição de ativadores, que determinam a distribuição espectral da radiação emitida.

Uma família amplamente utilizada são os halofosfatos cuja composição química básica é: $3\text{Ca}(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$. Na década de 80 foi desenvolvida uma nova família de "fósforos", conhecida comercialmente como "tri-fósforo" ou "fósforo tri-estímulo", que é constituída de três compostos, cada um com banda de emissão estreita e centrada nos comprimentos de onda do azul, vermelho e verde respectivamente. A combinação adequada destes compostos, juntamente com uma camada de halofosfato, possibilitou uma melhora no índice de reprodução de cores e um aumento considerável na eficácia luminosa, ou seja, permitiu a construção de lâmpadas com menor potência para emissão do mesmo fluxo luminoso.

2.1. Lâmpada fluorescente compacta

Esta lâmpada foi introduzida no mercado no início da década de 80 e apresenta alguns detalhes construtivos que a diferencia das lâmpadas fluorescentes tubulares convencionais, porém, seu princípio de funcionamento é idêntico.

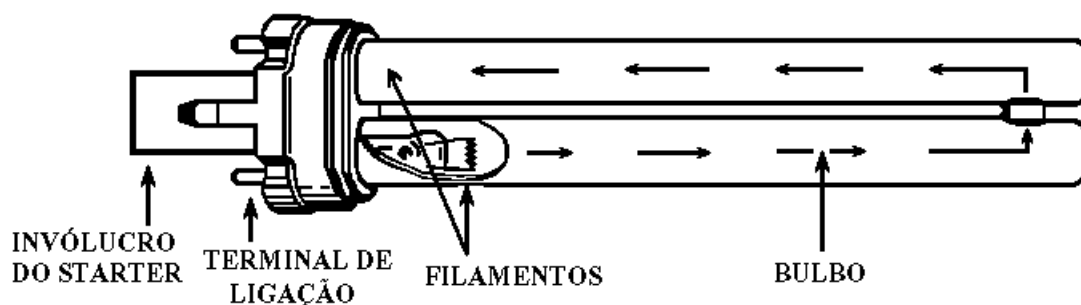


Fig. 2 - Lâmpada fluorescente compacta com "starter" incorporado

O tubo de descarga é constituído de um tubo de vidro do tipo T4 ou T5, com revestimento de "tri-fósforo", com filamentos nas suas extremidades. Existem diversas formas construtivas, sendo duas as mais comuns: a) um tubo único curvado em "U" e b) dois tubos independentes, unidos por uma ponte, apresentada na fig. 2.

A lâmpada fluorescente compacta, em geral só apresenta duas conexões elétricas, uma vez que os filamentos encontram-se ligados em série através de um "starter" (vide a fig. 2), o qual fica alojado num invólucro na base da lâmpada. A estabilização da lâmpada é feita através de um reator indutivo, conectado externamente.

Algumas lâmpadas já apresentam um reator incorporado na sua base, em geral do tipo rosca Edison, que é utilizada em lâmpadas incandescentes. O reator poder ser indutivo ou eletrônico, sendo este último mais leve de forma a reduzir o peso do conjunto.

A lâmpada fluorescente compacta foi concebida para substituir a lâmpada incandescente. Pela tabela 1 verifica-se que a lâmpada compacta apresenta dimensões físicas similares à incandescente, porém consome um sexto da potência e apresenta uma vida útil 8 vezes maior. Apesar de seu custo ainda ser muito elevado (8 a 10 vezes superior ao de uma lâmpada incandescente), torna-se uma alternativa viável em aplicações onde se necessita de uma fonte de luz compacta e com baixo consumo de energia elétrica. A lâmpada fluorescente não oferece riscos à saúde, pois a quase totalidade da radiação ultravioleta emitida é absorvida pelo pó fluorescente e pelo vidro do tubo de descarga.

Tabela 1 Características de algumas lâmpadas fluorescentes compactas e incandescentes

Tipo de Lâmpada	Fluorescente compacta				Incandescente			
Potência (W)	7	9	13	18	40	60	75	100
Fluxo luminoso (lm)	400	600	900	1200	430	730	960	1380
Efic. lum. lamp. (lm/W)	57	67	69	67	10.8	12.2	12.8	13.8
Efic.lum.lamp+reat(lm/W)	36	46	60	57	-----	-----	-----	-----
Vida útil (horas)	8000	8000	8000	8000	1000	1000	1000	1000
Índice Reprodução Cor	81	81	81	81	100	100	100	100
Comprimento total (mm)	133	165	188	232	105	105	105	105

2.2. Alimentação de lâmpadas fluorescentes em corrente alternada de 50/60Hz

Toda lâmpada à descarga apresenta um impedância dinâmica (derivada da tensão em relação à corrente) negativa, ou seja, à medida que a corrente na lâmpada aumenta, a diferença de potencial entre os seus terminais diminui. Para sua operação, seja alimentada em CC ou CA, é necessária a associação em série de um elemento com impedância positiva para estabilização da corrente. Na alimentação em CA, por questões de eficiência, são utilizados elementos reativos (capacitores e indutores).

A maioria das instalações de iluminação com lâmpadas fluorescentes são alimentadas em corrente alternada na frequência usual de rede (50 Hz ou 60 Hz). O dispositivo para estabilização da corrente é conhecido popularmente por reator (em inglês "ballast"). Existem várias configurações, desde simples indutores até sofisticados circuitos eletrônicos.

No Brasil, uma pequena parcela dos reatores comerciais ainda é indutiva, sendo em geral classificados de acordo com o tipo de ignição em: a) reatores com pré-aquecimento (com "starter"), mostrado na fig. 3a e b) reatores de partida rápida, apresentado na fig. 3b.

O pré-aquecimento dos filamentos é uma forma simples para se reduzir a tensão de ignição da lâmpada, através da redução da rigidez dielétrica (capacidade de suportar tensão) da coluna gasosa entre os eletrodos. Nesta aplicação utiliza-se um conjunto individual formado por um reator (em geral um simples indutor) e um dispositivo de chaveamento, que pode ser do tipo mecânico (chave liga/desliga) ou térmico ("starter").

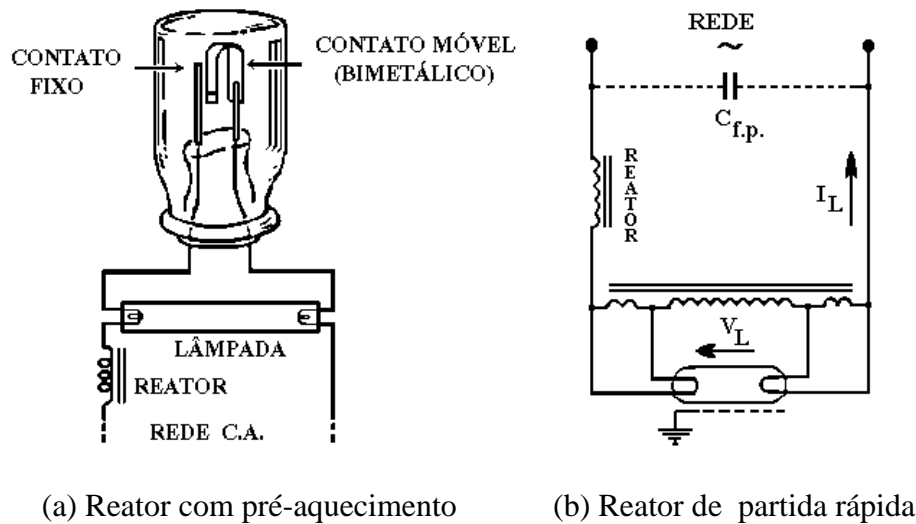


Fig. 3 - Configurações básicas de reatores indutivos para lâmpadas fluorescentes

O "starter", mostrado em detalhe na fig. 3a, é constituída de uma ampola de vidro (aproximadamente 20 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro), contendo um gás (em geral neônio ou hélio) a certa pressão, além de dois contatos separados entre si. Um contato é fixo em forma de haste e o outro, constituído de uma lâmina bimetalítica em forma de U, é móvel. O elemento bimetalítico é obtido, laminando-se duas chapas metálicas com coeficientes de dilatação térmica significativamente diferente.

A tensão da rede C.A. é insuficiente para realizar a ignição da lâmpada, porém, consegue estabelecer um arco com baixa resistência elétrica entre os contatos do "starter", provocando a circulação de corrente (0.8 A a 1.0 A) pelos filamentos limitada pela impedância do reator. O calor gerado pelo arco deforma a lâmina bimetalítica, aproximando-a da haste fixa até estabelecer contato mecânico. Neste instante o "starter" se comporta como um curto-circuito, extinguindo o arco. Na ausência do arco a lâmina bimetalítica esfria rapidamente, afastando-se do contato fixo.

Quando os contatos do "starter" se separam, ouve-se um "clic" característico. A interrupção brusca da corrente provoca uma diferença de potencial momentânea e de valor elevado ($v(t) = L \cdot di(t)/dt$) entre os terminais do reator, que, somada à tensão C.A. naquele instante, será aplicada sobre a lâmpada. Se houver a ignição da descarga, o "starter" permanecerá em circuito aberto, pois a tensão da lâmpada acesa é insuficiente para abrir um arco entre os seus contatos. Caso contrário, o ciclo de pré-aquecimento se inicia novamente.

A partida da lâmpada demora, em geral, alguns segundos e a escolha do "starter" é feita em função da tensão da lâmpada. O sucesso da ignição da lâmpada após o primeiro ciclo de pré-aquecimento depende, entre outros fatores, da temperatura ambiente e da umidade atmosférica. Em ambientes frios e úmidos são, em geral, necessários três a seis ciclos.

Os reatores de partida rápida não utilizam "starter" e na sua maioria são projetados para alimentar duas lâmpadas fluorescentes ligadas em série. São constituídos, em geral, de um auto-transformador com elevada reatância de dispersão e enrolamentos de baixa tensão (3 V a 4 V), aos quais são conectados os filamentos. A tensão no secundário em vazio é suficientemente elevada para realizar a partida da lâmpada (numa ampla faixa de temperatura ambiente). A ignição da lâmpada ocorre em menos de 1 segundo, justificando a denominação "partida rápida".

Ao contrário dos reatores com pré-aquecimento, existe circulação permanente de corrente pelos filamentos, cujo valor é significativamente reduzido, após a ignição da lâmpada, pelo aumento da resistência dos filamentos com a temperatura e pela queda de tensão na reatância de dispersão imposta pela circulação de corrente na lâmpada.

A presença de uma superfície equipotencial aterrada sob a lâmpada possibilita uma distribuição de cargas estáticas na parede do tubo, que altera a distribuição de potencial entre os eletrodos, reduzindo ainda mais a tensão de ignição da lâmpada. As normas em geral impõem a presença de uma superfície metálica plana (por ex. uma luminária) e aterrada, de mesmo comprimento da lâmpada e disposta a uma distância não superior a 25 mm da mesma.

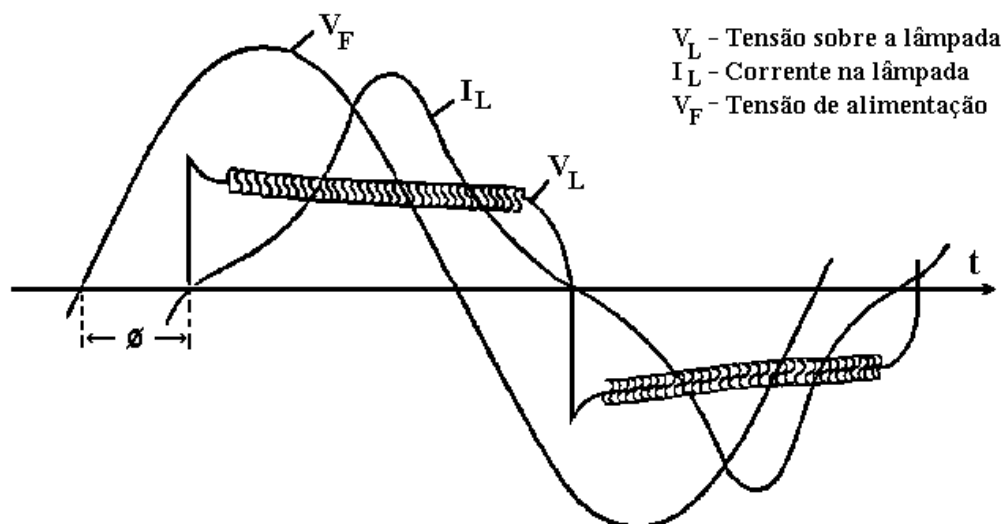


Fig. 4 - Formas de onda para reatores indutivos

A fig. 4 apresenta algumas formas de onda, válidas somente para reatores indutivos, independente da sua configuração. Pode-se verificar que a tensão sobre a lâmpada (V_L) tem um formato aproximadamente retangular e apresenta oscilação de frequência elevada superposta, devido a instabilidades da descarga nas proximidades da região anódica. A corrente da lâmpada (I_L) não é perfeitamente senoidal, porém a sua componente fundamental encontra-se em fase com a tensão sobre a lâmpada. O conjunto reator+lâmpada exibe o comportamento de uma carga indutivo-resistiva com fator de potência da ordem de 0.5. Alguns reatores de partida rápida comerciais já apresentam um capacitor de compensação interno (vide fig. 3.b) e o seu fator de potência é da ordem de 0.9.

2.3. Reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes tubulares

Reator eletrônico é a denominação popular de um equipamento que converte a tensão de rede (50 Hz ou 60 Hz) em uma tensão de alta frequência (acima de 18 kHz), adequada para alimentar lâmpadas fluorescentes.

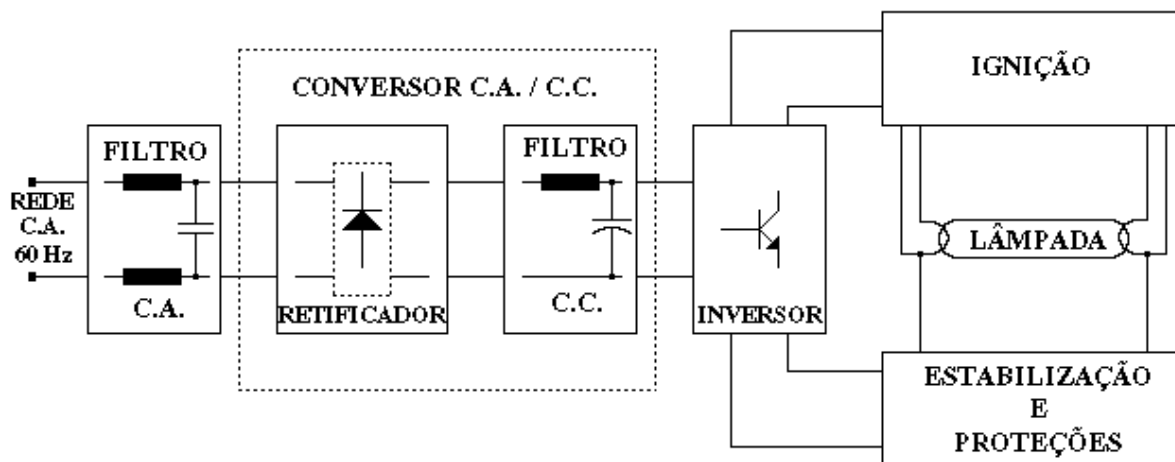


Fig. 5 - Diagrama de blocos de um reator eletrônico

Um reator eletrônico, pode ser representado pelos blocos funcionais indicados na fig. 5: a) um conversor C.A./C.C., que transforma a tensão da rede em tensão contínua; b) um inversor que converte a tensão C.C. em uma tensão C.A. de alta frequência; c) circuitos que realizam a ignição e estabilização da corrente na lâmpada.

O inversor gera uma tensão com frequência constante, cujo valor é superior ao limiar da audição (18 kHz) e inferior a 50 kHz para evitar problemas de interferência em transmissões por rádio. A maioria dos reatores eletrônicos alimenta a lâmpada com corrente senoidal.

Um reator eletrônico de boa qualidade utiliza filtros no lado da rede de alimentação com a finalidade de: a) evitar a circulação pela rede C.A. de correntes de frequência elevada que podem provocar interferência em sistemas de comunicação; b) providenciar a filtragem adequada da corrente absorvida pelo reator, eliminando os seus componentes harmônicos e mantendo-a em fase com a tensão de alimentação para assegurar um fator de potência elevado.

As funções de ignição e estabilização da corrente da lâmpada são em geral realizadas por circuitos utilizando indutores e capacitores. Os indutores apresentam dimensões físicas e peso reduzidos, uma vez que os valores de indutância são, em geral, 2 a 3 ordens de grandeza inferiores aos utilizados nos reatores indutivos convencionais.

A versatilidade e diversidade de recursos oferecidos pela eletrônica permite incluir o pré-aquecimento de filamentos e funções de proteção, as quais desligam o reator em caso de falha de ignição da lâmpada ou desconectam-no da rede em caso de curto-circuito interno. Alguns reatores eletrônicos permitem variar a luminosidade da lâmpada (“dimming”) e possuem interfaces para sistemas de controle centralizado.

Lâmpadas fluorescentes alimentadas em alta frequência (acima de 5 kHz), operando na sua potência nominal, apresentam uma elevação de fluxo luminoso de 6% a 12%, em relação ao valor obtido na frequência da rede. A partir da fig. 6, verifica-se que a eficácia luminosa da lâmpada (medida em lm/W) aumenta com a da frequência da tensão de alimentação, até atingir um patamar para frequências acima de 5 kHz. O valor percentual do aumento de fluxo luminoso depende, entre outros fatores, das dimensões físicas do tubo de descarga.

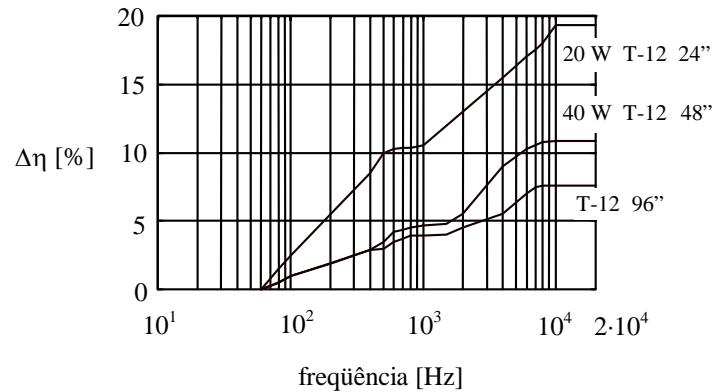


Fig. 6 - Aumento percentual da eficácia luminosa ($\Delta\eta$) em função da frequência

O aumento de eficiência poder ser justificado da seguinte forma: A descarga em lâmpadas fluorescentes, alimentadas na frequência da rede, se extingue parcialmente toda vez que a tensão de alimentação cai abaixo do valor de pico da tensão de arco, ou seja, em 60 Hz este processo se repete 120 vezes por segundo. O processo de restabelecimento da descarga a cada semiciclo envolve consumo de energia. Aumentando-se a frequência até um valor, no qual o semi-período da tensão é inferior à vida média de determinados componentes da descarga, esta se torna mais estável na região próxima dos eletrodos. Nestas condições, a lâmpada comporta-se como um resistor, pois a sua tensão torna-se praticamente senoidal, em fase com a corrente, e as oscilações de alta frequência, mostradas na fig. 4, desaparecem por completo.

As perdas dos reatores eletrônicos são significativamente inferiores aos de seus similares indutivos. Por exemplo, o conjunto constituído de um reator indutivo de partida rápida e duas lâmpadas fluorescentes de 40 W (T12), ambas operando na condição nominal de fluxo luminoso, absorve 102 W. Já um conjunto com reator eletrônico nas mesmas condições consome apenas 79 W, resultando uma economia de energia elétrica de 25%. No entanto, a escolha do reator eletrônico deve ser criteriosa, pois existem diversos modelos que alimentam a lâmpada abaixo da sua especificação nominal de fluxo luminoso, resultando uma falsa economia de energia.

As normas estabelecem que a temperatura da carcaça de reatores indutivos não pode ultrapassar de 65°C em relação a temperatura ambiente, ou seja, a temperatura da carcaça de um reator indutivo pode atingir 100°C quando a temperatura ambiente estiver a 35°C. Por outro lado, nos reatores eletrônicos comerciais a elevação de temperatura na carcaça não ultrapassa 20°C. Portanto, luminárias com reatores eletrônicos aquecem menos, reduzindo a carga térmica do sistema de ar condicionado e proporcionando uma economia adicional de energia elétrica.

O fluxo luminoso emitido por lâmpadas fluorescentes, alimentadas por reatores indutivos, apresenta uma modulação de amplitude que acompanha a frequência da rede. Quando a luz da lâmpada ilumina um corpo que gira com uma rotação igual ou próxima à um múltiplo da frequência da rede, o observador vê a imagem de um corpo em repouso ou girando lentamente. Este fenômeno, conhecido por efeito estroboscópico, desaparece quando se utilizam reatores eletrônicos, devido a alimentação da lâmpada em alta frequência.

Os reatores eletrônicos apresentam as seguintes vantagens em relação aos seus similares indutivos:

- a) Redução do consumo de energia;
- b) Aumento da eficácia luminosa da lâmpada fluorescente tubular;
- c) Eliminação do efeito estroboscópico;
- d) Fator de potência elevado;

- e) Proteções para desligamento do reator em caso de falha;
- f) Partida rápida da lâmpada;
- f) Redução da carga térmica do sistema de ar condicionado;
- h) Redução no peso e dimensões físicas do reator;
- i) Alimentação tanto em C.A. como em C.C.;
- j) Aumento da vida útil do conjunto reator + lâmpada.

A principal desvantagem do reator eletrônico é o custo, que, dependendo do modelo, é 2 a 4 vezes superior ao de reatores de partida rápida. Atualmente a sua aplicação é economicamente viável em instalações de iluminação de grande porte, onde é obtida uma elevada eficiência global com a utilização de lâmpadas com “tri-fósforo” e luminárias com películas refletoras. No entanto, o aumento da produção dos reatores eletrônicos tem reduzido o seu custo e em breve deverá se tornar uma alternativa viável para pequenas instalações.

3. INVERSOR RESSONANTE

O inversor é o componente mais importante do reator eletrônico. Para obtenção de grandezas senoidais na lâmpada, os modelos comerciais em geral utilizam inversores com elos ressonantes. Existem duas topologias amplamente utilizadas: a) o inversor com elo ressonante série alimentado por fonte de tensão e b) o inversor com elo ressonante paralelo alimentado por fonte de corrente a ser analisado nesta experiência.

3. INVERSOR RESSONANTE ALIMENTADO POR FONTE DE CORRENTE

A fig. 7 mostra um circuito típico de um inversor ressonante auto-oscilante, alimentado por fonte de corrente CC.

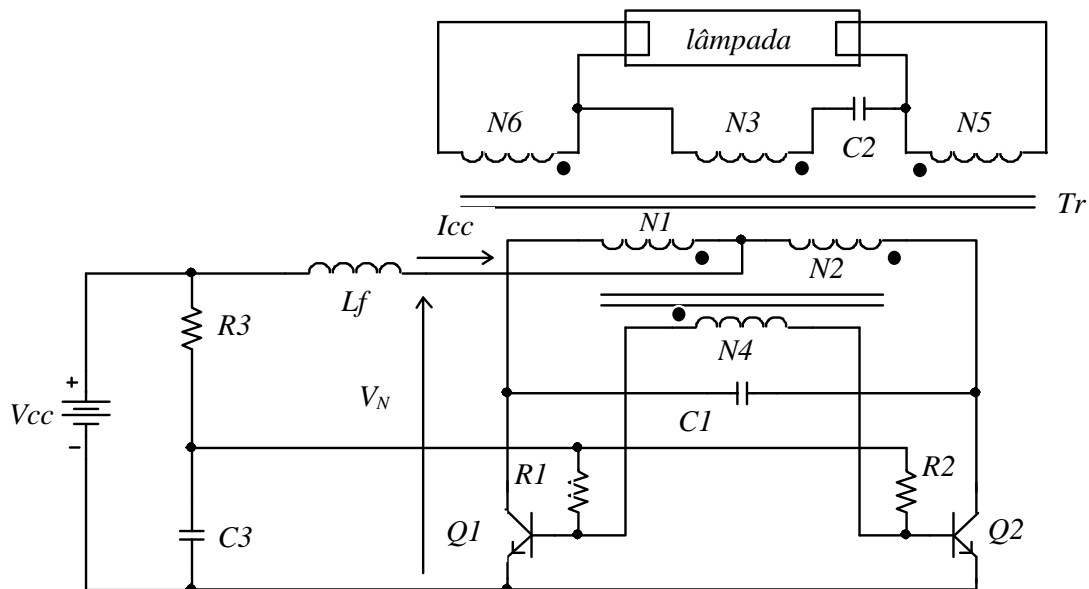


Fig. 7 -Circuito de um inversor ressonante alimentado por fonte de corrente.

A fonte de corrente constante é obtida inserindo-se o indutor L_f em série com a fonte de tensão de alimentação. Os transistores conduzem alternadamente e são polarizados pelos resistores R_1 e R_2 em conjunto com R_3 e C_3 . Na partida, um circuito de inicialização é dispensável, já que os ramos R_2Q_2 e R_1Q_1 nunca são perfeitamente simétricos. Desta forma, um dos transistores conduzirá inicialmente, bloqueando o

outro e impondo corrente constante através de um dos enrolamentos primários $N1$ ou $N2$ do transformador Tr . A tensão induzida no enrolamento auxiliar $N4$, ligado ao circuito de base dos transistores com a polaridade indicada, provoca a condução alternada de $Q1$ e $Q2$. O capacitor $C1$ e a indutância de magnetização do transformador determinam a frequência de operação do circuito em vazio (sem lâmpada).

Os enrolamentos de filamento $N5$ e $N6$ realizam a função de pré-aquecimento dos filamentos da lâmpada e inicialmente (na partida) não há corrente no enrolamento secundário $N3$. A ignição de lâmpada é realizada pela tensão induzida no enrolamento secundário $N3$, no instante em que a temperatura dos filamentos alcança o valor adequado para a emissão de elétrons.

Em alta frequência pode-se verificar que a tensão e a corrente na lâmpada estão em fase e ambas possuem a mesma forma de onda, de forma que a lâmpada apresenta o comportamento similar ao de um resistor ideal. Portanto, do ponto de vista elétrico, o acendimento da lâmpada equivale à inserção de uma resistência em série com o capacitor $C2$, cuja função é estabilizar a corrente na lâmpada. Convém lembrar que a lâmpada, mesmo em alta frequência, apresenta uma curva estática tensão x corrente com impedância dinâmica negativa.

Para efeito de projeto, o inversor, operando em regime permanente e com a lâmpada acesa, pode ser representado por um circuito equivalente simplificado, assumindo-se as seguintes hipóteses: a) Os enrolamentos $N1$ e $N2$ são perfeitamente simétricos. b) os transistores apresentam intervalos de condução simétricos c) a lâmpada é modelada através de uma resistência equivalente de valor fixo R .

Substituindo os transistores por chaves ideais e admitindo a fonte de alimentação como um gerador de corrente constante, resulta o circuito simplificado da fig. 8:

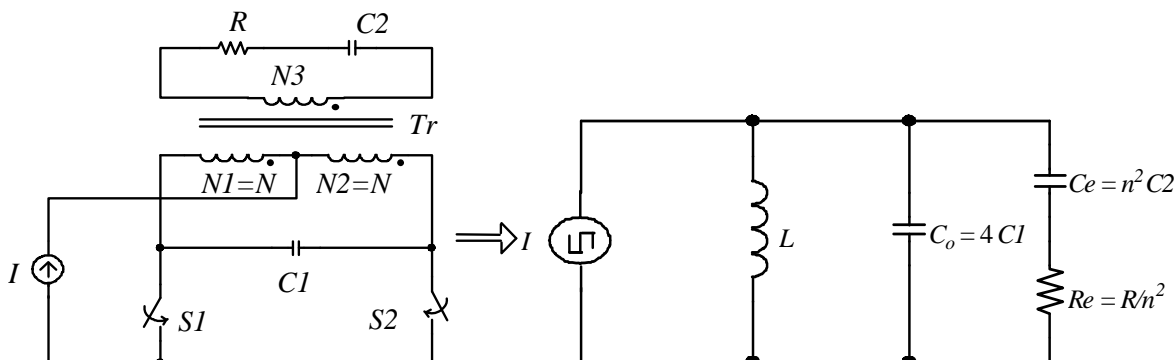


Fig. 8 - Circuito equivalente simplificado do inversor

sendo:

- I - Corrente da fonte;
- Co - Capacitância $C1$ refletida para o enrolamento $N1$;
- L - Indutância de magnetização do transformador $Tr1$ refletida para o enrolamento $N1$;
- n - Relação de espiras $N3/N1$;
- Ce - Capacitância $C2$ refletida para o enrolamento $N1$;
- Re - Resistência equivalente da lâmpada refletida par o enrolamento $N1$.

A impedância equivalente $Z(s)$ do inversor, vista pelos terminais da fonte de corrente, é dada pela expressão:

$$Z(s) = \frac{\frac{s}{C_o} \cdot \left(s + \frac{1}{R_e \cdot C_e} \right)}{s^3 + \left(\frac{1}{R_e \cdot C_o} + \frac{1}{R_e \cdot C_e} \right) \cdot s^2 + \frac{1}{L \cdot C_o} \cdot s + \frac{1}{L \cdot C_o \cdot R_e \cdot C_e}} \quad (1)$$

O inversor é auto realimentado e a sua frequência de operação é determinada pelos polos dominantes (complexos conjugados) da impedância equivalente $Z(s)$.

Em vazio (lâmpada apagada) a frequência de operação é dada por:

$$f_{\text{vazio}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_o}} \quad (2)$$

Com a lâmpada acesa, a partir do circuito equivalente da fig. 8 verifica-se que resistência equivalente da lâmpada refletida para o enrolamento primário é baixa de forma que a frequência de operação pode ser aproximada pela expressão:

$$f_{\text{carga}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_o + C_e)}} \quad (3)$$

O dimensionamento do indutor de filtro L_f é feito a partir da especificação da máxima ondulação de corrente admissível. A fig. 9 apresenta as formas de onda típicas da corrente pelo indutor L_f e da tensão no tap central do primário do transformador $v_N(t)$.

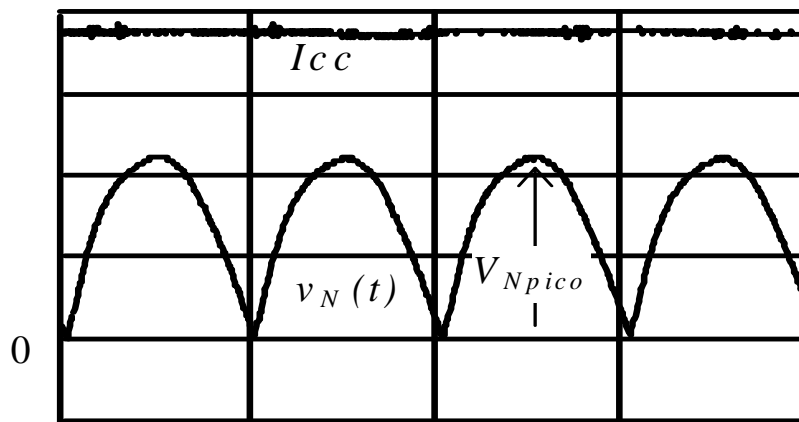


Fig. 9 - Corrente I_{cc} no indutor L_f e tensão V_N no tap central de Tr

Em regime permanente o valor médio da tensão sobre o indutor L_f é nulo, ou seja, o valor médio da tensão no tap central de Tr , a menos das perdas no indutor, é igual a tensão da fonte de alimentação. A tensão $v_N(t)$ são arcos de senoide, cujo valor de pico V_{Npico} é dado por:

$$V_{Npico} = \frac{\pi}{2} \cdot V_{Nmed} \approx \frac{\pi}{2} \cdot V_{cc} \quad (4)$$

O indutor de filtro é obtido a partir da especificação de ΔI_{cc} (valor de pico a pico da ondulação da corrente de alimentação) e assumindo que a tensão sobre o indutor tenha valor médio nulo, resultando:

$$L_f = \frac{0.42}{\omega \cdot \Delta I_{cc}} \cdot V_{Npico} \quad (5)$$

sendo, ω é a frequência de operação do inversor em rad/s.

4. PARTE PRÁTICA

4.1. ALIMENTAÇÃO DA LÂMPADA ATRAVÉS DE REATOR INDUTIVO COM STARTER

Nesta parte da experiência foram realizadas medições no arranjo experimental da fig. 10, utilizando uma lâmpada PL de 9 W com starter incorporado na base e um reator indutivo. O arranjo foi alimentado com a tensão da rede de 220 V.

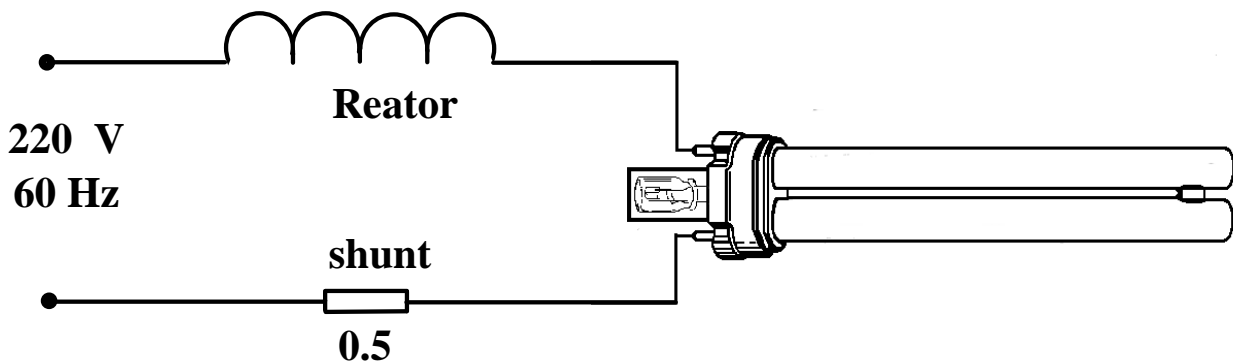


Fig. 10 - Lâmpada fluorescente compacta com reator indutivo

O **Anexo 1** contem: i) registros de formas de onda da tensão e corrente na lâmpada e da tensão da rede com o sistema operando em regime, ii) a característica $V \times I$ (figura de Lissajous) da lâmpada e iii) registros de tensão e corrente na lâmpada durante o transitório de partida, com a lâmpada fria e quente.

4.2. ALIMENTAÇÃO DA LÂMPADA ATRAVÉS DE INVERSOR

Nesta parte da experiência foram realizadas medições no arranjo experimental da fig. 11, utilizando uma lâmpada PL de 10 W, sem starter, alimentada através de um inversor a partir de uma **fonte CC de 24 V**.

4.2.1. Medições com a lâmpada apagada (circuito em vazio)

Nesta parte os filamentos da lâmpada foram desligados, colocando a chave do arranjo experimental na posição OFF. A fonte de alimentação CC ajustável foi conectada ao arranjo e a tensão foi ajustada no seu nível mínimo. Em seguida a fonte foi ligada e a tensão foi incrementada lentamente até atingir 24 V. Nesta condição foram registradas as formas de onda no circuito que estão reproduzidas no **Anexo 2**.

4.2.2. Medições com a lâmpada acesa (circuito em carga)

Nesta parte os filamentos da lâmpada foram ligados, colocando a chave do arranjo experimental na posição ON. A fonte foi ligada com a tensão previamente ajustada em 24 V. Após alguns minutos, foram registradas as formas de onda no circuito, que estão reproduzidas no **Anexo 2**.

Para a tensão de alimentação de 24V e a lâmpada operando em regime permanente, o verificou-se que o valor médio da corrente fornecida pela fonte foi de 460 mA.

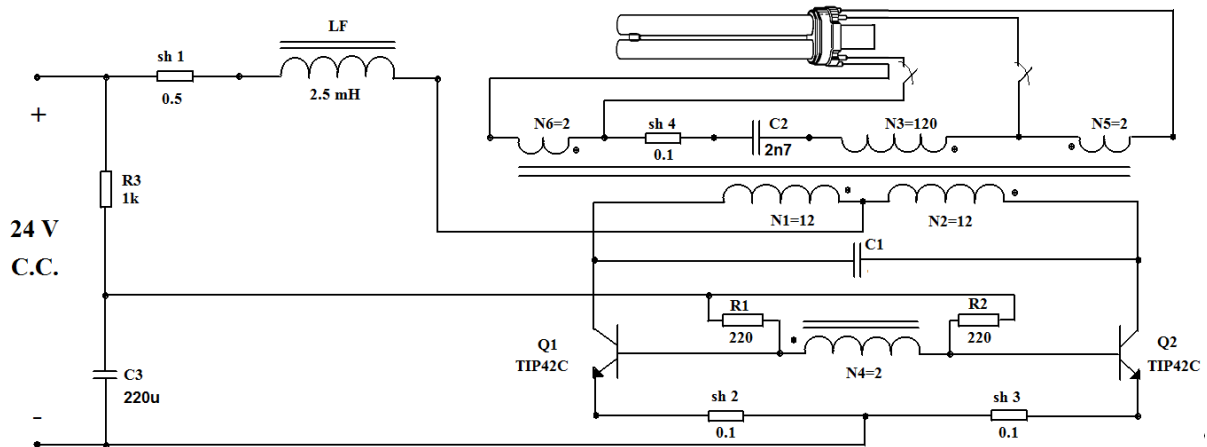


Fig. 11 - Lâmpada fluorescente compacta alimentada através de um inversor

5. ANÁLISE DAS MEDIÇÕES E CÁLCULO DE PARÂMETROS

5.1. ALIMENTAÇÃO DA LÂMPADA ATRAVÉS DE REATOR INDUTIVO COM STARTER

5.1.1. Estimar o fator de potência ($\cos\phi$) do conjunto, levando em conta somente a defasagem entre a tensão da rede e a corrente na lâmpada.

5.1.2. Calcular a reatância do reator e comparar com o valor nominal de $X= 960 \Omega$ (sendo $L=2.5 \text{ H}$ e $R_{\text{perdas}}=178 \Omega$).

Para isso, desenhe o diagrama de fasores das tensões eficazes da rede, da lâmpada (considere apenas a componente fundamental) e da tensão sobre o reator. Assuma que a tensão e corrente da lâmpada estejam em fase e atrasados de um ângulo ϕ calculado no item anterior. Calcule o valor eficaz da tensão sobre o reator e obtenha o valor eficaz da corrente na lâmpada dos registros, assumindo que a mesma seja senoidal.

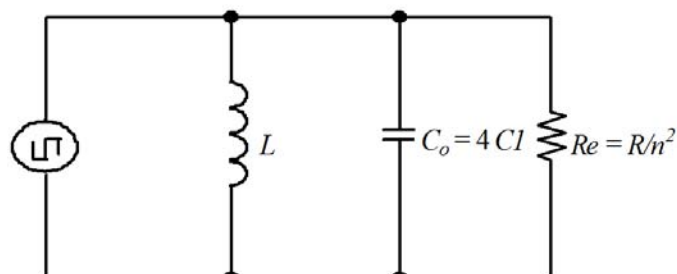
5.1.3. Nos registros do transitório da partida, identificar os fenômenos físicos envolvidos em cada um dos intervalos. Determinar o tempos de partida da lâmpada quente e fria com a atuação do starter e comparar ambos os valores.

5.2. ALIMENTAÇÃO DA LÂMPADA FLUORESCENTE ATRAVÉS DO INVERSOR

5.2.1. Admitindo que a indutância de magnetização do transformador refletida para o enrolamento $N1$ é de $L1=37 \mu\text{H}$, calcular o valor do capacitor $C1$.

5.2.2. Calcular a resistência equivalente da lâmpada. Para isso, despreze o efeito do capacitor $C2$ e admita que o inversor ressonante possa ser modelado pelo circuito RLC paralelo referido a um dos enrolamentos primários mostrado abaixo. Equacione o circuito e adotando os parâmetros

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad \text{e} \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$



- 5.2.3. Calcular o valor da indutância de LF utilizando as medições em carga. Comparar com o valor nominal. Lembre-se que em série com a fonte de tensão de alimentação existem o shunt 1 ($Sh1=0.5 \Omega$) e a resistência do enrolamento de LF (aprox. 0.5Ω).
- 5.2.4. Comparar as figuras de Lissajous da lâmpada obtidas em 60 Hz e em alta frequência e tire suas conclusões.
- 5.2.5. Determinar os tempos de partida da lâmpada quente e fria e compare com os valores obtidos com a atuação do starter.
- 5.2.6. Explicar o degrau observado na forma onda da corrente na lâmpada na Fig. A2.9. (Sugestão: analisar o circuito equivalente da Fig. 8).
- 5.2.7. Comentar o desempenho do inversor. O inversor utiliza um modo de chaveamento pouco dissipativo para os transistores conhecido como ZVS (Zero Voltage Switching). Indique as formas de onda que mostram este modo de operação.

RELATÓRIO

O relatório deverá ser individual e obedecer a sequência indicada no item 5 e não deverá conter introdução teórica.

- i) Nos cálculos e nas análises sempre informar de quais registros as informações foram obtidas.
- ii) Identificar nos registros as grandezas que foram utilizadas nos cálculos.
- iii) Informar as hipóteses e modelos adotados nas deduções e nos cálculos.
- iv) Os valores numéricos (utilizar até duas decimais) utilizados nas fórmulas devem estar explicitados.
- v) O relatório deve conter comentários sobre eventuais desvios observados em relação às formas de onda previstas pela teoria.
- vi) O relatório deve ser entregue em formato PDF

Anexo 1 – REGISTROS DE FORMAS DE ONDA DO CONJUNTO REATOR + LÂMPADA + STARTER

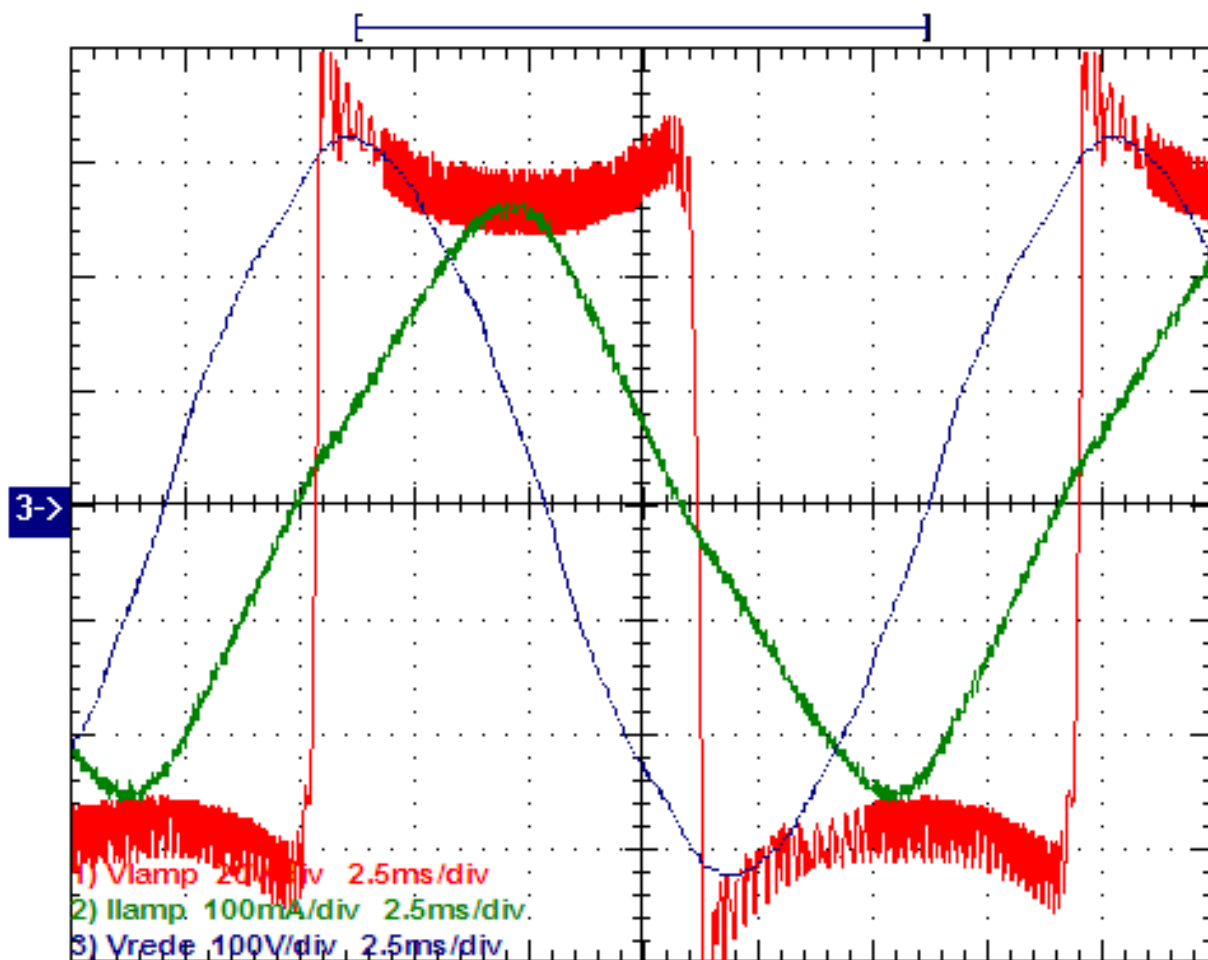


Fig. A1.1 – Tensão e corrente na lâmpada e tensão da rede

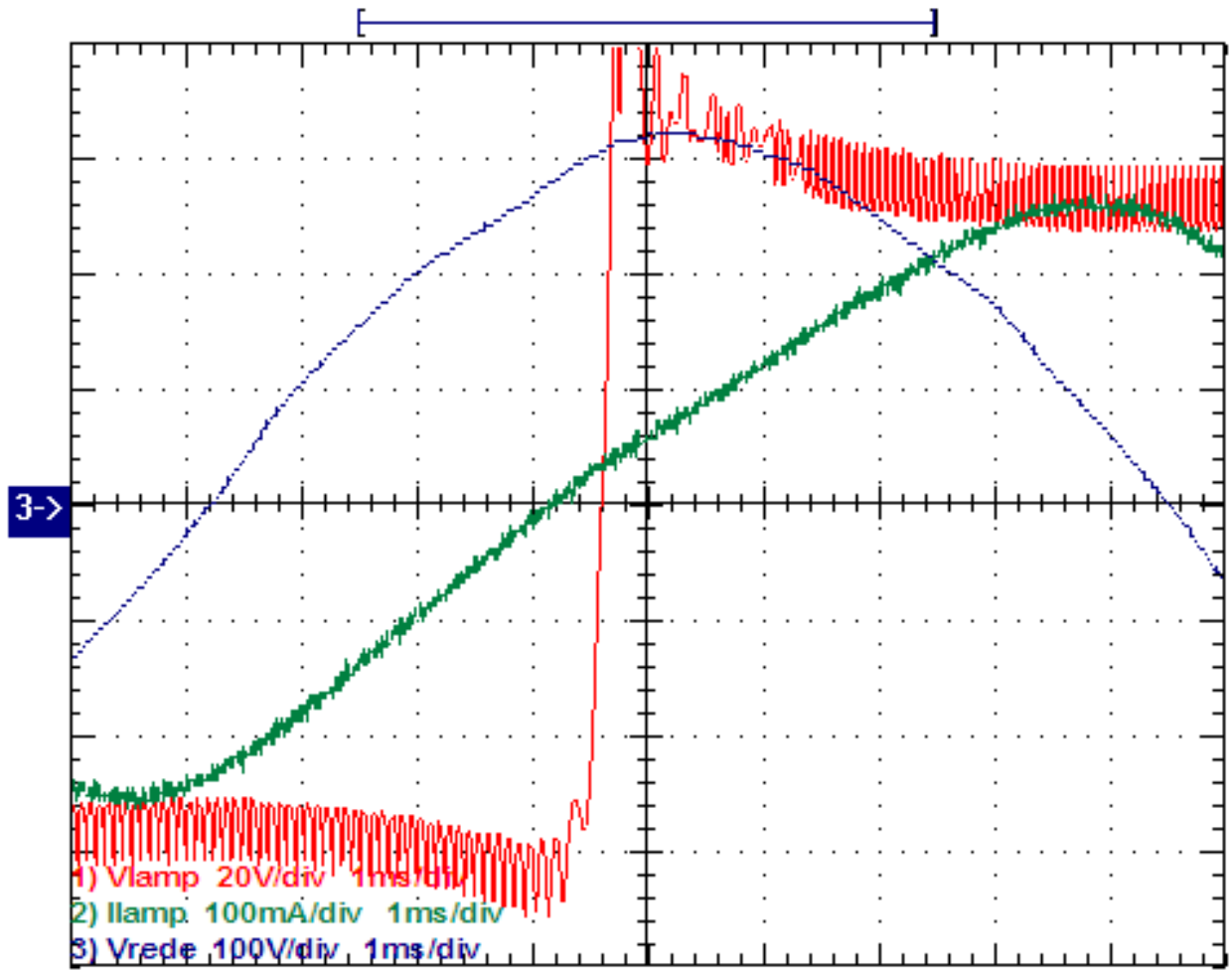


Fig. A1.2 – Tensão e corrente na lâmpada e tensão da rede. Escala de tempo expandida.

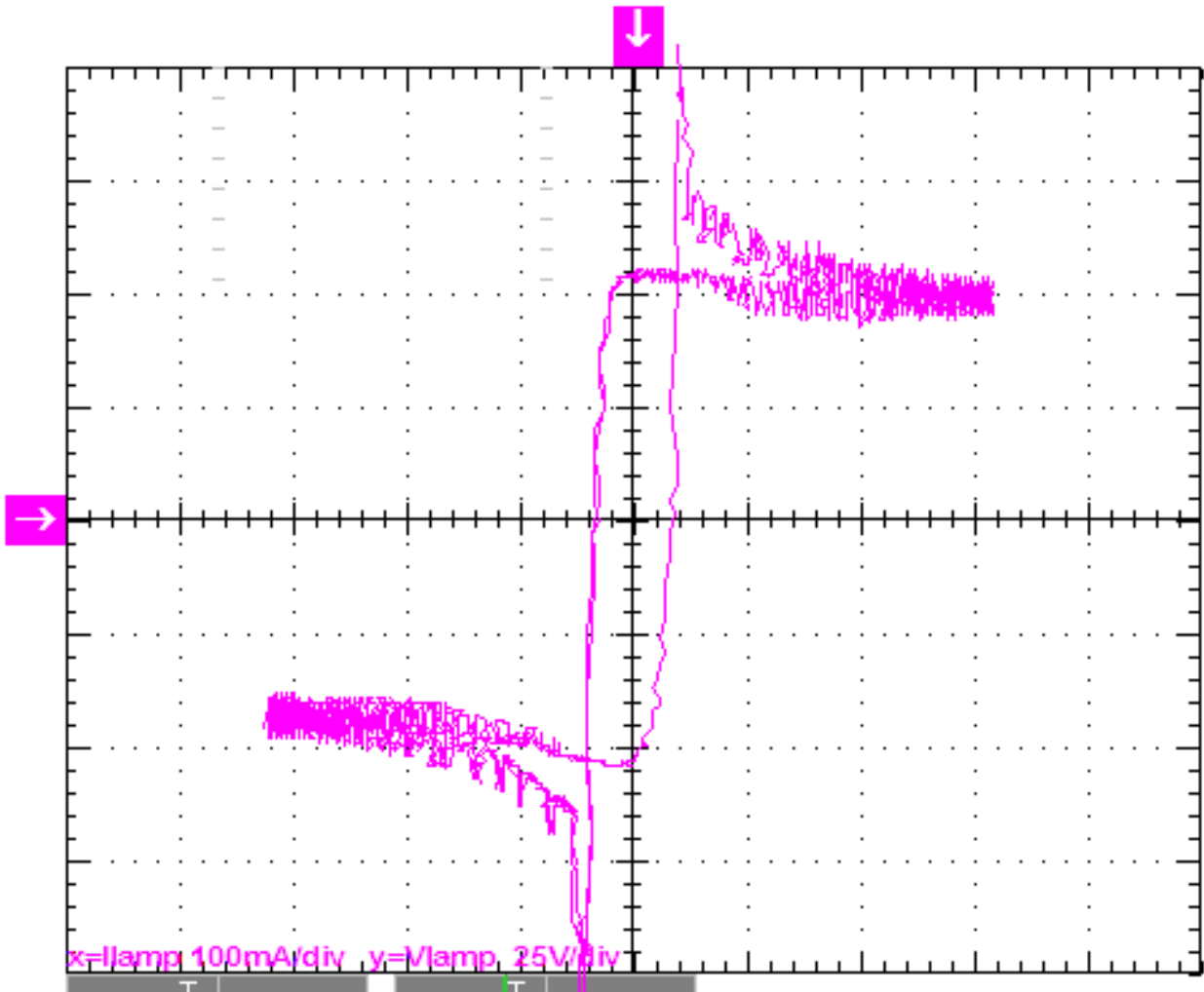


Fig. A1.3 – Figura de Lissajou da lâmpada

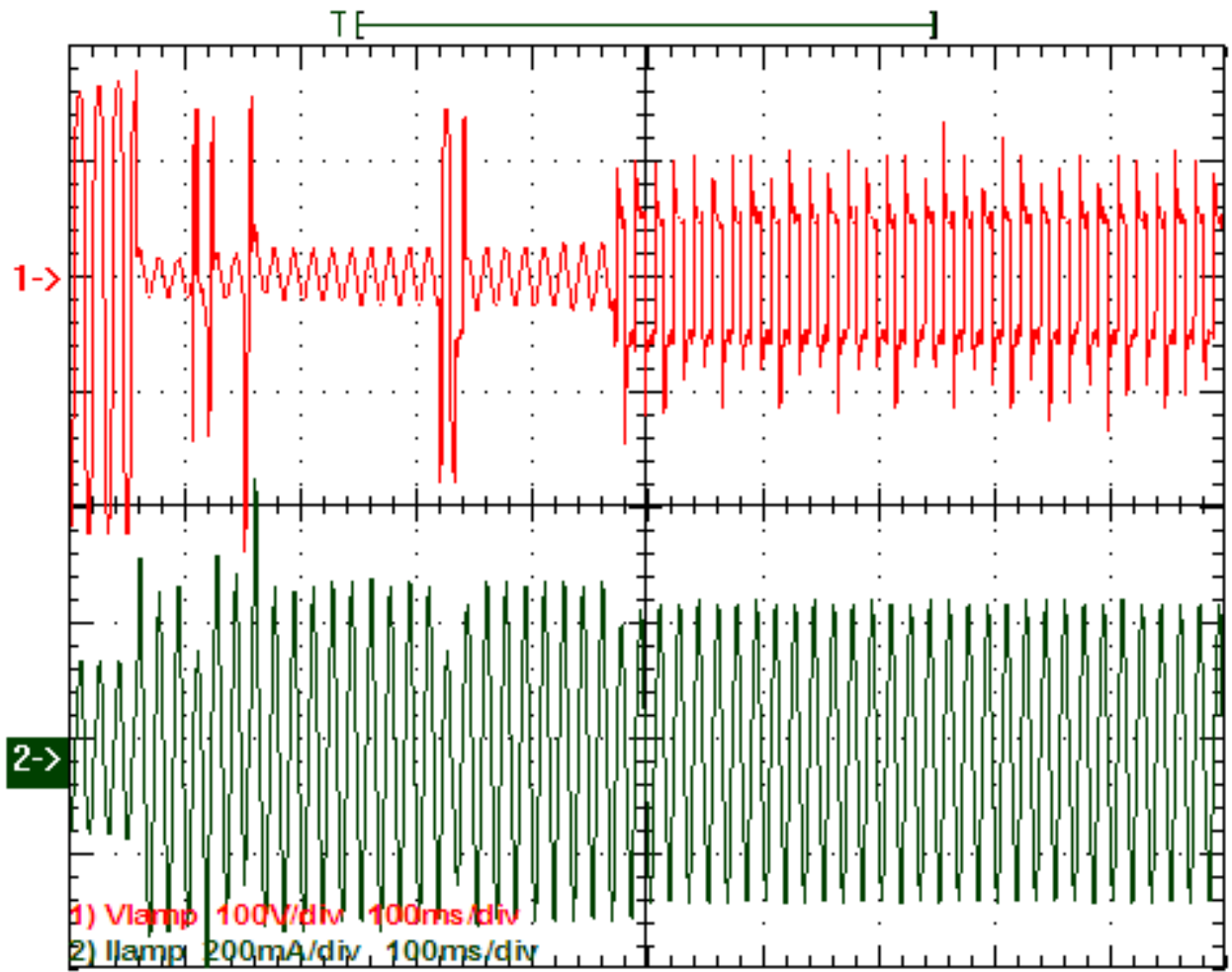


Fig. A1.4 – Tensão e corrente na lâmpada durante a partida – Lâmpada quente

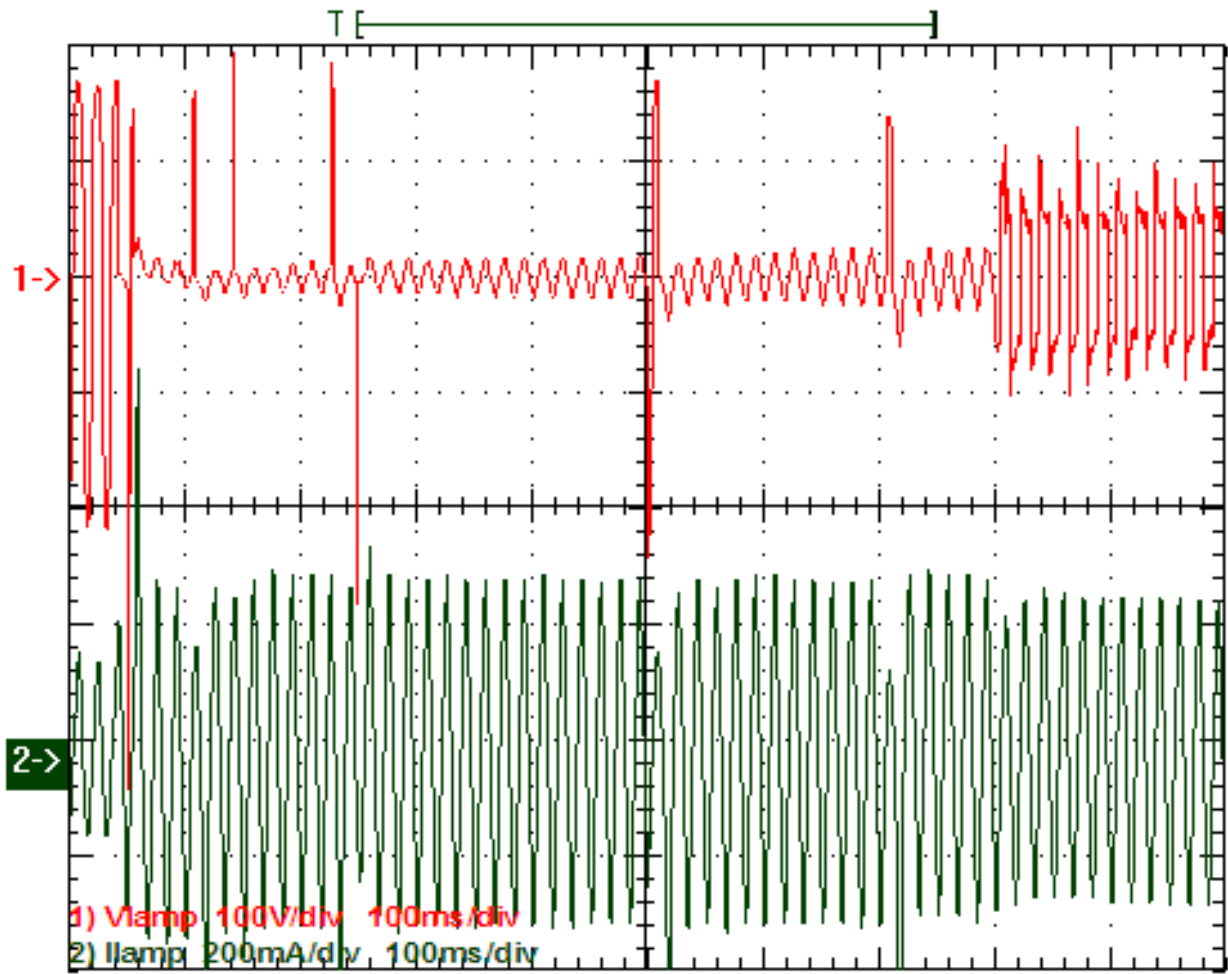


Fig. A1.5 – Tensão e corrente na lâmpada durante a partida – Lâmpada fria

Anexo 2 – REGISTROS DE FORMAS DE ONDA DO INVERSOR ALIMENTANDO A LÂMPADA

REGISTROS COM A LÂMPADA APAGADA (CIRCUITO OPERANDO EM VAZIO)

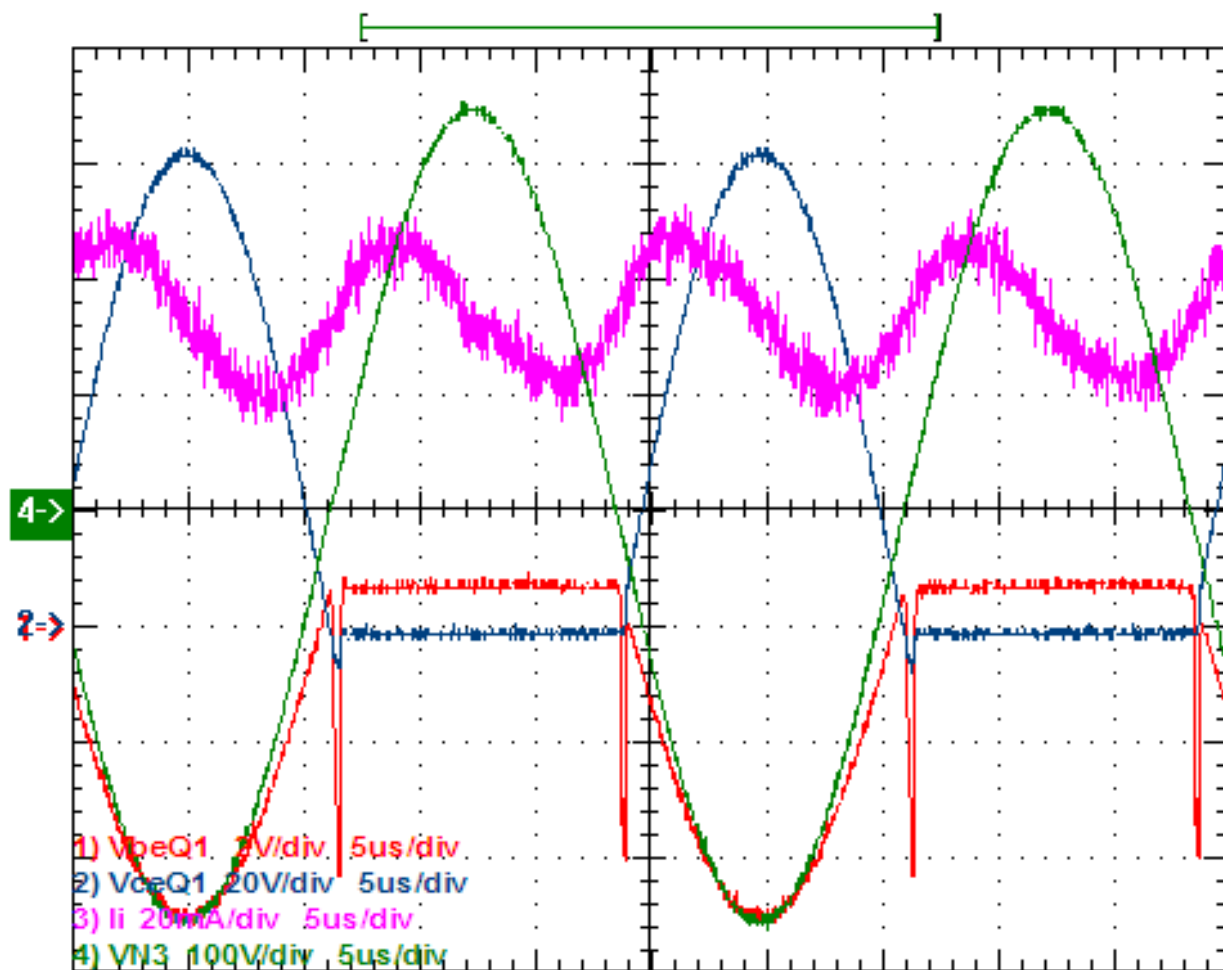


Fig. A2.1 – Tensões coletor –emissor e base-emissor de Q1, corrente de alimentação I_i e tensão entre o tap central e o ponto de emissor comum.

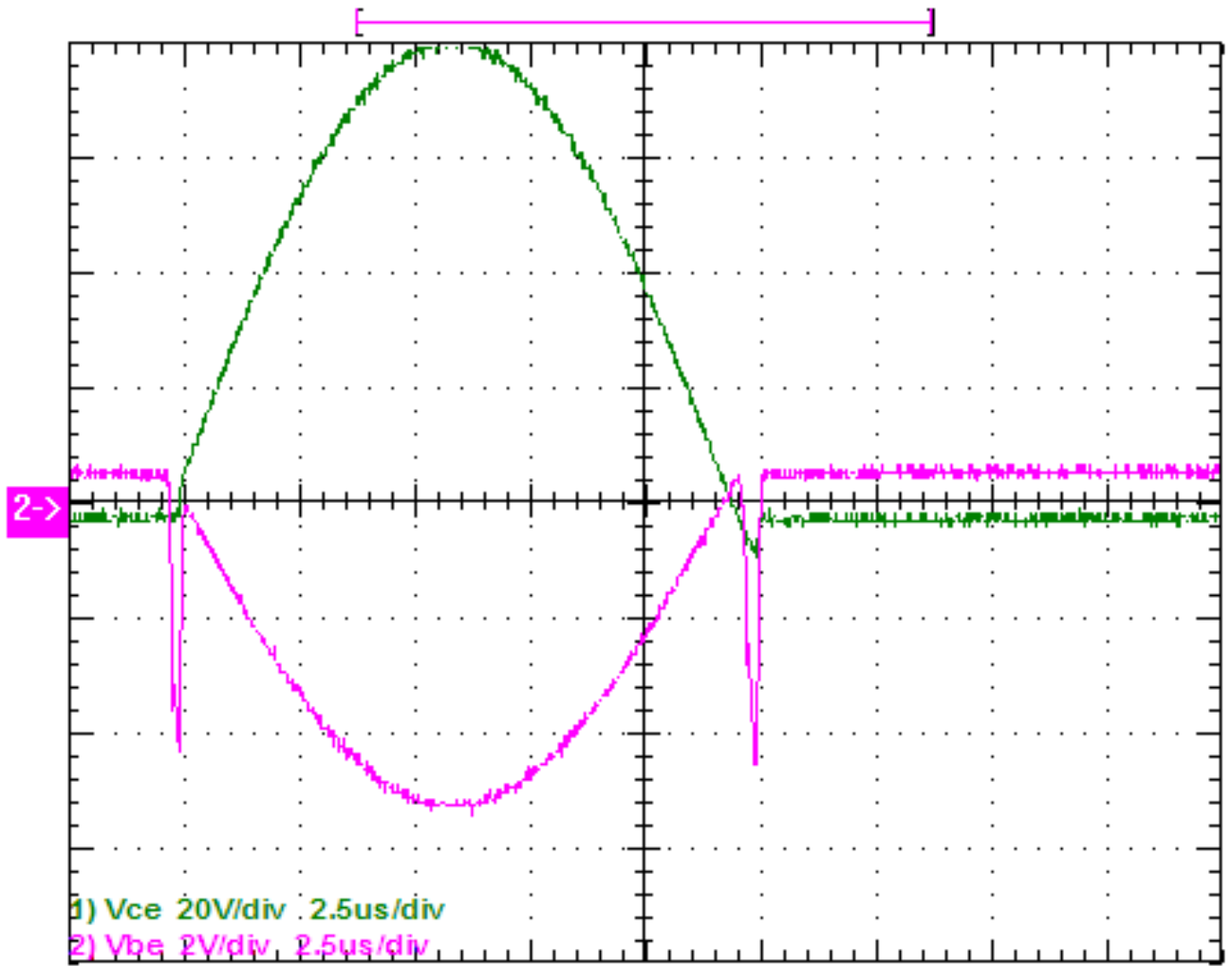


Fig. A2.2 – Tensões coletor –emissor e base-emissor de Q1, com escala de tempo expandida

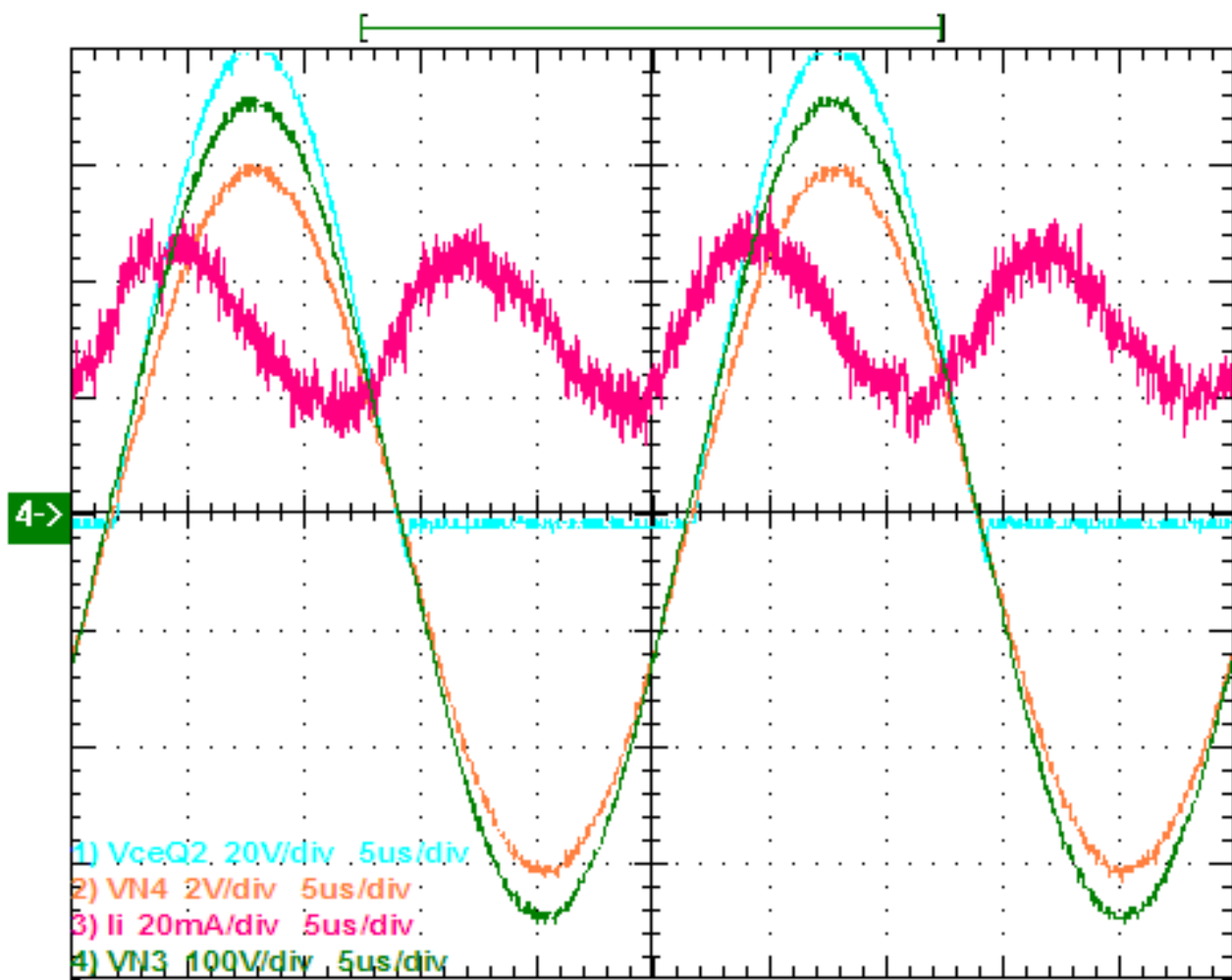


Fig. A2.3 – Tensão coletor – emissor de Q2, corrente de alimentação I_i , tensões nos enrolamentos N4 e N3.

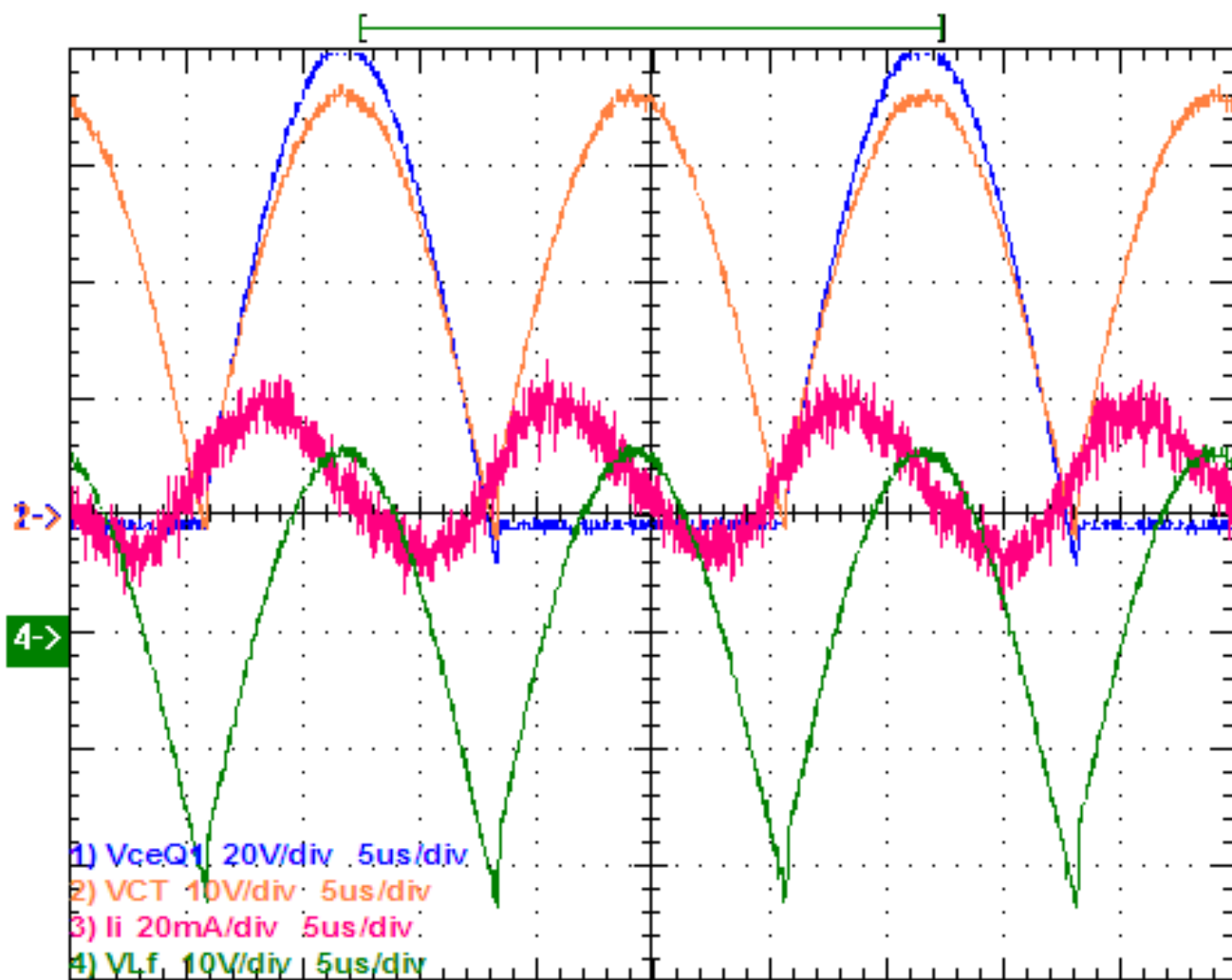


Fig. A2.4 – Tensão coletor – emissor de Q1, corrente de alimentação I_i , tensão sobre o indutor L_f e tensão entre o tap central e o ponto de emissor comum.

REGISTROS COM A LÂMPADA ACESA (CIRCUITO OPERANDO EM CARGA)

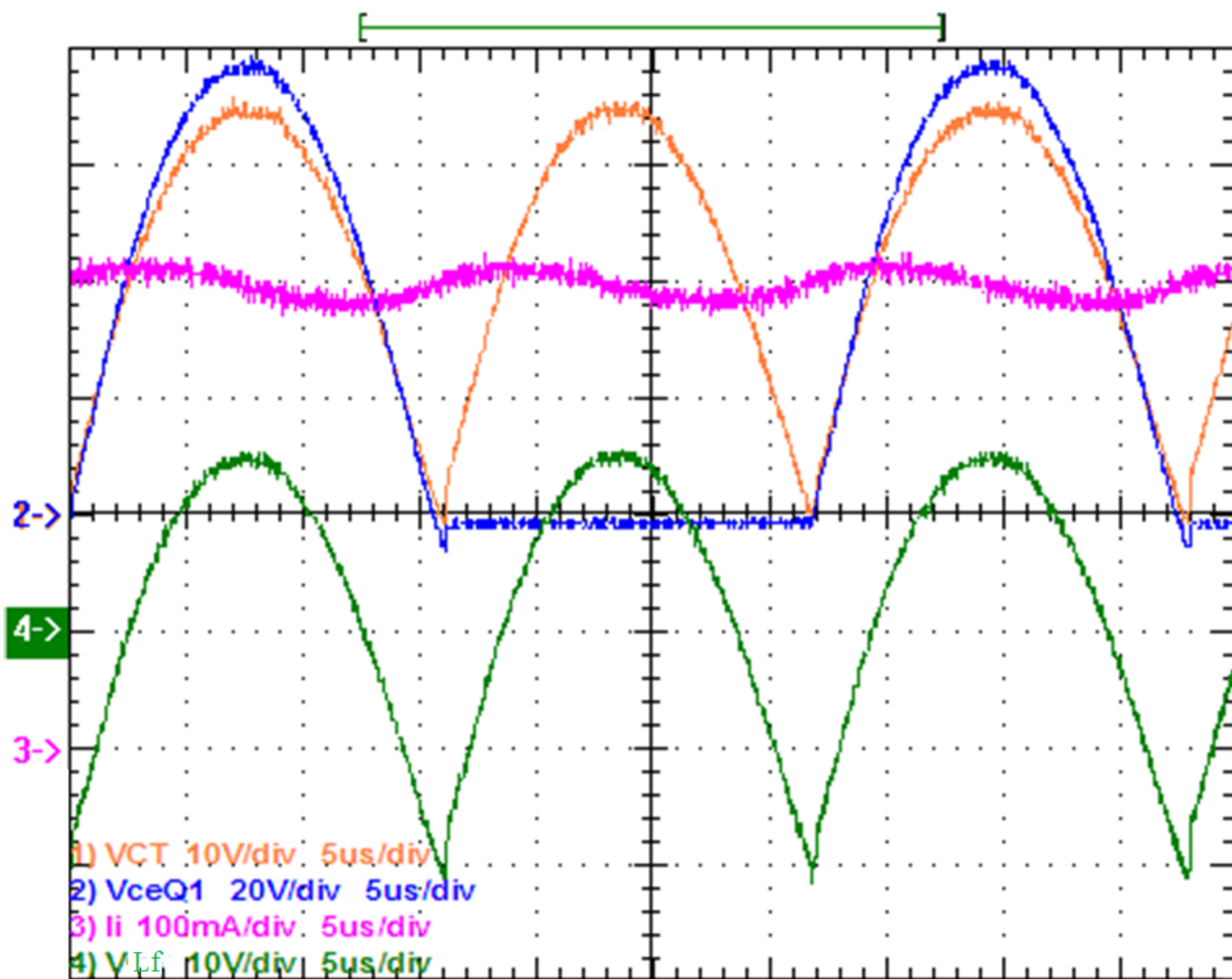


Fig. A2.5 – Tensão coletor – emissor de Q1, corrente de alimentação I_i , tensão sobre o indutor L_f e tensão entre o tap central e o ponto de emissor comum.

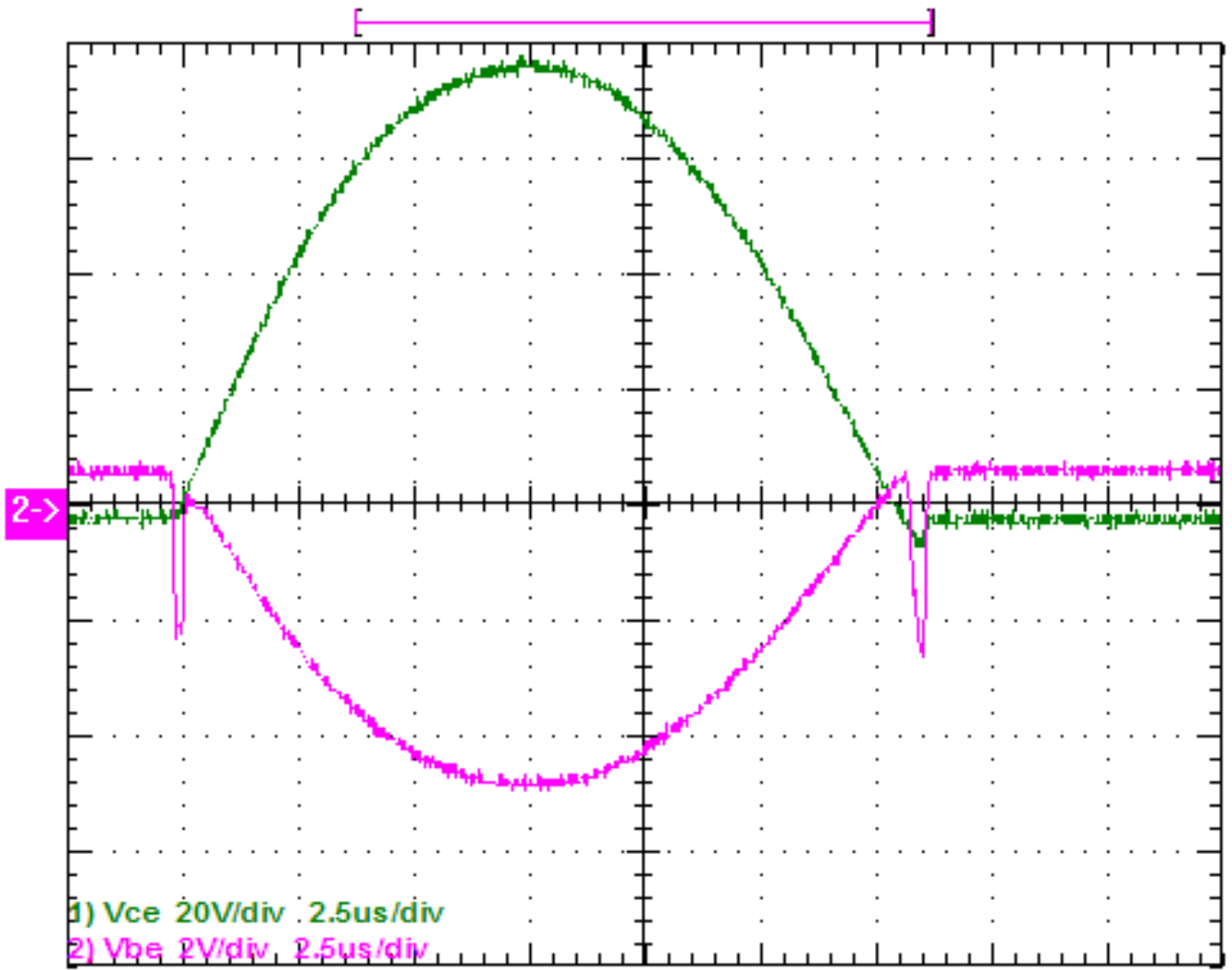


Fig. A2.6 – Tensões coletor –emissor e base-emissor de Q1, com escala de tempo expandida

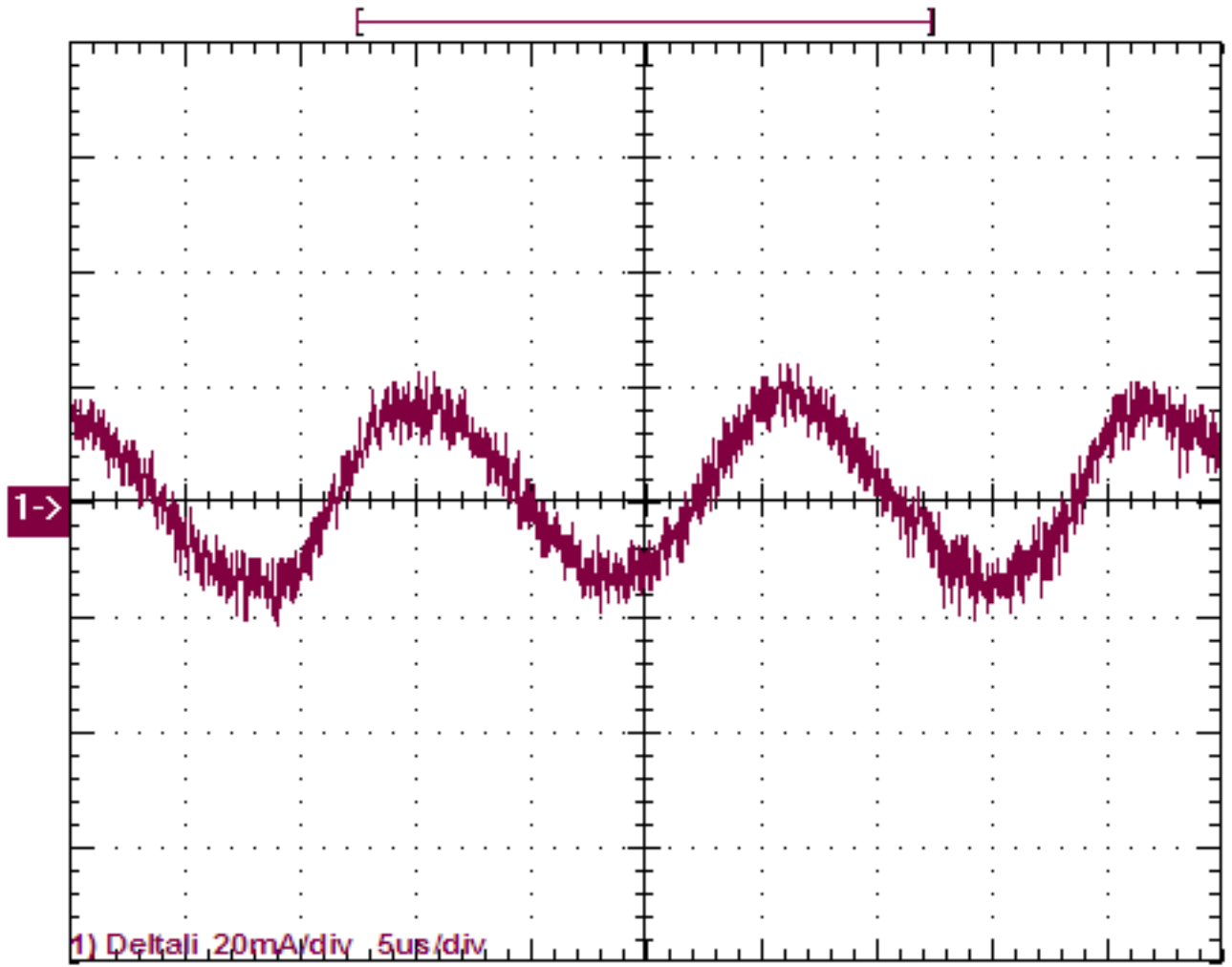


Fig. A2.7 – Ondulação da corrente de alimentação I_i .

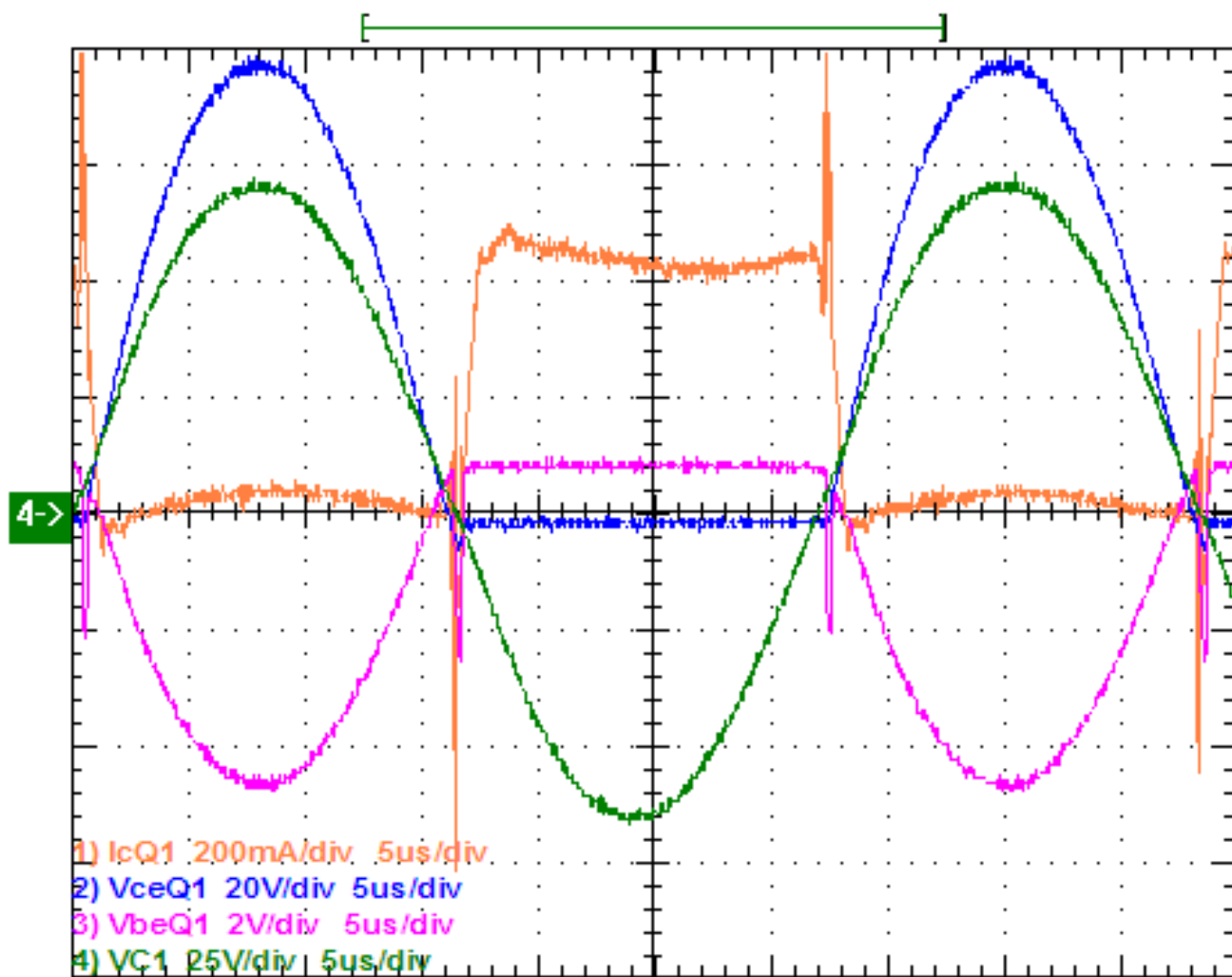


Fig. A2.8 – Tensões coletor – emissor e base – emissor de Q1, corrente de coletor de Q1 e tensão sobre o capacitor C1.

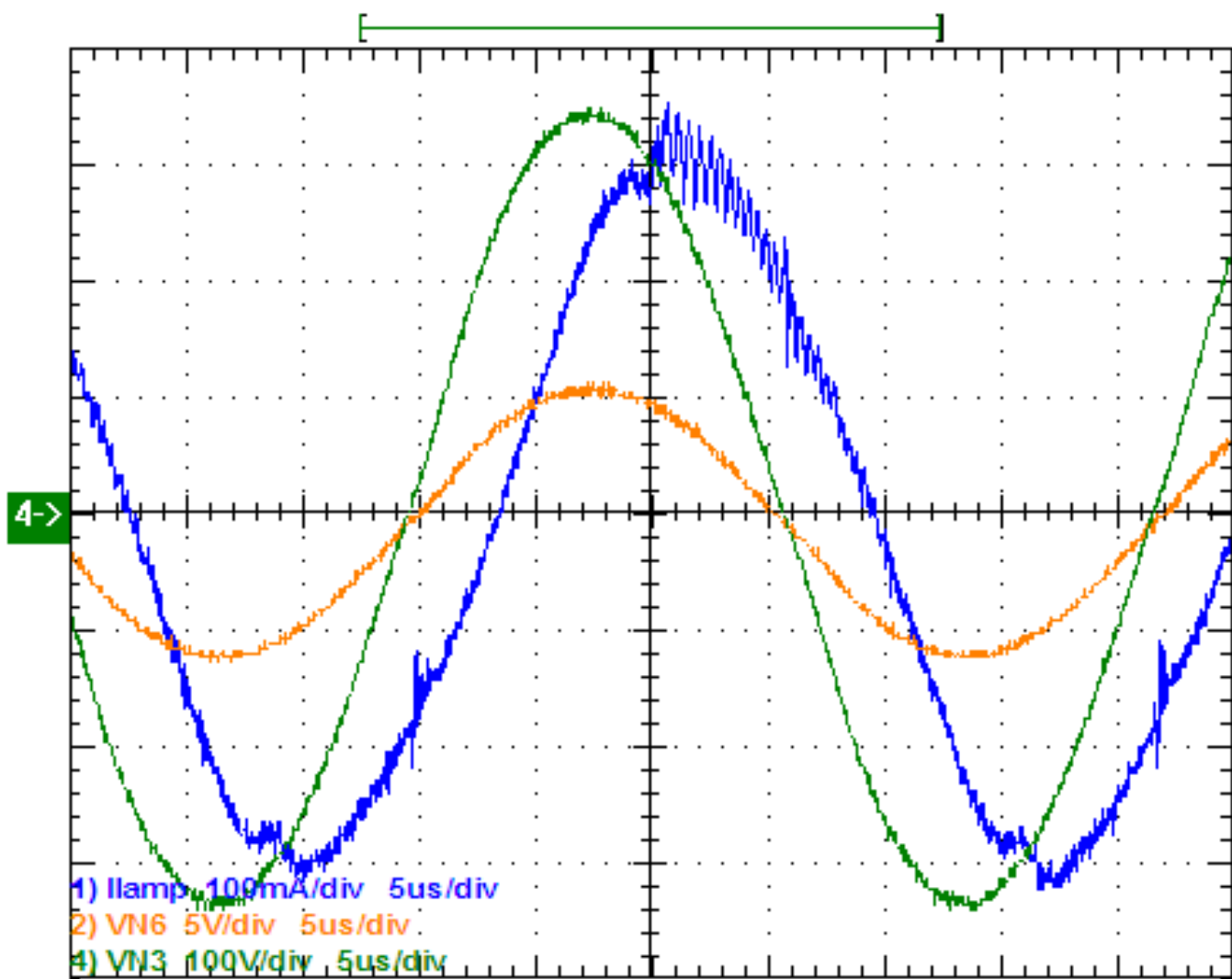


Fig. A2.9 – Tensões sobre os enrolamentos N3 e N6 e corrente na lâmpada.

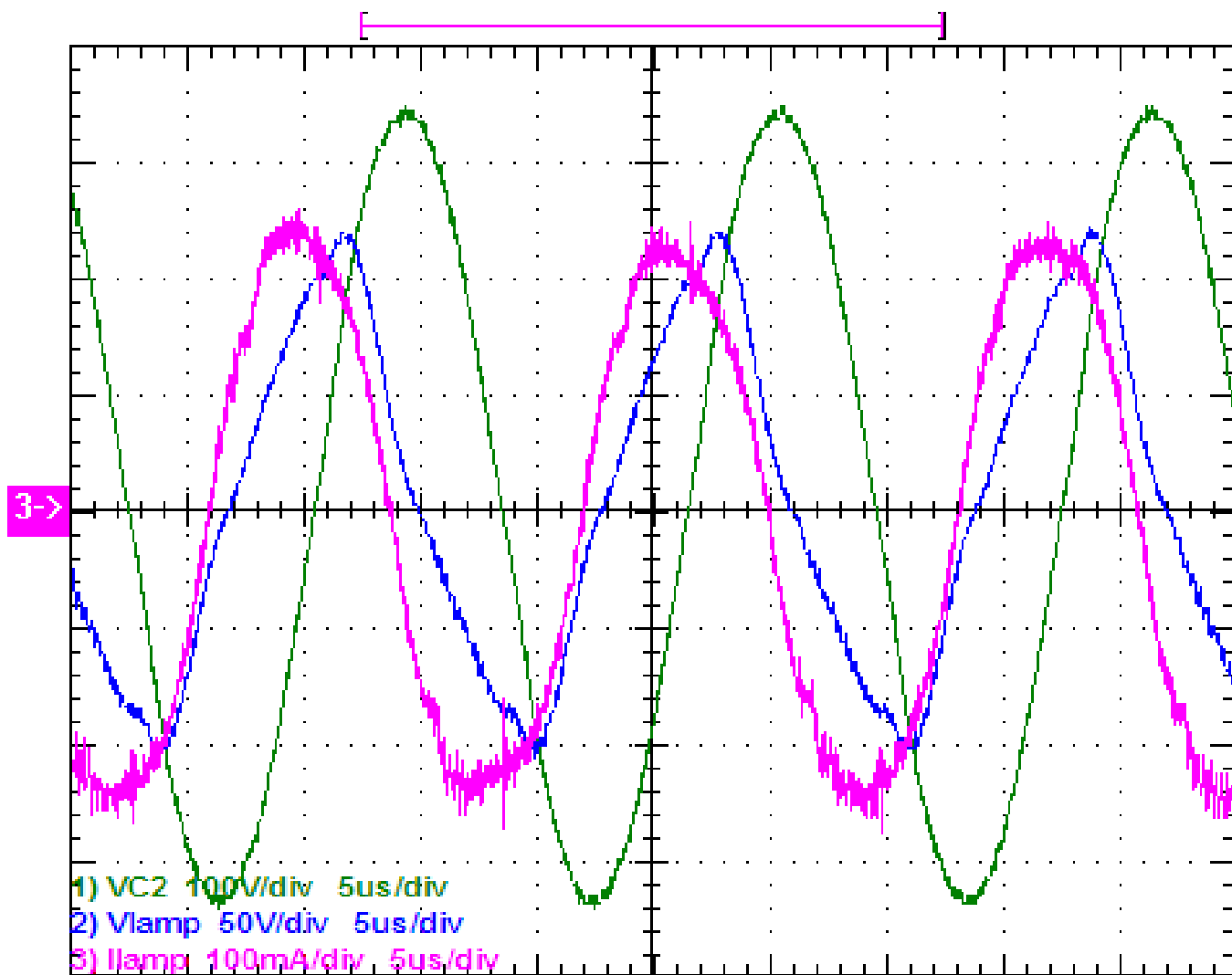


Fig. A2.10 – Tensão e corrente na lâmpada e tensão sobre o capacitor C2.

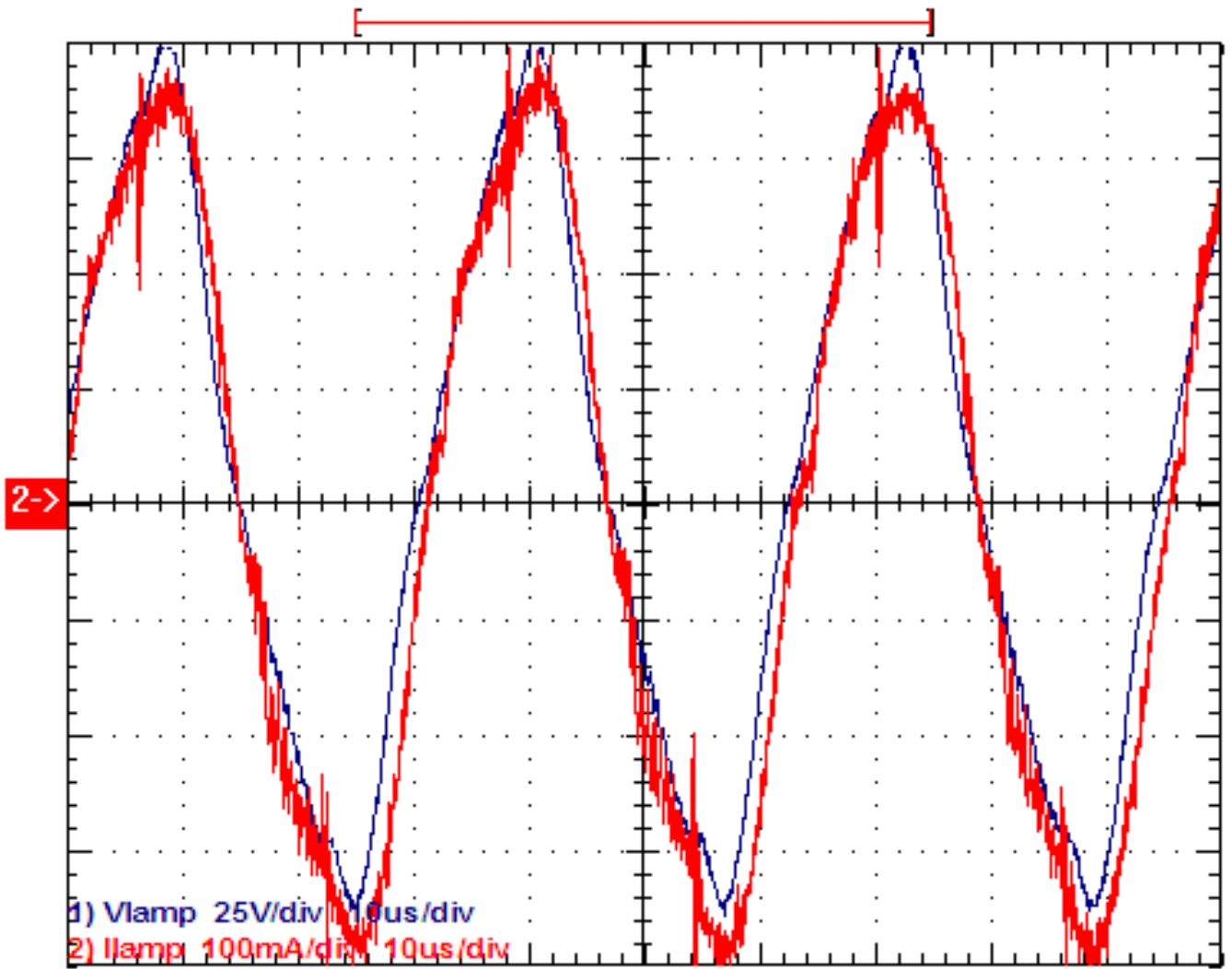


Fig. A2.11 – Tensão e corrente na lâmpada.

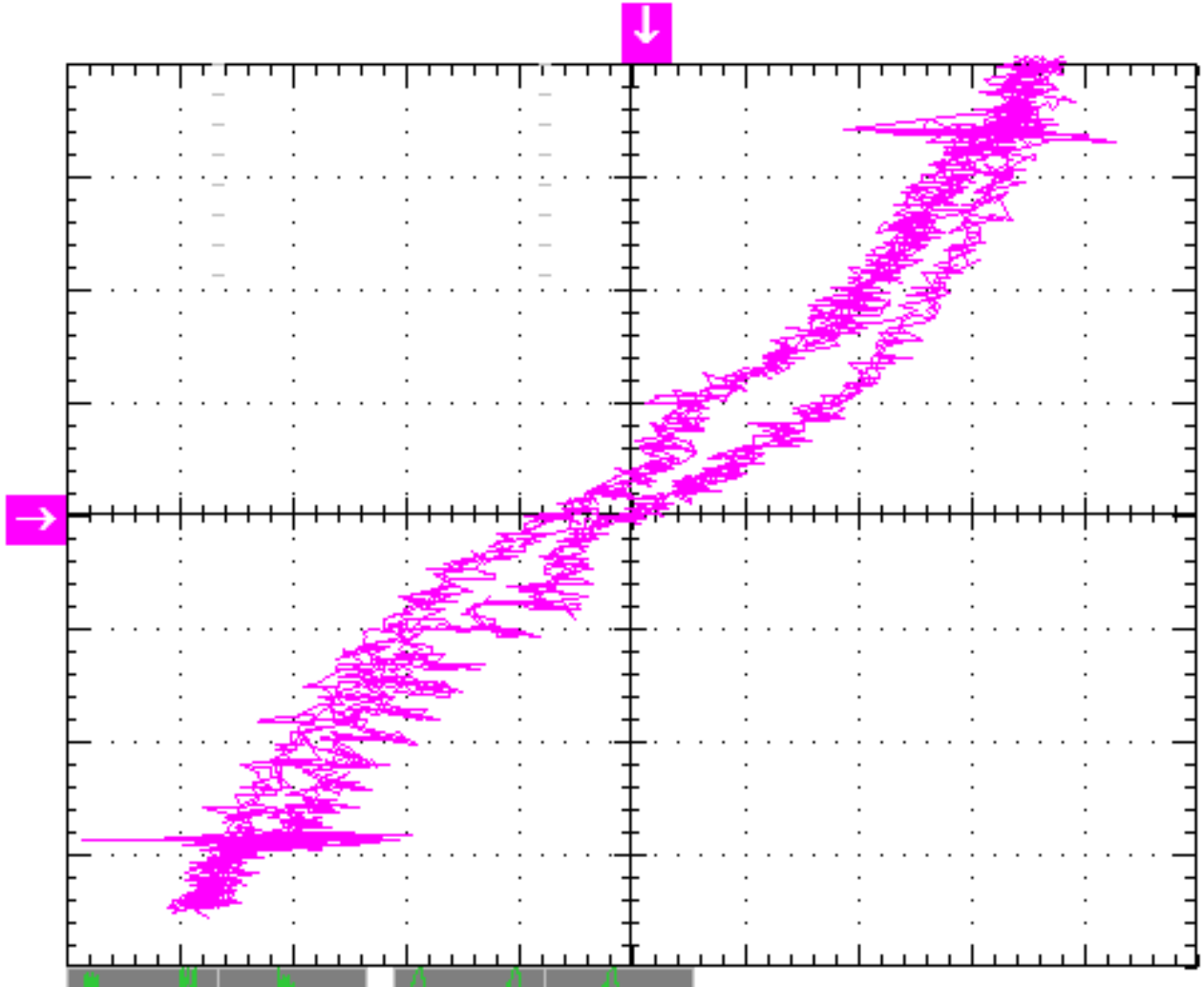


Fig. A2.12 – Figura de Lissajou da lâmpada

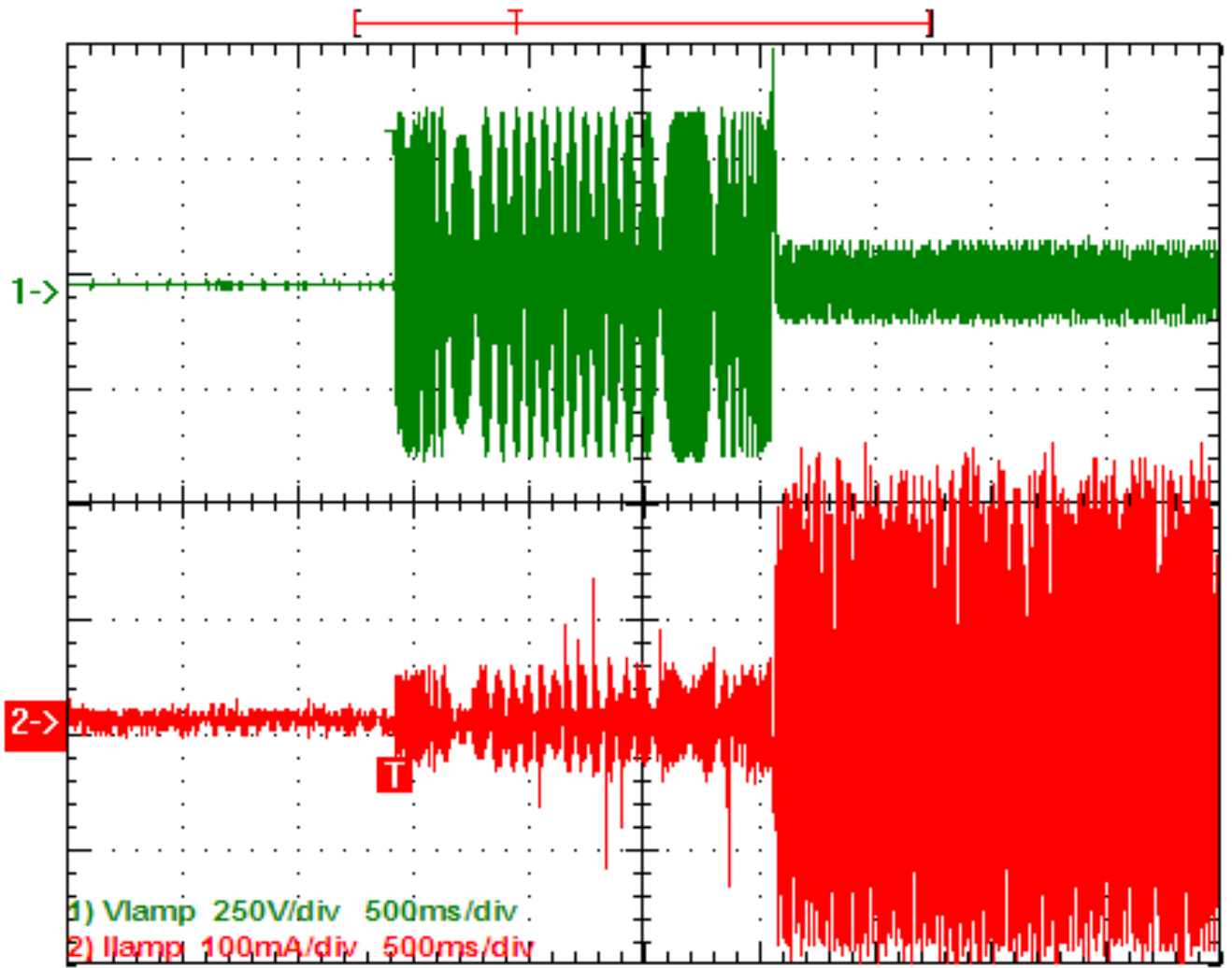


Fig. A2.13 – Tensão e corrente na lâmpada durante a partida – Lâmpada fria

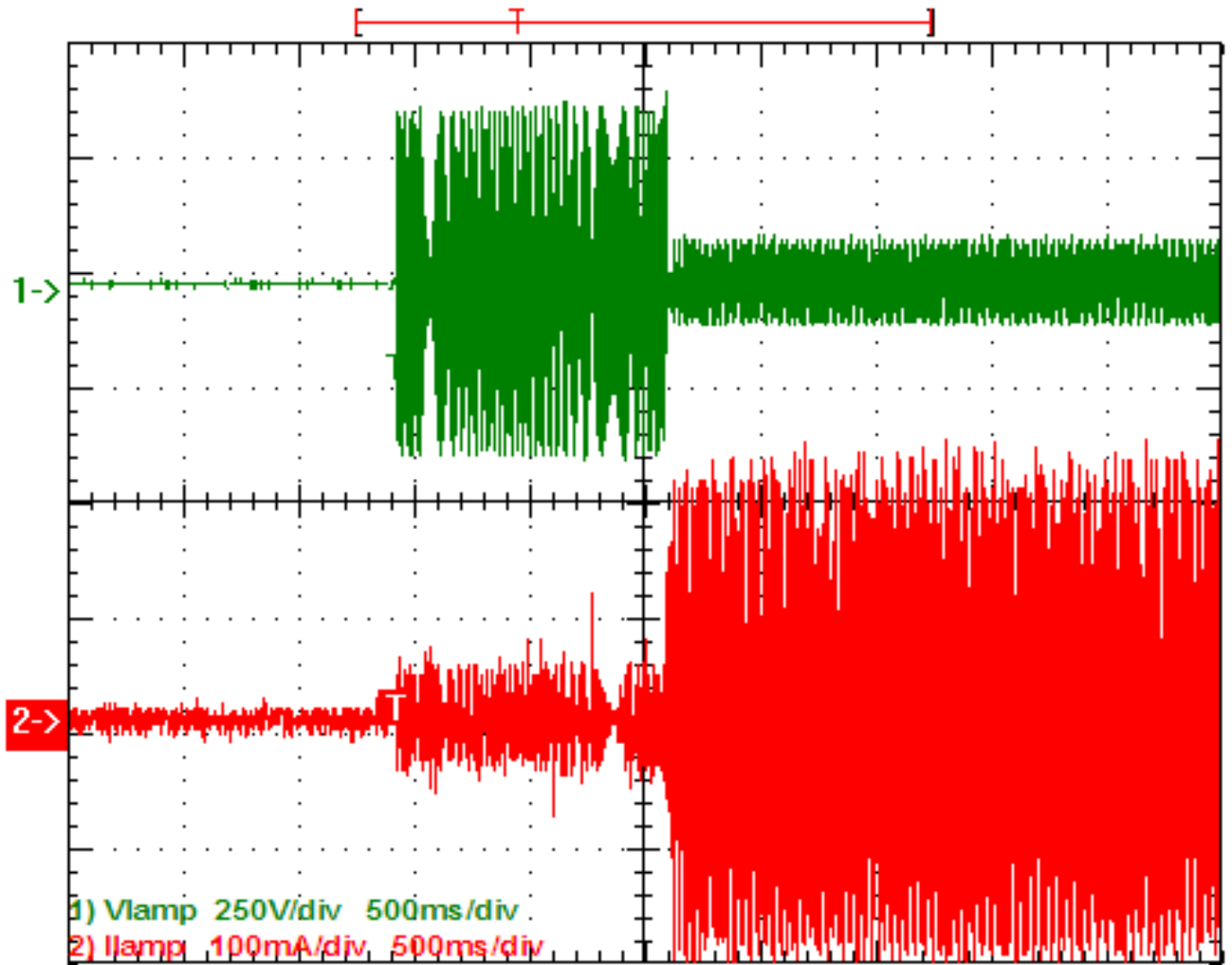


Fig. A2.14 – Tensão e corrente na lâmpada durante a partida – Lâmpada quente