



## UMA INVESTIGAÇÃO DAS EMISSÕES CONDUZIDAS E RADIADAS DE UMA ESTAÇÃO DE SOLDA COM TEMPERATURA AJUSTÁVEL OPERANDO EM VÁRIAS SITUAÇÕES DE CARGA

Alexandre Albarello Costa<sup>1</sup>, Celso Luis de Souza<sup>2</sup>, Diego de Moura<sup>3</sup>, Ingrid Carolini Cezário<sup>4</sup>

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma investigação sobre as emissões eletromagnéticas conduzidas e radiadas de uma estação de solda com temperatura ajustável. A partir de um modelo comercial, foram realizados ensaios de emissões radiadas e conduzidas no Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética – MAGLAB da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Os resultados foram comparados com a norma adequada a este tipo de equipamento, verificando o seu possível enquadramento nos limites definidos pela mesma. Percebeu-se que, em alguns pontos, os limites estavam superiores ao desejado. Uma investigação sobre os motivos pelos quais a estação de solda não estava atendendo à norma foi realizada através da análise do circuito, com simulações no *software* Pspice e medições das formas de onda com osciloscópio. Foram sugeridas e implementadas modificações para mitigar os problemas encontrados. Novos ensaios foram realizados para a verificação da eficácia das modificações.

**Palavras-chave:** Compatibilidade. Eletromagnetismo. Estação de solda.

**Abstract:** *This paper presents an investigation on the radiated and conducted electromagnetic emissions of a temperature-controlled soldering station. At the Laboratory of Electromagnetism and Electromagnetic Compatibility – MAGLAB – UFSC (Federal University of Santa Catarina), conducted and radiated emission tests were performed on an off-the-shelf equipment. EMC compliance with applicable standard was checked. Radiated and conducted emission levels were higher than desired and the equipment did not meet the standard. PSpice simulation software and oscilloscope waveform measurements were used to help circuit analysis in order to investigate the non-compliance reasons. Modifications were suggested and implemented to mitigate the problems. New tests were performed to verify the effectiveness of these modifications.*

**Keywords:** *EMC. Electromagnetism. Soldering station.*

<sup>1</sup> Doutorando EEL/UFSC <aleac.eng@gmail.com>.

<sup>2</sup> Engenheiro Eletrônico Sênior da Reason Tecnologia S/A <celso@ieee.org>.

<sup>3</sup> Mestrando EEL/UFSC <diegocefetsc2000@yahoo.com.br>.

<sup>4</sup> Mestranda EEL/UFSC <cezario@gmail.com>.

### 1. INTRODUÇÃO

O uso cada vez maior de equipamentos eletrônicos, que frequentemente operam próximos de outros sistemas eletroeletrônicos, bem como a explosão no número de sistemas de comunicação sem fio resulta numa preocupação sobre os efeitos das interferências eletromagnéticas (EMI). Circuitos mais rápidos e complexos são cada vez mais miniaturizados, aumentando a probabilidade de que dispositivos que contenham estes circuitos interajam entre si de maneira adversa. Os

equipamentos eletrônicos modernos devem, portanto, estar aptos não só a funcionar perfeitamente neste ambiente poluído eletromagneticamente, como também não contribuir significativamente para o aumento nas emissões neste ambiente, atingindo assim os objetivos da Compatibilidade Eletromagnética (EMC).

Usualmente os efeitos da interferência eletromagnética só são descobertos na fase de testes. A solução destes problemas nas fases finais do desenvolvimento do produto geralmente implica

a adição de componentes, que aumentam a complexidade e o custo, além de reduzirem a confiabilidade. Adicionalmente, é ilegal a venda de produtos que não atendam às regulamentações governamentais (quando aplicáveis) de emissões eletromagnéticas. É, portanto, desejável que os problemas de emissões e susceptibilidade eletromagnética sejam tratados nas fases iniciais do projeto.

Frequentemente as causas dos problemas relacionados à EMC não são encontradas, devido a concepções errôneas compartilhadas por muitos engenheiros. Muito do material apresentado aos estudantes de engenharia elétrica representa simplificações de conceitos mais abrangentes. O mais fundamental entendimento do comportamento de dispositivos e sistemas eletrônicos requer a aplicação das equações de Maxwell e técnicas de sinais e sistemas, porém, a aplicação destes conceitos a circuitos simples é complicada e trabalhosa. Para evitar esta complexidade, uma técnica de análise aproximada, conhecida como teoria dos circuitos elétricos, é utilizada para descrever os dispositivos operando a uma frequência baixa. A Lei de Kirchhoff da Tensão e da Corrente provém das Leis de Faraday e de Ampère, respectivamente.

Infelizmente, os conceitos básicos da teoria de eletromagnetismo (bem como em outras áreas da engenharia elétrica, como processamento de sinais e teoria de controles) são frequentemente apresentados de maneira isolada, sem a devida intercorrelação com outros conceitos. Por esta razão, a maioria dos engenheiros (erroneamente) espera que os elementos familiares de circuitos, como resistores, capacitores e indutores, sempre se comportem de maneira ideal, da maneira que foram apresentados nas disciplinas mais básicas.

A teoria de Compatibilidade Eletromagnética envolve a operação dos dispositivos eletrônicos num regime onde os casos especiais e as simplificações associadas ao “comportamento normal” não valem mais e requer um retorno a um conjunto mais fundamental de regras para se descrever o comportamento destes. Deve ser lembrado que os efeitos descritos pelos princípios fundamentais de eletromagnetismo estão sempre presentes e são simplesmente mais relevantes sob certas condições. O “comportamento não-ideal” é, na realidade, uma denominação incorreta porque implica que o dispositivo está operando de uma forma anormal, quando na realidade ele está se comportando de maneira perfeitamente natural. Somente através da aplicação dos princípios fundamentais é que o comportamento dos dispositivos poderão ser previsíveis em todas as condições de operação.

O que faz com que a tarefa de produzir sistemas eletromagneticamente compatíveis seja particularmente difícil é que, além do entendimento dos princípios básicos que governam o comportamento de um dispositivo, muitas vezes o projetista não pode antecipar quais os tipos de interferência ele vai encontrar e preparar-se para todas as contingências. Por exemplo, é impossível saber sob que circunstâncias um laptop vai operar. *Laptops* são utilizados em casa, em automóveis, construções, aviões, e mesmo em espaçonaves. Cada um desses ambientes apresenta problemas específicos. O mesmo *laptop* deve ser projetado para funcionar na presença de um secador de cabelos e não pode interferir com os instrumentos de uma aeronave comercial. Além disso, dispositivos cujo projeto mudou pouco em décadas podem ser colocados próximos a componentes de estado-sólido muito modernos. Por estas razões, os sistemas devem ser projetados não só para minimizar as emissões, mas também para ficarem imunes da interferência eletromagnética. Infelizmente, quanto mais complexo fica o ambiente eletromagnético, se torna mais difícil atingir este objetivo.

Apesar de todos estes argumentos, muitos fabricantes ainda não se adequaram às normas de compatibilidade eletromagnética, como é o caso do fabricante da estação de solda analisada neste trabalho.

## 2. A ESTAÇÃO DE SOLDA

A estação de solda utilizada nesta investigação foi um modelo TS-900 de 50 W do fabricante TOYO (Figura 1).



FIGURA 1 – Estação de Solda TOYO TS-900.

Fonte: TOYO, 2010.

Ao levantar-se o circuito elétrico deste equipamento, observou-se que é idêntico a um *dimmer* utilizado para lâmpadas incandescentes, que é descrito a seguir.

Um *dimmer* regula o fluxo de potência para uma carga resistiva, como uma lâmpada incandescente ou ferro de solda, de uma maneira

eficiente, permitindo que apenas uma porção da corrente em um ciclo de 60 Hz vá para a carga. A Figura 2 mostra um circuito simples que controla a potência de uma lâmpada. O controle da potência é feito alterando-se o ângulo de disparo durante cada semiciclo.

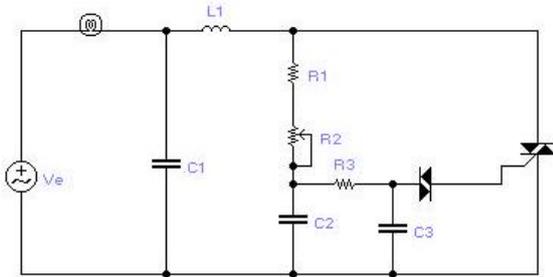


FIGURA 2 – Circuito básico de um *dimmer*.

Conforme a Figura 2, o capacitor C2 é carregado (no semiciclo positivo ou semiciclo negativo) através do potenciômetro de controle R2 e da resistência R1. Após um tempo, o DIAC dispara quando a tensão no capacitor C3 atingir a tensão de disparo (*breakover*). O capacitor C3 se descarrega através do DIAC e no *gate* do TRIAC, disparando-o para um determinado ângulo. A variação abrupta de corrente a partir do zero produz interferência eletromagnética. O indutor L1 e o capacitor C1 funcionam como um filtro que reduz essa interferência a um nível aceitável.

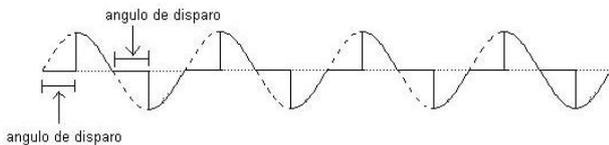


FIGURA 3 – Forma de onda de tensão na carga.

O circuito levantado da estação de solda TS-900 pode ser visto na Figura 4.

Nota-se que este circuito é basicamente o mesmo do *dimmer* apresentado na Figura 2, mas ele não contém nenhum filtro de linha, o que antecipa emissões conduzidas acima dos valores esperados.

### 3. NORMAS APLICÁVEIS

A norma CISPR 14-1 se aplica a emissões conduzidas e radiadas para equipamentos cujas funções principais são executadas por motores ou dispositivos de chaveamento e regulação, que incluem eletrodomésticos, ferramentas elétricas, controles utilizando dispositivos semicondutores, equipamentos médicos com motores, brinquedos elétricos/eletrônicos, caixas automáticos, projetores de slide e de cinema.

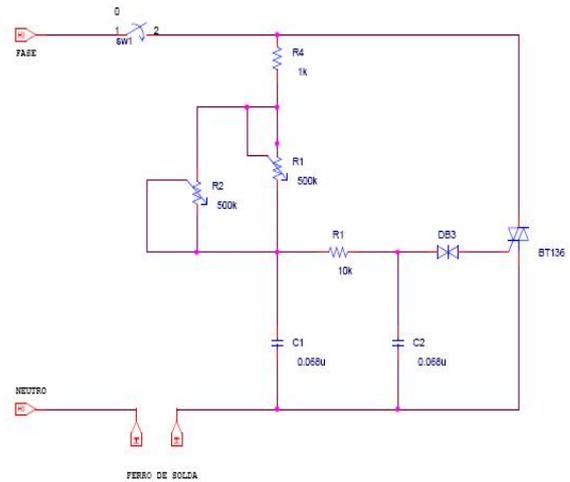


FIGURA 4 – Esquemático da estação de solda.

Como a estação de solda é uma ferramenta elétrica e utiliza semicondutores para controle, a norma CISPR 14-1 é a mais adequada para emissões radiadas e conduzidas.

### 4. RESULTADOS DO ENSAIO INICIAL

Para os ensaios, por questão de segurança, foi utilizada uma lâmpada incandescente de 60 W ao invés do ferro de solda (Figura 5).



FIGURA 5 – Montagem para ensaios.

Os ensaios, tanto para emissões conduzidas como para emissões radiadas, foram feitos em três condições de carga: mínima, média e máxima.

#### 4.1. Emissões conduzidas

Os ensaios de emissões conduzidas foram realizados no dia 26/10/2009, em temperatura ambiente de 26 °C e umidade relativa de 60%. Os equipamentos utilizados foram o *EMI Test Receiver* 9 kHz a 2.500 MHz ROHDE & SCHWARZ (Figura 6(a)) e um LISN (*Line Impedance Stabilization Network*) modelo ESH 3-Z5 831.5518.52 (Figura 6(b)).



(a)



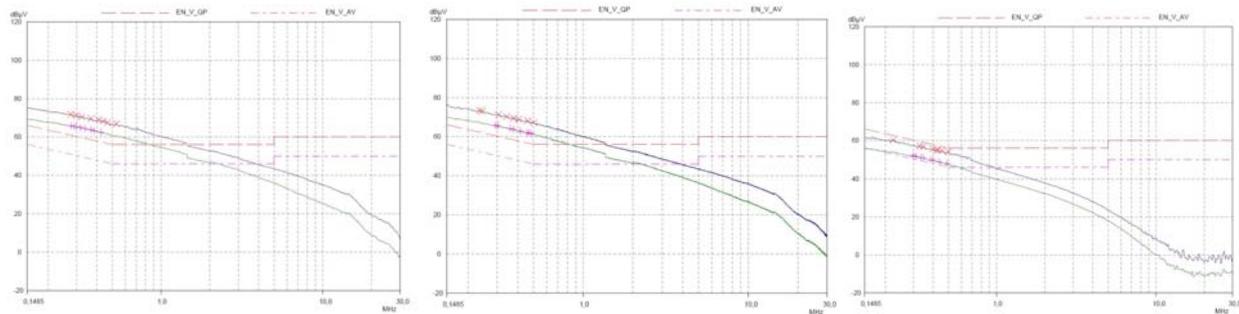
(b)

**FIGURA 6 – (a) EMI Test Receiver e (b) Line Impedance Stabilization Network.**

Fonte: ROHDE & SCHWARZ, 2010.

Os resultados dos ensaios, tanto em carga mínima (Figura 7(a)), média (Figura 7(b)) e máxima (Figura 7(c)), mostram que o equipamento não atende à norma CISPR 14-1 para emissões conduzidas. Isto já era esperado pelo fato de a

estação de solda não possuir nenhum filtro de linha. Nota-se, porém, que, na condição de carga mínima, o nível de emissões é maior, pois a forma de onda da tensão aplicada à carga apresenta maior quantidade de harmônicos.



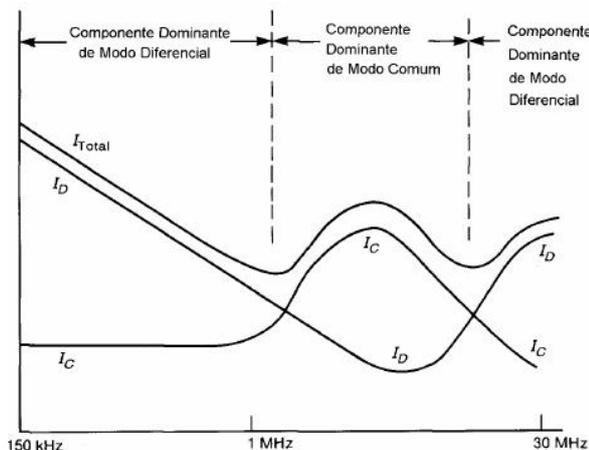
(a)

(b)

(c)

**FIGURA 7 – Emissões conduzidas em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.**

Analisando-se a faixa de emissão conduzida acima do nível da norma CISPR 14-1, pode-se afirmar que o modo predominante é o diferencial (Figura 8).



**FIGURA 8 – Determinação de um modo de corrente sobre outra em emissões conduzidas.**

Fonte: RAIZER, 2007.

#### 4.2. Emissões radiadas

Os ensaios de emissões conduzidas foram realizados no dia 26/10/2009, em temperatura ambiente de 23,5 °C e umidade relativa de 68%. Os equipamentos utilizados foram o EMI Test Receiver 9 kHz a 2.500 MHz ROHDE & SCHWARZ (Figura 6(a)) e uma célula GTEM (Gigahertz Transverse-Electromagnetic) (Figura 9).

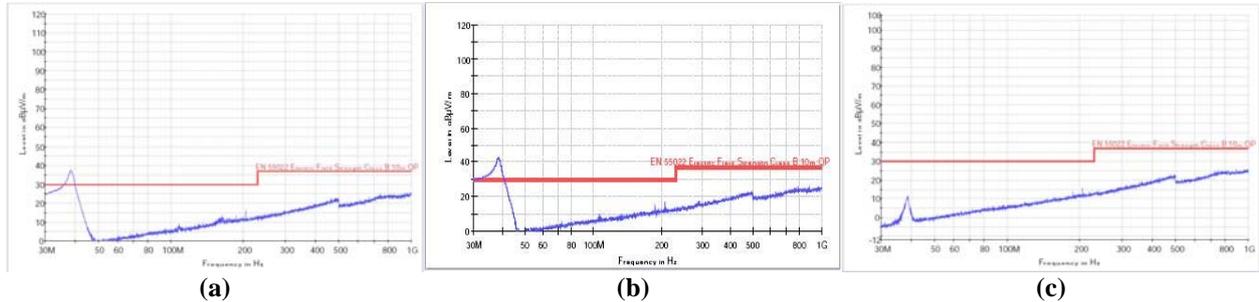


**FIGURA 9 – Célula GTEM.**

Fonte: ROHDE & SCHWARZ, 2010.

Os resultados dos ensaios, tanto em carga mínima (Figura 10(a)) como em carga média (Figura 10(b)), mostram que, na frequência de aproximadamente 35 MHz, o equipamento apresenta um maior nível de emissões radiadas. Porém, no ensaio com carga máxima (Figura 10(c)),

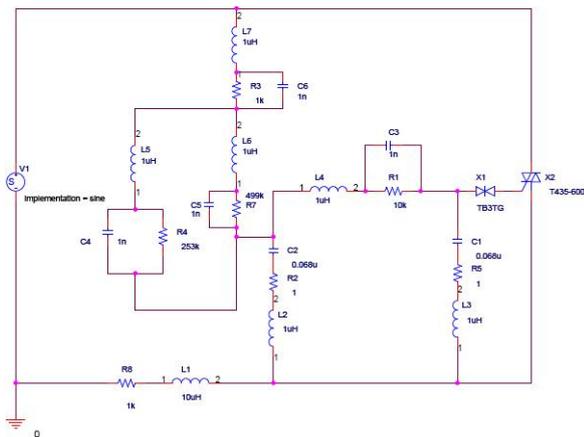
este nível em 35 MHz é bem menor. Na condição de carga mínima, o nível de emissões é maior, pois a forma de onda da tensão na carga apresenta maior quantidade de harmônicos. De qualquer maneira, o equipamento atende à norma CISPR 14-1 para emissões radiadas.



**FIGURA 10 – Emissões radiadas em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.**

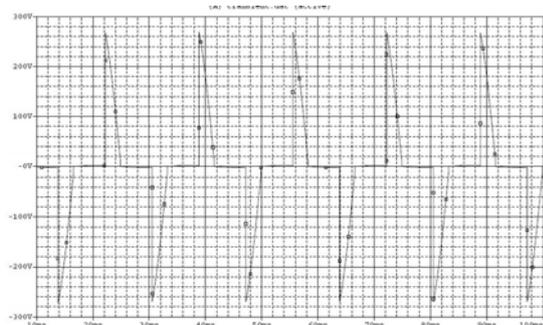
## 5. SIMULAÇÕES

Para simular o circuito da estação de solda, foi utilizado o simulador de circuitos analógicos PSPICE. O esquema representado na Figura 11 mostra o circuito completo com as não-idealidades dos componentes.

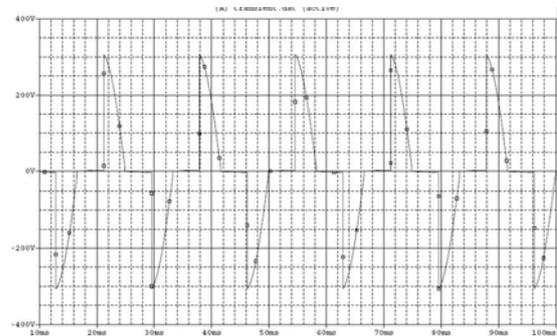


**FIGURA 11 – Esquemático utilizado para simulação com não-idealidades.**

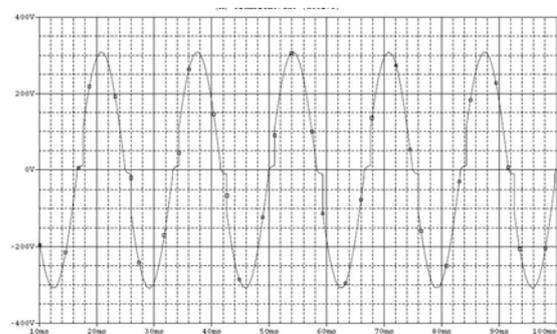
As simulações obtidas são apresentadas nas Figuras 12, 13 e 14 e correspondem à carga mínima, média e máxima, respectivamente.



**FIGURA 12 – Tensão na lâmpada – carga mínima – simulação PSPICE.**



**FIGURA 13 – Tensão na lâmpada – carga média – simulação PSPICE.**

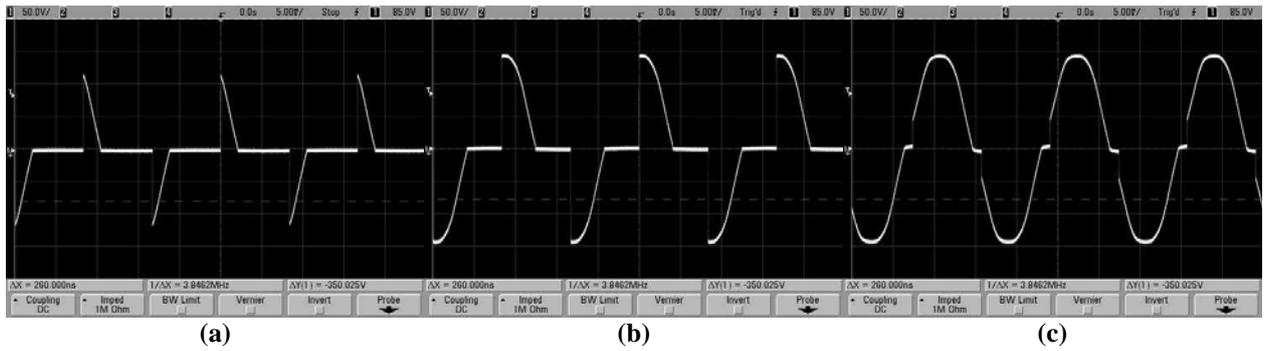


**FIGURA 14 – Tensão na lâmpada – carga máxima – simulação PSPICE.**

O objetivo destas simulações foi o de verificar o comportamento do circuito em diversas situações de carga, analisando-se suas formas de onda. Serviu também para simulações de filtros anexados ao circuito.

## 6. MEDIÇÕES COM O OSCILOSCÓPIO

As medições da tensão na carga, apresentadas nas Figuras 15(a), 15(b) e 15(c), comprovaram o resultado das simulações realizadas na seção anterior.



**FIGURA 15 – Imagem de osciloscópio da tensão na lâmpada em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.**

## 7. MODIFICAÇÕES PROPOSTAS

Com a finalidade de se reduzirem emissões radiadas e, principalmente, as conduzidas, foram sugeridas propostas de modificação no circuito da estação de solda, que são descritas a seguir.

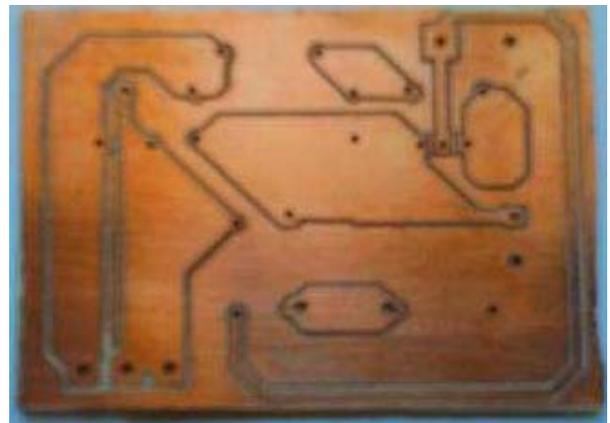
### 7.1. Trançamento dos fios da carga

Os fios condutores que ligam a estação ao ferro de solda foram trançados com passo de aproximadamente 1 cm. Não houve nenhuma mudança nas emissões radiadas e conduzidas. Esperava-se uma melhoria, mesmo que discreta, nas emissões radiadas, mas provavelmente o passo de trançamento utilizado não foi o adequado.

### 7.2. Novo layout

Observando-se o *layout* original da estação de solda, notou-se que este não apresentava plano de terra, além de trilhas com 90 mils. Um novo *layout* foi elaborado, com trilhas mais grossas, com curvas de 45° e polígonos ao invés de trilhas simples, aumentando a área de condução. O novo *layout* pode ser visto na Figura 16. As emissões conduzidas não sofreram nenhuma modificação em relação ao *layout* original. As emissões radiadas aumentaram na região de 35 MHz (Figuras 17(a), 17(b) e 17(c)). O aumento das emissões radiadas provavelmente se deve ao fato de o potenciômetro ter sido conectado à placa através de fios neste

*layout* novo (por questões mecânicas). No *layout* original, o potenciômetro é soldado na própria placa de circuito impresso. As radiações podem estar ocorrendo justamente nestes fios.

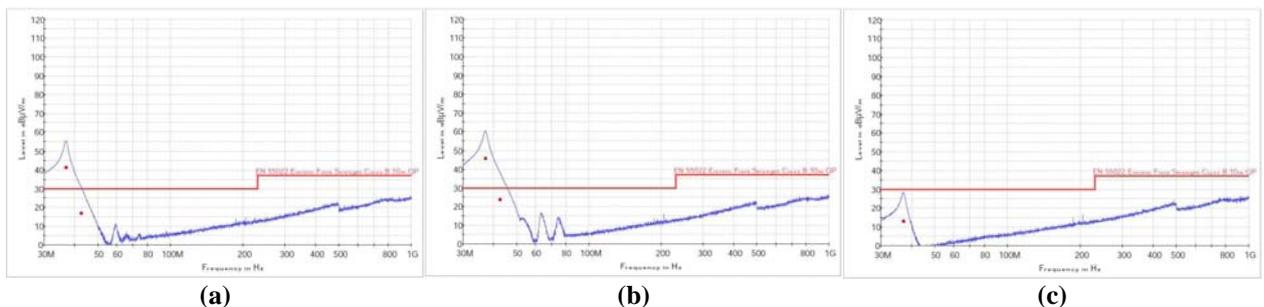


**FIGURA 16 – Novo layout.**

Mesmo após terem sido eliminados os ângulos de 90°, não houve alterações significativas nas emissões radiadas, pois esta medida só é válida para frequências acima de 1 GHz (MONTROSE, 1996).

### 7.3. Filtro de linha completo

Visando resolver principalmente o problema de emissões conduzidas, optou-se pela instalação de um filtro de linha completo usado em fontes de alimentação. O circuito pode ser visto na Figura 18.



**FIGURA 17 – Emissões radiadas com novo layout em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.**

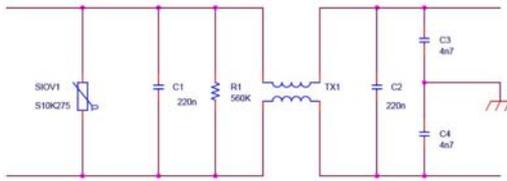


FIGURA 18 – Filtro de linha completo.

Este filtro reduziu drasticamente as emissões conduzidas (Figuras 19(a), 19(b) e 19(c)), porém não teve praticamente nenhum efeito sobre as emissões radiadas (Figuras 20(a), 20(b) e 20(c)).

O filtro atingiu o seu objetivo, mas é uma solução cara, face ao custo da estação de solda. Em função disto, optou-se outras modificações no circuito que fossem economicamente mais viáveis.

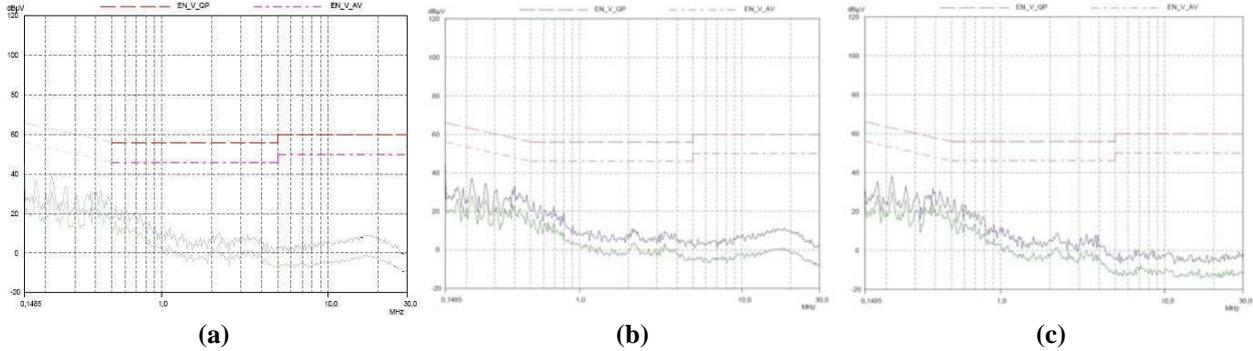


FIGURA 19 – Emissões conduzidas com filtro de linha completo em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.

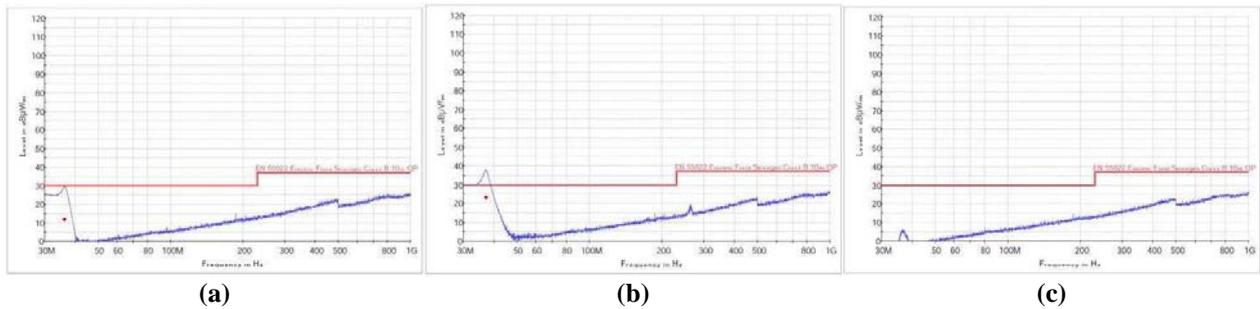


FIGURA 20 – Emissões radiadas com filtro de linha completo em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.

#### 7.4. Filtro com 2 capacitores ligados à terra

Com o intuito de simplificar a topologia do filtro de linha utilizado no ensaio anterior, optou-se por uma estrutura mais simples com apenas dois capacitores de 4,7 nF entre fase e neutro e os mesmos ligados em um ponto comum de terra (Figura 21). Não houve nenhuma modificação nas emissões radiadas e conduzidas em relação ao equipamento sem filtro.

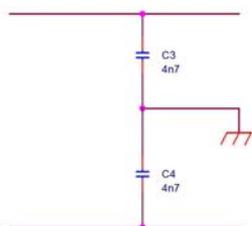


FIGURA 21 – Filtro com 2 capacitores.

#### 7.5. Filtro de linha simplificado

Conforme citado anteriormente, o filtro de linha completo é uma solução eficiente, porém cara em função do custo da estação de solda.

Observando-se as emissões conduzidas com carga mínima sem o uso de qualquer filtro (Figura 7(a)), nota-se que em 148,5 kHz (pior caso), o ruído conduzido está cerca de 10 dB acima do nível estabelecido pela norma CISPR 14-1. Analisando-se o diagrama de Bode do filtro completo (Figura 22), pode-se verificar que, em 148,5 kHz, a atenuação deste é de cerca de 50 dB, o que é muito mais do que o necessário.

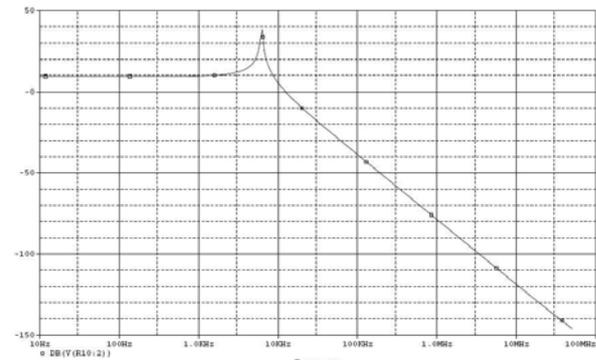
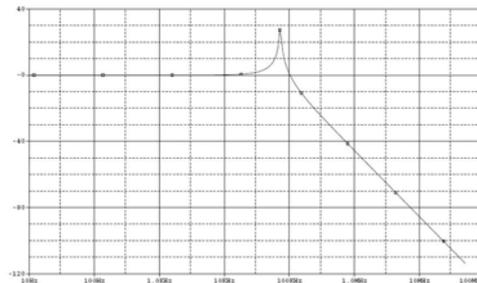
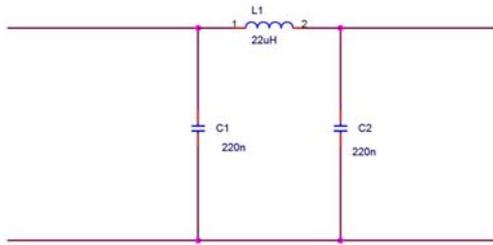


FIGURA 22 – Diagrama de Bode do filtro completo.

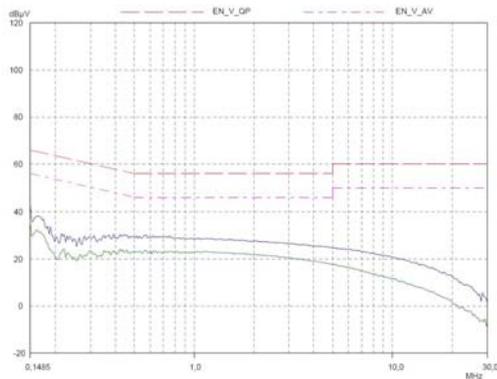
A partir destas observações, optou-se pelo projeto de filtros mais simples, atuando apenas no ruído diferencial e com atenuação mais adequada para as necessidades da fonte. A primeira tentativa

foi um filtro “pi”, apresentado na Figura 23(a). A atenuação em 150 kHz é um pouco maior que 10 dB, conforme o seu diagrama de Bode (Figura 23(b)).



(a) (b)  
**FIGURA 23 – (a) filtro PI e (b) diagrama de bode do filtro PI.**

Nos ensaios de emissões conduzidas (as emissões radiadas não foram afetadas), notou-se uma redução além do esperado. A Figura 24 mostra as emissões conduzidas em carga mínima (pior caso).



**FIGURA 24 – Emissões conduzidas – carga mínima com filtro pi.**

Após os ensaios com o filtro “pi”, foram realizados testes com um filtro ainda mais simples, denominado filtro RC (Figura 25(a)). O diagrama de Bode do filtro RC (Figura 25(b)) mostra uma atenuação um pouco menor do que 10 dB em 148,5 kHz, mas suficiente para que as emissões conduzidas ficassem dentro da norma CISPR 14-1 (Figuras 26(a), 26(b) e 26(c)).

As emissões radiadas não sofreram alteração em relação ao equipamento sem filtro.

Como este filtro apresenta resistor, houve uma perda de rendimento do ferro de solda. A tensão no ferro de solda (no caso específico do teste, na lâmpada), reduziu em 1%, o que significou uma redução de 2% em termos de potência.

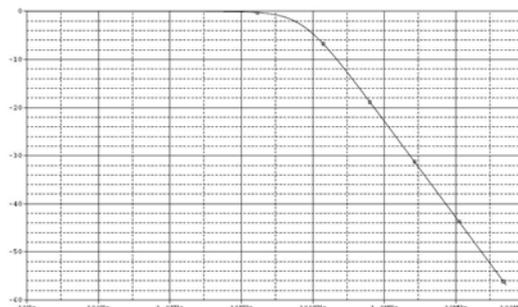
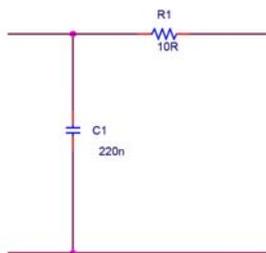
## 8. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentados ensaios de uma estação de solda e modificações nela realizadas para se verificar o efeito sobre as emissões conduzidas e radiadas.

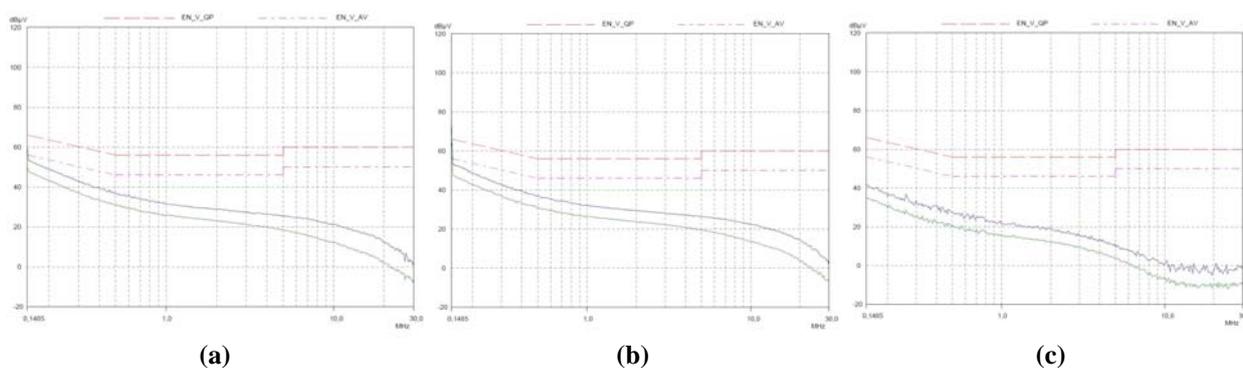
A modificação mais atraente em termos de custo e benefícios obtidos foi a inserção de filtro RC na entrada AC, apesar de haver uma pequena degradação de 2% no desempenho do ferro de solda.

Estudando-se o circuito, chegou-se à conclusão de que o principal causador das emissões conduzidas e radiadas é o chaveamento do TRIAC. Existe a possibilidade de criar um circuito com controle de potência por ciclos inteiros, mas isto descaracterizaria completamente o circuito inicial, tornando inviável a comparação entre eles.

Apesar da importância do assunto compatibilidade eletromagnética, já abordada na introdução deste trabalho, muitos fabricantes ainda não levam o tema a sério. O caso desta estação de solda, que fica muito longe dos padrões impostos pela norma CISPR 14-1, é bem ilustrativo, pois até possui um selo CE.



(a) (b)  
**FIGURA 25 – (a) filtro RC e (b) diagrama de bode do filtro RC.**



(a) (b) (c)  
**FIGURA 26 – Emissões conduzidas com filtro RC em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.**

Outra observação que merece destaque durante este trabalho foi o da importância da verificação de várias alternativas para mitigar as radiações conduzidas e radiadas. Nem sempre a mais cara é a melhor. No caso específico da estação de solda, conseguiu-se encontrar uma alternativa bastante interessante do ponto de vista de custo, com resultados bem satisfatórios.

## REFERÊNCIAS

MONTROSE, M. I. **Printed circuit board design techniques for EMC compliance**. Nova Iorque: IEEE Press, 1996.

RAIZER, A. **Interferência e compatibilidade eletromagnética**. Transparências, UFSC, set. 2007.