

Joice Luiz Jeronimo

Modelagem de Máquinas de Solda por Indução Eletromagnética em RF

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Telecomunicação e Telemática

Orientador: Hugo Enrique Hernández Figueroa

Campinas, SP

2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

| | |
|-------|--|
| J483m | <p>Jerônimo, Joice Luiz Modelagem de máquinas de solda por indução eletromagnética em RF / Joice Luiz Jerônimo. -- Campinas, SP: [s.n.], 2009.</p> <p>Orientador: Hugo Enrique Hernández Figueroa. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Engenharia reversa. 2. Osciladores de radiofrequência. 3. Máquinas eletromagnéticas. 4. Linhas de transmissão - Equipamento e acessório. 5. Ressonadores de cavidade. I. Hernández Figueroa, Hugo Enrique. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p> |
|-------|--|

Título em Inglês: Modeling of welding machines for electromagnetic induction in RF
Palavras-chave em Inglês: Transmission lines, Resonant cavities, Industrial machinery,
Oscillator valve

Área de concentração: Telecomunicação e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Pissolado Filho, Vitaly Félix Rodrigues Esquerre

Data da defesa: 30/01/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Joice Luiz Jeronimo

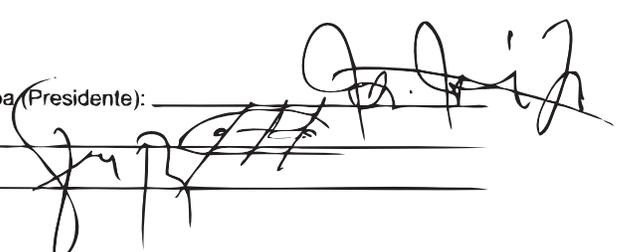
Data da Defesa: 30 de janeiro de 2009

Título da Tese: "Modelagem de Máquinas de Solda por Indução Eletromagnética em RF"

Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa (Presidente): _____

Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre: _____

Prof. Dr. José Pissolato Filho: _____



Resumo

Este trabalho trata do estudo de máquinas industriais de solda por indução eletromagnética na faixa de Rádio Frequência (RF), visando modelos robustos baseados em circuitos de parâmetros concentrados. Tipicamente as máquinas industriais para a aplicação em questão, apresentam três estágios; a fonte (geração de energia eletromagnética), blindagem e filtragem (através de uma cavidade), e alimentação da carga. Por se tratar de um equipamento de alta potência (dezenas de KVs), a fonte consiste num oscilador à válvula, na faixa 20-50 MHz. A fonte excita uma cavidade que ressoa e funciona como um armazenador dessa radiação eletromagnética e um filtro de frequência. Finalmente a energia da cavidade é extraída através de dispositivo análogo a uma linha de transmissão e colocado em contato com a carga, isto é, o material a ser soldado. Os modelos propostos fazem uso de circuitos equivalentes eficientes obtidos para as válvulas e as cavidades eletromagnéticas utilizadas, e foram validados através de testes experimentais minuciosos aplicados a uma máquina de fabricação nacional, líder de vendas no mercado latino-americano.

Palavras-chave: : linhas de transmissão, cavidades ressonantes, máquinas industriais, oscilador valvulado.

Abstract

This work is related to the study of electromagnetic weld industrial machines operating in radio frequency band aiming robust models based on concentrated parameters circuits. Typically, those machines have three steps: the power source (electromagnetic energy generation), shielding and filtering (through cavity) and load power supply. Since the equipment demands high power (dozen of KVs), the power source consists of a valve oscillator of 20-50MHz bandwidth. The power source excites a cavity that resonates and works like a storing of electromagnetic radiation and a frequency filter. Finally, the cavity energy is extracted through a device that works like a transmission line and sent to the load, that means, the material to be welded. The proposed models use efficient equivalent circuits found for the machine valves and cavities, and they were validated through detailed experiments on a machine produced for a Brazilian company, leader of the Latin American market.

Keywords: transmission lines, resonant cavities, industrial machinery, oscillator valve.

*Dedico aos meus pais, Lidia e Luiz Gonzaga,
fontes de apoio e confiança, demonstrando em
todos os momentos a incondicionalidade do amor.*

"... o mais importante e bonito, do mundo, é isto: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas - mas que elas vão sempre mudando. Afinam ou desafinam. Verdade maior. É o que a vida me ensinou. Isto me alegra, montão ..."

João Guimarães Rosa

Agradecimentos

A Deus, pela minha saúde, e todos os problemas de ordem pessoal e familiar que não tive durante este mestrado;

Ao meu orientador, Prof. Hugo Enrique Hernández Figueroa, pela orientação, confiança e apoio oferecido para este mestrado. Meu muito obrigado e gratidão;

Aos meus pais e melhores amigos, Lidia e Luiz Gonzaga, que me apoiaram nesta caminhada, ou melhor, escola, que é um Mestrado;

Ao meu irmão e grande amigo, Jefferson, pelo apoio incondicional.

A POLITRON, em especial ao Eng. Alessandro e à Dona Mara, pela confiança e apoio ao trabalho.

Ao meu amigo Luciano Prado de Oliveira, por seu apoio, incentivo, infinito otimismo e valiosos ensinamentos;

Um agradecimento especial a André Bonetto Trindade, pelo apoio, correção e contínuo encorajamento e pela tolerância a minha ausência, muito obrigada;

À minha grande amiga Érica, pela convivência, grande sinceridade e severas críticas sempre demonstradas em meu trabalho e minha maneira de ser, e que sem sua ajuda eu CERTAMENTE teria estado em maus caminhos;

Ao meu companheiro de projeto e amigo Kleber, pelas discussões, e inúmeros momentos de graça e descontração dentro e fora do laboratório

Aos meus amigos Alexandre e Fabiano, por nossas conversas, trabalhos e críticas nos momentos

apropriados;

Ao meu amigo Humberto Xavier pela sua amizade, companhia e ajuda na revisão deste modelo de dissertação.

Ao meu amigo e médico de plantão André Girardi, companheiro e estimulador nas madrugadas de trabalho e as eventuais urgências médicas.

Ao meu amigo e irmão de coração Diego Bitencourt, pela sua incondicional amizade, bem como pela criação de um sentimento mútuo de confiança adquirida entre nós

Ao meu amigo Emerson, vulgo Chile, digno do meu apreço e respeito, por motivos que nem mesmo ele imagina;

A minha família em Campinas e eternos amigos Arthur, Paulo Athanásio, Paulo Lagoia, Elana, Camila, Juliana Pará, Diego Didi, pela criação de um sentimento mútuo de confiança adquirida entre nós;

Aos amigos Daiana, Cristiani, Larissa, Ademar, Priscila, Neomar, pelos ótimos momentos;

Aos demais colegas de pós-graduação, pelas críticas e sugestões.

Ao *CST™*, pelo auxílio computacional.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Para finalizar, gostaria de expressar meus agradecimentos a todas as pessoas que de uma forma ou de outra me ajudaram a chegar até aqui; para elas digo: "muito obrigada".

Capítulo 1

Introdução

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

Engenharia, do *latim ingeniu* = "faculdade inventiva, talento", é a arte, a ciência e a técnica de bem conjugar os conhecimentos científicos de uma dada área do saber com a sua viabilidade técnico-econômica, para produzir novas utilidades e/ou transformar a natureza (Wikipedia).

A atualização de determinados equipamentos e componentes às severas normas internacionais obriga muitas empresas a adequarem seus equipamentos a fim de se tornarem competitivas. Contudo, a existência de máquinas e equipamentos já integradas ao processo de produção e, muitas vezes, cujas características sejam desconhecidas ou cuja documentação tenha sido perdida com o tempo, pedem um trabalho de engenharia que, ao mesmo tempo, atualize e melhore as características dos equipamentos. Este processo é conhecido como Engenharia Reversa, que por definição é a ação de analisar um sistema com dois objetivos: (1) identificar os componentes do sistema e as relações entre eles; e (2) criar uma representação do sistema em uma outra forma ou em um nível de abstração mais alto (Wikipedia).

Como o próprio nome indica, a Engenharia Reversa é uma engenharia "ao contrário", portanto, é uma atividade que trabalha com um produto existente (um software, uma peça mecânica, uma placa de computador, etc.) e tenta entender como este produto funciona e o que ele faz exatamente (todas as suas propriedades em quaisquer circunstâncias). Faz-se engenharia reversa quando troca-se ou modifica uma peça (ou um software) por outra, com as mesmas características, mas não tem-se todas as informações sobre essa peça. Objetivamente a engenharia reversa consiste em, por exemplo, desmontar uma máquina para descobrir como ela funciona, ou seja, é o processo de análise de um artefato e dos detalhes de seu funcionamento, geralmente com a intenção de construir um novo dispositivo que faça a mesma coisa.

Preocupadas em atender as necessidades do mercado, as indústrias responsáveis pela produção de máquinas de solda de polímeros por rádio frequência, buscam resolver em definitivo o problema de interferência lançando os equipamentos com Cavidade Ressonante. A Cavidade Ressonante elimina as frequências indesejadas causadoras de interferências nas comunicações de rádio, TV e computadores. Porém a descrição do funcionamento, do projeto, e características da cavidade ressonante utilizadas neste equipamento não foram documentadas, e para isto será necessário a utilização do processo de engenharia reversa, para que então possa-se fazer uso desta tecnologia em novas propostas.

Referindo-se a máquina de solda por rádio frequência, esta pertencente ao campo do maquinário industrial, a qual, aquece rápida e uniformemente os materiais a serem soldados, por meio de emissão de rádio frequência, o que faz com que o esforço mecânico para a obtenção efetiva da solda seja menor e aplicado durante um curto intervalo de tempo [Crawford, 1998]. O princípio físico é chamado de 'perdas dielétricas', pelo qual uma substância não condutora, o substrato, dissipa energia quando submetida à ação de um campo elétrico alternado.

1.1 Objetivos e organização do trabalho

O objetivo deste trabalho é analisar o funcionamento de máquinas de solda de polímeros, utilizando a técnica de rádio frequência. Contudo serão analisados as máquinas que possuem um estágio extra, o de blindagem e filtragem constituído por uma cavidade ressonante. Visando gerar um

modelo de parâmetros concentrado robusto, com objetivos futuros em aplicar tal tecnologia a outras necessidades, tal como a secagem de grãos.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta uma introdução ao processo de solda de polímero, com ênfase ao processo que utiliza a técnica rádio frequência, exemplifica algumas das aplicações desse processo e descreve a composição de uma máquina de solda por RF. No capítulo 3 é apresentado o princípio do funcionamento de uma válvula eletrônica triodo, as equações que regem o funcionamento da mesma, e um modelo para simulações computacionais partindo dessas equações. São também apresentados os osciladores senoidais, em especial o oscilador Colpitts valvulado, e para este obtem-se resultados computacionais. No capítulo 4 são apresentadas cavidades ressonantes, com um estudo específico para a cavidade ressonante coaxial. Para isto são analisadas características de linhas de transmissão e cavidade ressonantes. Para uma cavidade ressonante utilizada em máquinas de solda por RF foram realizadas simulações computacionais a fim de analisar a frequência de ressonância o comportamentos dos campos elétricos e magnéticos, o acoplamento da cavidade com o sinal de entrada. Por fim é modelado um circuito de parâmetros concentrados para a cavidade ressonante coaxial em análise. No capítulo 5 é então analisado o gerador da máquina de solda de plásticos por perdas dielétricas, unindo os circuitos analisados nos capítulos 3 e 4, com a carga, ou, substrato a ser soldado. Por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões a respeito dos resultados aqui obtidos, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Máquina de Solda Industrial por Rádio

Frequência

Muitas coisas não ousamos
empreender por parecerem difíceis;
entretanto, são difíceis porque não
ousamos empreendê-las.

Seneca

2.1 Aquecimento por Indução Eletromagnética

No aquecimento por indução o indutor gera um campo magnético a partir da corrente alternada que passa por ele, o qual induz uma corrente na superfície da peça. A resistência desta ao fluxo de corrente causa o aquecimento sem que haja o contato físico com a peça.

As vantagens do aquecimento por indução incluem a possibilidade de um aquecimento localizado e uniforme nos casos em que não é desejável a elevação da temperatura de toda peça, o que implica em gastos, além do curto intervalo de tempo no qual a temperatura aumenta.

2.1.1 Princípios do Aquecimento

Uma corrente alternada passando por uma bobina implica na formação de um campo magnético variável no tempo, o qual excita uma corrente na peça posicionada concentricamente e, conseqüentemente, induz um campo magnético no sentido oposto àquele gerado pela bobina [Curtis, 1944].

A variação do fluxo magnético induz correntes em forma de rodaminhos na superfície da peça, decorrentes da diferença de potencial entre vários pontos do material [Curtis, 1944]., conhecidas como correntes parasitas ou correntes de Foucault e, devido à intensidade destas correntes, o efeito Joule resultante provoca uma grande elevação da temperatura [Netto, 2007]. A frequência da corrente alternada tem influência direta na profundidade de penetração do aquecimento A ASM ¹ em [Valery Rudnev, 2000] define esta profundidade como a distância da superfície do sólido na qual a intensidade do campo magnético decresce para aproximadamente 37% do valor na superfície e pode ser calculada pela equação 2.1.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad (2.1)$$

onde:

δ -profundidade de penetração do aquecimento (m).

ρ - resistividade do material ($\Omega.m$).

μ - permeabilidade magnética (H/m).

f - frequência (Hz).

A potência requerida para o aquecimento da peça pode ser estimada a partir da equação 2.2, fornecida pela ASM International([Valery Rudnev, 2000] e [F. James Grist & Glen S. Lawrence, 1993]). A máquina de aquecimento por indução deve ter uma capacidade superior à calculada teoricamente para ser possível executar o processo de aquecimento [Shah, 1998].

$$P = \frac{d \cdot c_e \cdot \Delta T \cdot V}{t} \quad (2.2)$$

sendo:

¹ASM International - The Materials Information Society

P - potência (W).

d - densidade do material (kg/m^3)

c_e - calor específico (J/kg.K)

ΔT - incremento de temperatura (K)

V - Volume a ser aquecido (m^3)

t - tempo para que o incremento de temperatura aconteça (s)

2.2 Soldagem de Polímeros por alta frequência

A fim de soldar dois ou mais filmes plásticos, é preciso aquecer a solda conjunta até a temperatura de fusão do plástico enquanto o pressiona. É necessário manter a pressão até que o conjunto esteja suficientemente frio. Para isto pode-se utilizar a tecnologia de solda eletrônica por alta frequência, também conhecida pela sigla HF (*high frequency*) ou RF (*Radio Frequency*), que baseia-se no princípio físico chamado de 'perdas dielétricas', pelo qual uma substância não condutora (materiais isolantes como plástico, borracha, PVC, nylon, etc) dissipa energia quando submetida à ação de um campo elétrico alternado. A figura 2.1 mostra a foto de uma máquina, produzida pela Politron[®], que efetua este processo.

Isso ocorre porque as moléculas do material colocado sob influência do campo elétrico se polarizam. É um fato conhecido que um elemento bipolar colocado sob ação de um campo elétrico se alinhará com o campo molecular de tal forma que o polo positivo defronta-se com a extremidade negativa da outra molécula, e vice-versa, orientando-se na mesma direção de si mesmo (positivo - negativo - positivo...)[FLAWS, 1996]. A frequência do campo elétrico varia essa direção, e então as moléculas se orientaram de forma variável, concluindo então que uma vez submetidas à ação de um campo alternado de alta frequência o atrito molecular produzirá dissipação de energia térmica.

Alguns plásticos, como o PVC possuem moléculas polares e por isso são utilizados no processo de solda dielétrica, também chamado de "solda eletrônica". A energia dissipada no plástico (PVC), conhecida como "perdas dielétricas", faz com que ele, que está em contato com o eletrodo, aqueça até a fusão do mesmo, efetuando assim a solda (união molecular) pela força que a prensa da máquina exerce sobre o material. Essa energia é fornecida por um oscilador, que recebe da fonte



Figura 2.1: S 12 KW TV - máquina produzida pela Politron[®]. [Pol,]

de alimentação, como corrente contínua, e convertida em alternada de alta frequência, esta é enviada até a prensa por um circuito que regula a potência empregada. Geralmente, as máquinas de soldas eletrônicas utilizam a frequência de 27,12 MHz ([Mercer & Slate, 2008]). Um exemplo da utilização desse processo de soldagem é mostrado na figura 2.2.

2.2.1 Aplicações

A soldagem dielétrica, conforme dito anteriormente, usa eletricidade ou ondas eletrônicas a partir de um gerador de corrente alternada passando através de chapa ou filme de plástico. Tais ondas causam um alto nível de fricção molecular dentro do plástico, de modo que (dado um plástico com suficiente módulo de perda dielétrica) calor será gerado no interior do plástico e assim este irá fundir em seu ponto de contato (onde o campo de energia se concentra). Aplicando-se pressão neste ponto e com um tempo suficiente de resfriamento, uma ligação permanente é formada. Esse tipo de soldagem pode ser aplicado para quase todos termoplásticos: ABS, acetato, filme de poliéster, PVC, poliuretano, acrílicos, etc, e é até mesmo possível soldar dielectricamente os mais tenazes polímeros de engenharia, como filme de poliacetil. Em casos onde a tangente de perdas (ϵ'') é relativamente baixo, altas frequências devem ser utilizadas, necessitando de equipamentos mais caros. Quanto mais



Figura 2.2: Foto da utilização da máquina de solda de polímeros

alta a frequência, para determinado módulo de perdas dielétricas do plástico, mais rápido ocorre a fusão e a solda. Através dos anos, a soldagem dielétrica tem se tornado um processo muito versátil e, atualmente, é mais aplicada na selagem de filmes vinílicos e em camadas para produtos como capas de chuva, infláveis, e cortinas para chuveiro. Outra aplicação desse tipo de soldagem é na indústria automobilística onde, em painéis de portas de carro, camadas vinílicas são presas a uma camada rígida, entremeadas por espuma de poliuretano, através deste método de soldagem. Solas de sapato também tem sido coladas através deste tipo de soldagem, sendo que esta técnica para colar a sola demora apenas um dia para o sapato ficar pronto, comparando-se a outros métodos que demorariam uma semana. Finalmente, a soldagem dielétrica pode ainda ser usada como um método de decoração de produtos plásticos. Além disso, selando dois filmes vinílicos com um padrão predeterminado no molde é possível se obter um efeito acolchoado. Outro método possível é a de soldagem de aplique, funciona basicamente por um sistema de selagem e rasgo, onde o molde é forçado além do que seria normalmente, causando um afinamento da região, e assim o plástico sobressalente pode ser rasgado fora com as mãos. É possível criar um modelo de estampa rasgando todo o polímero em volta da área selada, deixando o modelo determinado pelo molde [Gruenspecht & Hopper, 2006]. Entre as aplicações destacam-se solda de sachê para embalagens de cosméticos, alimentos, óleos lubrificantes, detergentes e outras, blisters, calçados, malas, pastas, barracas de camping, colchonetes,

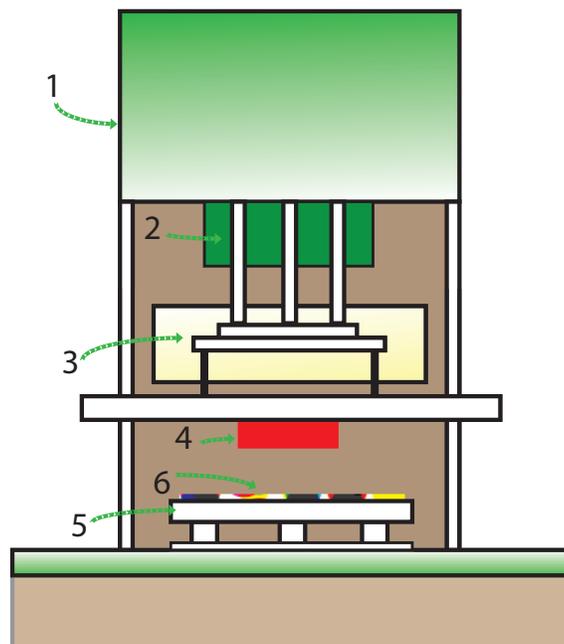


Figura 2.3: Modelo de uma máquina de solda por rádio frequência onde: 1 - Gerador; 2 - Sintonizador; 3 - Prensa; 4 - Molde; 5 - Mesa; 6 - Substrato a ser soldado.

barcos infláveis, coletes salva-vidas e outros.

2.2.2 Composição de uma máquina de solda por rádio frequência

Uma linha montada para operações de selagem/solda por alta frequência, como mostrado na figura 2.3, geralmente consiste de um gerador, regulador de potência, uma prensa seladora para aplicar pressão na região a ser ligada e moldes seladores para calor, dispostos na prensa para determinar o formato da área a ser selada. Faixas de potência de operação de 1 a 100 kW estão disponíveis, sendo que a faixa usual é entre 3 a 25 kW [FLAWS, 1996].

Gerador

O gerador tem a função de transformar os 60 Hz da rede elétrica em energia de alta frequência. Os geradores em questão neste trabalho são com cavidades em 27,12 MHz + / - 0,6%, conforme especificado pelos regulamentos internacionais CISPR [North & Ramarathnam, 1993]. E a carga máxima que a máquina é capaz de soldar é limitada pela potência nominal do gerador. O gerador

da Politron, que será fonte deste estudo, é composto por um sistema de retificação, um oscilador em rádio frequência, uma cavidade ressonante coaxial, bem como os acoplamentos de cavidade-oscilador, cavidade-carga. O diagrama deste gerador é mostrado na figura 2.4.

De modo geral, conforme [North & Ramarathnam, 1993], para as mais usuais aplicações com dois filmes plásticos (0,3 a 0,5 mm de espessura), a potência necessária é de cerca de $0,5W/mm^2$. Para a soldagem de alta qualidade (infláveis), aconselha-se para o dimensionamento de potência do gerador de $1W/mm^2$, ou $1000mm^2/kW$. Em contrapartida, para filmes plásticos espessos pode-se usar apenas $0,33W/mm^2$, ou seja, $3000mm^2/kW$. Como uma regra de ouro utiliza-se $0,5W/mm^2$. Portanto, a fim de calcular a potência necessária para a solda, é preciso calcular o valor máximo da solda em por unidade de área, multiplicando seu comprimento (em mm) e sua largura (em milímetros). Dessa forma, para soldar sacolas em forma de U destinadas a conter folhas de papel A4, haverá duas soldas verticais de cerca de $300mm$ cada e uma solda na horizontal de cerca de $230mm$, totalizando $830mm$ de comprimento. Se a largura exigida é de $3mm$, a superfície será $2490mm^2$ e, portanto, a potência necessária é $1450W$. Esta é a potência mínima necessária para soldar uma sacola: para soldar quatro deles em uma etapa, a potência mínima necessária seria $4 * 1450 = 5800W (5.8kW)$. Nesse caso, a seleção direita é de 7,5 ou 10 kW gerador para obter uma certa margem.

Sintonizador

O sintonizador regula a transferência de energia de alta frequência para o material a ser soldado, transferindo a potência necessária para a ocorrência de solda dentro da especificação.

Prensa

Quando solda-se por alta frequência, o material plástico compreendido entre o eletrodo (molde) e a mesa é submetido a um aquecimento uniforme devido às perdas dielétricas que se desenvolve com a passagem da corrente de alta frequência. Para completar a soldagem, é necessário que o material plástico esteja submetido a uma pressão, para isto tem-se uma prensa, que deve ser rígida e robusta.

A principal característica da prensa que esta necessita uma força para fechar. Para aplicações comuns assume-se $0,05kg/mm^2 (5kg/cm^2)$ ([FLAWS, 1996]). No exemplo acima, quando soldamos

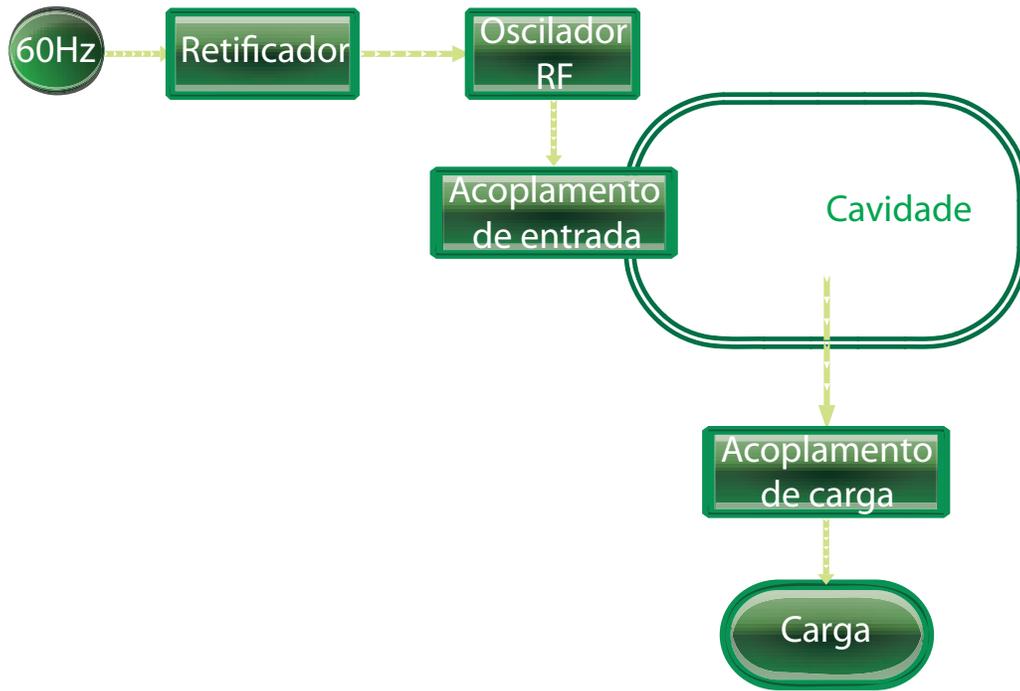


Figura 2.4: Diagrama de um gerador de RF para uma máquina de solda por perdas dielétricas

4 sacos de $2490mm^2$ cada um, a força total necessária para fechar é $4 * 2490 * 0,05 = 498kg$. Escolhe-se uma pressão com força maior do que a necessária, ou seja, para o exemplo, superior a 500 kg.

O movimento da prensa pode ser pneumática ou hidráulica. O sistema pneumático é favorito para forças de até 1000 kg. A hidráulica um faz o seu melhor para forças de 2000 kg.

Eletrodo

O eletrodo é o elemento que molda a solda sobre o filme plástico. A maioria dos eletrodos são de simples fabricação, tais como latão perfis padronizados, com ou sem faca, fixados sobre uma placa de alumínio. O mais simples é um eletrodo de latão, fixo com perfil em uma placa de alumínio. O perfil irá transferir a sua superfície desenho à superfície de plástico. De um lado do perfil, pode-se fixar uma faca para cortar a peça soldada facilitando a operação de remoção da peça soldada. O eletrodo pode incluir uma profundidade limite para controlar mecanicamente sua penetração no interior do plástico. Os moldes podem, além da solda, realizar um processo denominado gofragem, processo este que atribui marcas, texturas, ao substrato pré-definido [Gruenspecht & Hopper, 2006]. Os eletrodos podem ser dispositivos muito complexos em em duas ou três dimensões, trabalhados em

máquinas CNC(*Computer Numeric Control*) de desenhos detalhados ou digitalização das amostras.

Controle da temperatura

Na máquina de alta frequência, o eletrodo e a mesa não são aquecidos diretamente pela alta frequência ou intensidade campo. Por outro lado, o plástico é aquecido até seu ponto de fusão. Uma vez que durante o processo de soldagem o plástico é prensado entre o eletrodo e a mesa, haverá então uma transmissão de calor a partir do plástico para o eletrodo, e também para a mesa. As mesas são, geralmente, dispositivos de grande superfície e grande massa e, portanto, sua temperatura varia muito lentamente.. Os perfis dos eletrodos, entretanto, são elementos de massa menor e de superfície pequena, dessa forma, sua temperatura aumenta facilmente. Quanto maior a potência utilizada e a taxa de produção, maior é o aumento da temperatura média no eletrodo, uma situação típica em máquinas automáticas. Considerando tempos muito curtos, dentre 1 a 5 segundos, a temperatura do eletrodo e da mesa são, geralmente, a temperatura ambiente e, portanto, a superfície do plástico em contato com eles torna-se arrefecido, ou seja, são refrigeradas as superfícies externas do material plástico em contato com o eletrodo e a mesa. Nestas condições, a maior temperatura alcançada é no meio da articulação a ser realizada, justo onde é mais necessário. Dessa forma, o plástico se funde no interior e permanece frio no exterior. Isto permite uma aplicação de elevada densidade de potência na soldagem. Para obter qualidade constante na soldagem, é importante manter o eletrodo em uma temperatura constante e, para este efeito é necessário um sistema de arrefecimento em escala industrial. Nestes equipamentos uma temperatura pode ser selecionada, por exemplo, 40° C, e o equipamento vai aquecer o eletrodo no início do dia de trabalho e ela vai esfriar depois de vários ciclos de trabalho. O arrefecimento líquido flui diretamente através de um tubo metálico soldado ao eletrodo, ou por uma placa fixada ao eletrodo transportadora em que o eletrodo é aparafusado.

Capítulo 3

Oscilador em Rádio Frequência

Apenas se constrói com solidez
sobre o passado.

Thomas Eliot

Osciladores são circuitos eletromagnéticos que transformam corrente contínua (CC) em corrente alternada(CA), através da conversão de energia elétrica em magnética. Entretanto esta conversão somente é possível se este circuito conter um dispositivo eletrônico. Para cada dispositivo eletrônico inserido no oscilador, a análise parte de pontos diferentes, por isso faz-se necessário o estudo preliminar deste. O oscilador contido na máquina S 12 KW TV[®] produzida pela Politron, a qual será objeto de estudo, é um oscilador valvulado.

3.1 Válvula Eletrônica

A válvula é um tubo, geralmente a vácuo contendo: um filamento, um catodo, uma placa (ou anodo) e alguns tipos têm algumas grades espiraladas internas. O funcionamento básico das válvulas é regido: O filamento acende e aquece um tubinho metálico chamado catodo. Quando o catodo está quente, ele libera (emite) elétrons que ficam girando ao seu redor. Aplicando uma tensão positiva na placa, esta atrai os elétrons emitidos pelo catodo estabelecendo uma corrente pelo interior da válvula [Terman, 1943]. Em alguns tipos de válvula o próprio filamento emite os elétrons e desta forma elas não tem catodo. Esta válvula do exemplo chama-se diodo porque possui dois elementos internos:

placa e catodo. O filamento não conta na nomenclatura das válvulas. Outras válvulas tem grades entre o catodo e a placa, sendo chamadas, de triodos, tetrodos, que tem como função básica controlar o fluxo de elétrons entre a placa e o catodo. Neste trabalho será tratada somente a válvula triodo.

3.2 Válvula Triodo

A válvula triodo, um dispositivo de três eletrodos, é o primeiro resultado do aperfeiçoamento do diodo à vácuo. A inclusão de um terceiro eletrodo, estrategicamente colocado entre o cátodo e a placa, constituiu o primeiro dispositivo eletrônico, em torno do qual pode ser implementado qualquer circuito eletrônico, seja um amplificador, um oscilador ou um filtro. Esse terceiro eletrodo é denominado grade ou, mais especificamente, grade de controle, cuja função é controlar a corrente que circula entre o cátodo e a placa. Sendo um eletrodo "aberto", a grade de controle, em princípio, não está incluída, sob o aspecto de corrente contínua, no circuito catodo e placa. A grade de controle, salvo em aplicações especiais, é sempre polarizada negativamente em relação ao catodo. A título de ilustração, a válvula triodo se assemelha, em termos de princípio de operação, ao transistor de efeito de campo (FET). Na figura 3.1 é apresentada a simbologia tradicional encontrada em diagramas esquemáticos e na literatura em geral para triodos, onde **a** representa a placa ou ânodo, **g** a grade, **k** o catodo e **f** o filamento da válvula. Em raríssimos casos o filamento é desenhado dentro do símbolo do triodo. Geralmente são desenhados na fonte de alimentação com seus respectivos pinos.

3.2.1 Curvas características da válvula

Considerando o regime de corrente contínua, ou seja, a grade de controle está polarizada por um potencial de corrente contínua sem a hipótese de corrente alternada.

A introdução da grade de controle inserida entre catodo e placa, permite o controle efetivo da corrente que circula entre estes eletrodos. É fácil constatar a eficiência deste controle quando admiti-se que a grade está polarizada negativamente em relação ao catodo. Na figura 3.2 apresenta-se um circuito básico a triodo para considerar a situação da grade polarizada. Este circuito incorpora, agora, uma fonte de polarização negativa ajustável denominada Egg. Nos circuitos práticos, a tensão de grade de controle é obtida diretamente através de Epp (tensão de polarização da placa) e não de

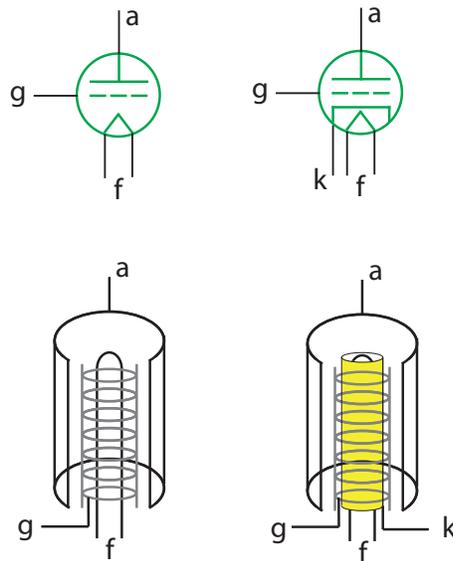


Figura 3.1: Simbologia de válvula triodo, onde a - placa ou anodo, g - grade, k - cátodo, f-filamento. (a) válvula com aquecimento direto, (b) válvula com aquecimento indireto

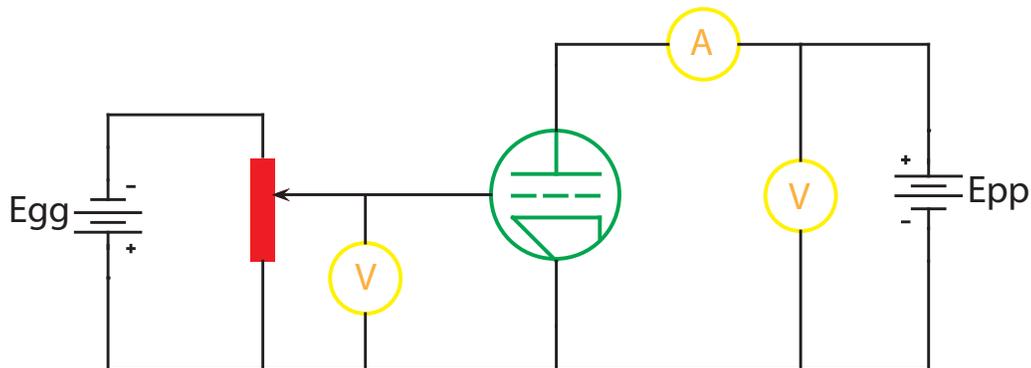


Figura 3.2: Circuito de polarização da grade da válvula

E_{gg} . Na verdade, todas as tensões necessárias para polarizar os eletrodos de uma válvula são obtidas através de E_{pp} .

Considerando o circuito da figura 3.2, para o caso da tensão de polarização de grade fortemente negativa, não há circulação de corrente no circuito cátodo e placa, em outras palavras, o triodo está em corte. Isto é evidente, pois estando a grade muito negativa tem-se os elétrons emitidos pelo cátodo sejam repelidos pela grade. O segundo caso é quando a grade de controle está submetida a uma tensão de polarização razoavelmente negativa. Nesta situação, o fluxo de corrente do cátodo para a placa é significativo. Para a aplicação de tensão de negativa de polarização muito pequena na grade, próximo

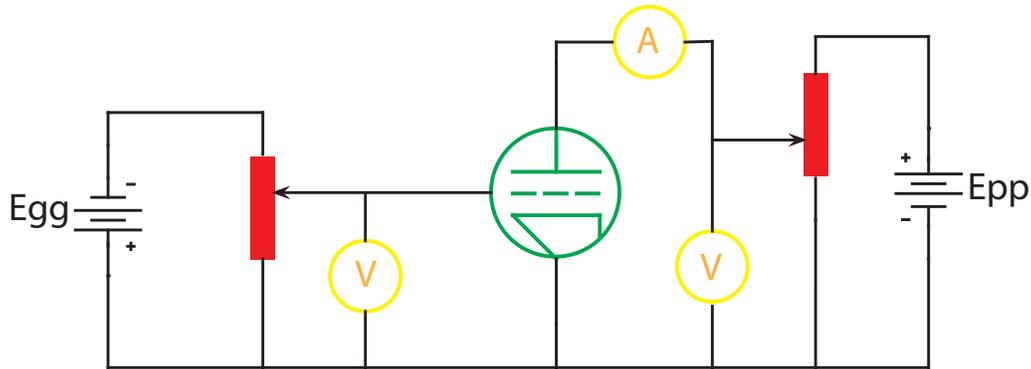


Figura 3.3: Circuito para levantamento das curvas características da válvula

a zero, e o fluxo de elétrons no circuito cátodo e placa é muito intenso. Em uma situação como esta, o triodo está próximo do ponto de saturação. O último caso a ser analisado é quando a placa está polarizada positivamente, isto significa que todos os elétrons emitidos pelo cátodo são acelerados em direção à placa, não encontrando, neste percurso, nenhum elemento que limite o fluxo. Nesta situação, a grade de controle perde sua função primordial e, a partir deste ponto, um aumento no sentido positivo da tensão de polarização de grade não significará um aumento na corrente de placa. A válvula está saturada. Os limites de operação da válvula triodo (ponto de corte e de saturação), bem como das demais válvulas, varia conforme o tipo e fabricante.

Nesta análise preliminar, a tensão de placa foi mantida fixa, variando a tensão de polarização da grade de controle. Observa-se que para cada variação da tensão de grade corresponde uma variação na corrente de elétrons do cátodo para a placa, ou seja, na corrente de placa, e como esta é dependente da tensão de placa conclui-se que existe um forte interrelacionamento entre tensão de polarização de grade e a corrente de placa e tensão de placa, de forma que pode-se construir um conjunto de curvas características para demonstrar a variação da corrente de placa com a variação da tensão de grade ou tensão de placa. Para isto é necessário preparar o experimento de forma que se possa variar a tensão de grade ou a tensão de placa, e monitorar as três grandezas. Este circuito está demonstrado na figura 3.3.

Com isso é possível obter uma família de curvas de características, como as obtidas para a válvula ECC83 por [Koren, 1996], mostradas na figura 3.4. Na verdade, as curvas características são de duas categorias:

1. curvas característica de placa: As curvas características de placa mostram a relação entre

corrente de placa e tensão de placa com a tensão de polarização de grade constante.

2. curvas características de transferência: As curvas características de transferência mostram a relação entre corrente de placa e tensão de grade com a tensão de polarização de placa constante.

3.2.2 Modelo matemático para válvulas triodo

Para fazer o modelo matemático da válvula, é necessário contar com as curvas características de placa e/ou curvas características de transferências. Quando estas não são fornecidas adequadamente pelo fabricante, é necessário fazer o levantamento destas por meio experimental como mostrado.

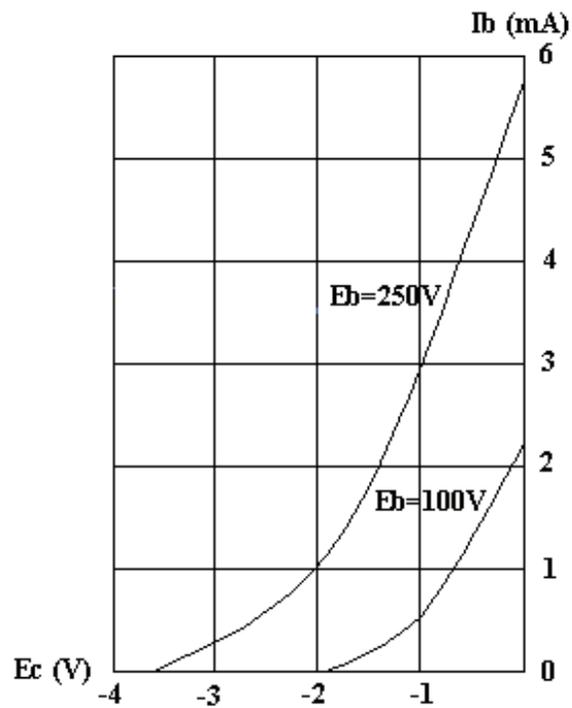
Os modelos fundamentais de válvula (por exemplo, aqueles apresentados por [int, 1989], [Reynolds, 1993] e [Leach, 1995]) são baseados em implementações diretas da idealizada "lei da potência 3/2", regendo que, para a corrente em um triodo ideal:

$$i_P = K_G \cdot (V_G + V_P)^{3/2} \quad (3.1)$$

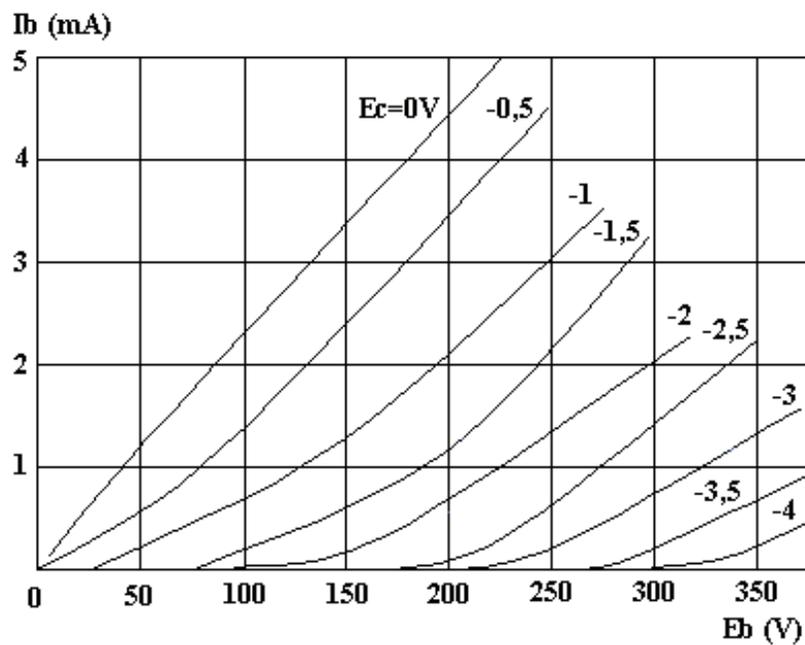
onde i_P é a corrente instantânea na placa, V_G é a tensão instantânea na grade, V_P é a tensão instantânea na placa, K_G é uma constante de proporcionalidade chamada de *perveance*. (Por esta e todas as relações que se presume que o catodo é constituído pelo potencial terra. Além disso, a relação acima e as subsequentes são válidas apenas quando as respectivas quantidades entre parênteses ($V_G + V_P$) são positivas. Quando essa quantidade for negativa, não haverá fluxo de corrente na placa).

Expandindo a lei de potência 3/2, Koren apresentou em [Koren, 1996], modelos fenomenológicos, isto é, equações que mostram o comportamento de fenômenos físicos utilizando um número razoável de parâmetros, das válvulas triodos, que mostraram a eficácia do modelo de comportamento das válvulas através de uma ampla gama de tensões e correntes de placa [Koren, 1996]. Para modelo de triodos, Koren utiliza as seguintes equações:

$$E_1 = \frac{V_P}{k_P \cdot \log \left\{ 1 + e^{k_P \cdot \left(\frac{1}{MU} + V_G / \sqrt{k_{vb} + V_P^2} \right)} \right\}} \quad (3.2)$$



(a)



(b)

Figura 3.4: (a)Curvas características de transferência; (b)Curvas características de placa do triodo comercial ECC83 obtidas por [Koren, 1996]

$$i_P = \frac{(E_1)^x}{K_{G1} \cdot (1 + \text{sgn}(E_1))} \quad (3.3)$$

Aqui MU e K_{G1} são essencialmente o fator de amplificação e duas vezes o inverso da *perveance* a partir da lei da potência 3/2, x é o expoente n na lei de potência 3/2, e k_P e k_{vb} controlam a natureza do *bending* perto das curvas de corte. (O termo $(1 + \text{sgn}(E_1))$ parte da equação 7.2 força a corrente da placa para zero quando E_1 é negativo).

Em [Koren, 1996], Koren declara ter tirado vantagens partindo do fato de que $\log(1 + e^x)$ resulta em x quando $x \gg 1$, e 0 para $x \ll 1$. Assim, para altas correntes na placa este modelo funciona melhor do que os da lei de potência 3/2 - com a ressalva de que o expoente 3/2 é agora tratado como um parâmetro variável. No entanto, para baixas correntes na placa, o $\log(1 + e^x)$ resulta em uma relação que efetivamente imita o comportamento de válvulas do mundo real em baixas correntes. Além disso, estes resultados são obtidos com melhorias relativamente de baixa complexidade computacional e com apenas três parâmetros adicionais.

Identificação dos parâmetros utilizando métodos analíticos

A principal preocupação associada à utilização de qualquer modelo é determinar um conjunto adequado de parâmetros que resulta no comportamento desejado. Dado que só existem dois parâmetros desconhecidos na lei de potência 3/2, portanto trata-se de um assunto relativamente simples de resolver, utilizando dois pontos dados da curva característica. Sendo i_{P1} , V_{P1} e V_{G1} representantes do primeiro ponto de dados e i_{P2} , V_{P2} e V_{G2} o segundo, é possível definir:

$$\alpha = \frac{i_{P1}}{i_{P2}} \quad (3.4)$$

Resolvendo para MU

$$MU = \frac{V_{P1} - \alpha^{2/3} \cdot V_{P2}}{\alpha^{2/3} \cdot V_{G2} - V_{G1}} \quad (3.5)$$

e

$$K_G = MU^{3/2} \cdot \frac{i_P}{(MU \cdot V_G + V_P)^{3/2}} \quad (3.6)$$

Sendo a lei de potência 3/2 não exata em 100%, os valores resultantes dos cálculos acima dependerão um pouco sobre os pontos dados selecionados. Para assegurar a aceitação dos resultados obtidos é necessário que o primeiro ponto é tido no zero da grade e a corrente relativamente elevada na placa e a segunda base de pontos a uma tensão na grade bastante baixa e corrente relativamente baixa na placa , tendo o cuidado de evitar a região onde a válvula entra em corte [Reynolds, 1993].

Infelizmente, o simples método de identificação dos parâmetros apresentado acima se torna inapropriado no caso de válvulas que possuem um grande número de parâmetros envolvidos - e, portanto, o grande número de equações a resolver em simultâneo. Porém para o caso estudado, válvula triodo de potência, a utilização da lei de potência 3/2 é válida.

Software para identificação dos parâmetros da válvula baseando-se no método de otimização

A solução explorada neste trabalho é a utilização do computador com base em métodos de otimização para identificar parâmetros do modelo. Essa solução foi implementada utilizando Matlab[®], uma multi-plataforma interativa de alta performance voltada para o cálculo numérico. As principais vantagens de utilizar Matlab[®] para o desenvolvimento do método incluem transportabilidade do código e rapidez de desenvolvimento. O código foi concebido partindo das equações de [Koren, 1996], que são as equações (7.1) e (7.2), partindo de uma fonte de dados que são as tensões de grade e placa e corrente de placa relacionadas (V_G , V_P , i_P) e um "chute" inicial para o parâmetros que deseja-se encontrar. É possível a visualização da curva característica na placa obtida através dos parâmetros finais encontrados, para que possa ser comparados com os pontos de referência dados. Isto pode acelerar a interatividade e a busca dos parâmetros consideravelmente. No entanto, o verdadeiro poder de uma ferramenta como Matlab[®] reside na capacidade de encontrar automaticamente o modelo utilizando parâmetros pré-programados nos algoritmos de otimização. Para este fim utilizou-se um conjunto de funções e *scripts* (comandos em sequência contido em um *m-files*) do Matlab[®].

Dentro do *m-files*, arquivos texto que contêm uma sequência de comando para o Matlab[®], os parâmetros do modelo são encontrados por minimização de uma função de erro. A função erro pode ser selecionada para retornar a média do erro fracionário durante todos os pontos de referência.

Porque a maioria dos algoritmos de minimização não condicionam variáveis e porque os valores negativos para parâmetros utilizados no modelo Koren são inaceitáveis. A transformação logarítmica das variáveis foi utilizado para limitar parâmetros de valores positivos, sem perder a capacidade de utilização da otimização. Enquanto isso, aumenta o cálculo fardo, que impede que o otimizador convirja para parâmetros finais inaceitáveis.

Para o trabalho apresentado no presente documento, *fmins ()* do Matlab® foi utilizado como função o minimizador de erro porque é empacotado com a versão do *Optimization Toolbox* que vem com a versão do estudante Matlab®. Infelizmente, *fmins ()* é extremamente lenta, devido à sua minimização da utilização de um algoritmo simplex. Assim, dependendo da velocidade do computador, ao fechar os primeiros parâmetros até a obtenção dos parâmetros finais, o operador necessitará de paciência, pois o tempo que demora a convergir em parâmetros ótimos estabelecidos pode ser longo.

Outra característica da função *fmins ()* é que ela vai encontrar apenas um mínimo local de uma função e não necessariamente a função do mínimo absoluto. Assim, é importante definir os parâmetros iniciais tão próximos aos parâmetros finais esperados como possível, ou realizar inúmeras otimizações iniciais a partir de diferentes pontos.

Após algumas experiências, verificou-se que dados de referência constituídos por cerca de 50 pontos cuidadosamente selecionados, foi o ideal para encontrar os parâmetros das válvulas investigadas. Menos pontos resultou no aumento de erro enquanto pontos adicionais produziu pouca melhoria.

3.2.3 Validação do software de identificação dos parâmetros da o modelo da válvula no PSpice®

O PSpice® é um *software* de simulação de circuitos eletrônicos originalmente desenvolvido na Universidade da Califórnia em Berkeley, tem encontrado grande aceitação na indústria de eletrônicos e semicondutores. Pode efetuar, com ampla precisão no domínio do tempo e frequência, análises de circuitos analógicos e digitais complexos. PSpice® contém modelos de dispositivos passivos (resistores, capacitores, indutores, etc) e para a maioria dos dispositivos semicondutores (transistores bipolares, FETs, AMPOP, etc), mas nenhum para válvulas, por isso a necessidade do equacionamento da válvula, e para isto o descobrimento de seus respectivos parâmetros para então a implementação

```
.SUBCKT YD1160 1 2 3 ; P G C; NEW MODEL
+ PARAMS: MU=20.89 EX=1.361 KG1=523.6 KP=82.37 KVB=300 RGI=1000 VCT=0
+ CCG=1.9P CGP=0.5P CCP=14.5P ; PARÂMETROS ENCONTRADOS PELO MATLAB.
E1 7 0 VALUE=
+{V(1,3)/KP*LOG(1+EXP(KP*(1/MU+V(2,3)/SQRT(KVB+V(1,3)*V(1,3))))))}
RE1 7 0 1G
G1 1 3 VALUE={{PWR(V(7),EX)+PWRS(V(7),EX)}/KG1}
RCP 1 3 1G ; TO AVOID FLOATING NODES IN MU-FOLLOWER
C1 2 3 {CCG} ; CATHODE-GRID; WAS 1.6P
C2 2 1 {CGP} ; GRID-PLATE; WAS 1.5P
C3 1 3 {CCP} ; CATHODE-PLATE; WAS 0.5P
D3 5 3 DX ; FOR GRID CURRENT
R1 2 5 {RGI} ; FOR GRID CURRENT
.MODEL DX D(IS=1N RS=1 CJO=0 TT=1N)
.ENDS YD1160
```

Figura 3.5: Modelo de um dispositivo no SPICE - *Netlist* para a válvula YD1160

das equações em um modelo equivalente no PSpice[®], e assim a utilização desta para análise de circuitos.

A linguagem do SPICE utiliza um padrão da indústria para a descrição dos circuitos eletrônicos, também chamados de *netlist*, e instruções para a modelagem deles. Vale salientar que o PSpice[®] é uma implementação comercial do SPICE com interface gráfica. O PSpice[®] consiste em três programas distintos: *Schematics* para entrada de dados, para executá-lo o SPICE e *Probe* para exibir os resultados. Para adicionar modelos ao SPICE é necessário conhecer a linguagem utilizada: A primeira linha de um modelo deve conter o título, a última é contida por um *.END*, as linhas de dados (*Netlist*) tem geralmente o seguinte formato,

Parte nó 1 nó 2 nós adicionais se for aplicado valor ; comentários se necessário

Os comentários podem aparecer nas linhas que começam com um asterisco (*) ou em linhas de dados na sequência de um ponto e vírgula (;). A Continuação das linhas começam com um sinal mais (+), excepto para as equações, quando a parte, à direita do sinal de igual é restrito a uma linha. Esta limitação pode apresentar problemas com longas equações. A figura 3.5 é um exemplo de implementação de um modelo de componente eletrônico no PSpice[®], que corresponde a válvula analisada.

Partindo do equacionamento da válvula apresentado no item 3.2.2 pode-se gerar um modelo de componente de válvula para PSpice[®]. Assim como dito anteriormente, é necessário uma fonte

```

Valve= '12AT7';
Source = 'Tom Mitchell';
VGP = 0:-1:-6; axset = [0 400 0 .02]; MU=60;
Vp = [60 160 140 240 200 300 280 360];
Vg = [0 0 -2 -2 -4 -4 -6 -6];
ldata = [.00398 .0157 .00194 .0102 .00118 .00649 .000945 .00370];

```

(a)

```

Valve = '12AU7';
Source = 'Sylvania Technical Manual';
VCT = 0;
VGP = 5:-5:-30; axset = [0 400 0 .05];
Vp = [100 250 320 270 400 350 50 20 ];
Vg = [0 0 0 -5 -20 -10 5 5 ];
ldata = [.0135 .0407 .054 .025 .0077 .023 .019 .011];

```

(b)

```

Valve = '6SN7';
Source = 'Sylvania Technical Manual';
VGP = 4:-4:-28; axset = [0 500 0 .03];
Vpmax = 500;
Vp = [80 160 250 180 260 300 400 400 450 500 20];
Vg = [0 0 -4 -8 -8 -16 -12 -16 -24 -28 4];
ldata = [.0083 .0210 .022 .0020 .0101 .0005 .0194 .0079 .0013 .0009 .0097];

```

(c)

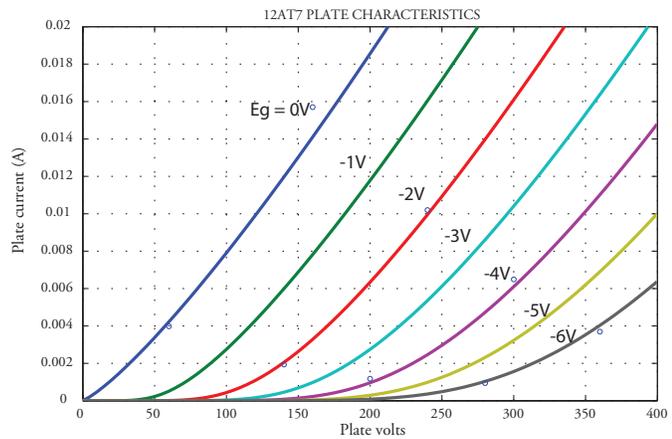
Figura 3.6: *M-files do Matlab[®] que possui os pontos que relacionam a tensão de grade, tensão e corrente de placa da válvula (a) 12AT7 (b) 12AU7 (c) 6SN7*

de dados que relacionam as tensões de grade e placa e corrente de placa e as condições iniciais para o parâmetros que deseja-se encontrar. As figuras 3.6a, 3.6b e 3.6c apresentam exemplos de *m.files* da relação, ou melhor, pontos que relacionam a corrente de placa, tensão de placa e tensão de grade para válvula que deseja-se encontrar os parâmetros para o equacionamento. Este *m-file*, será considerado como dados iniciais da válvula. Com os ajustes nas condições iniciais dos parâmetros a ser otimizados e a inserção dos dados iniciais, o *software* implementado no Matlab[®] retorna a lista de parâmetros otimizados, como mostrado nas figuras 3.7a, 3.7c e 3.7e, necessário para gerar o modelo da válvula conforme a equação 7.1 (bem como a curva característica de placa, de forma a fazer a comparação com a curva real da válvula em estudo). As figuras 3.7b, 3.7d e 3.7f apresentam as curvas características de placa para cada válvula em análise, que comparadas com as fornecidas pelo fabricante via *datasheet*, mostrou-se que a otimização dos parâmetros é válida, pois as curvas possuem o mesmo comportamento, seja qualitativo ou quantitativo. Foram realizadas para esta validação a análise de 10 válvulas muito bem documentadas e utilizadas em âmbito industrial, porém mostra-se apenas os resultados para as válvulas 12AT7, 12AU7 e 6SN7.

Com os parâmetros válidos, gerou-se um modelo para válvula no PSpice[®], utilizando o

```
.SUBCKT 12AT7 1 2 3 ; P G C (Triode)
+ PARAMS: MU= 67.49 EX= 1.234 KG1= 419.1 KP=213.96
+ KVB= 300.0 VCT= 0.00
.ENDS
```

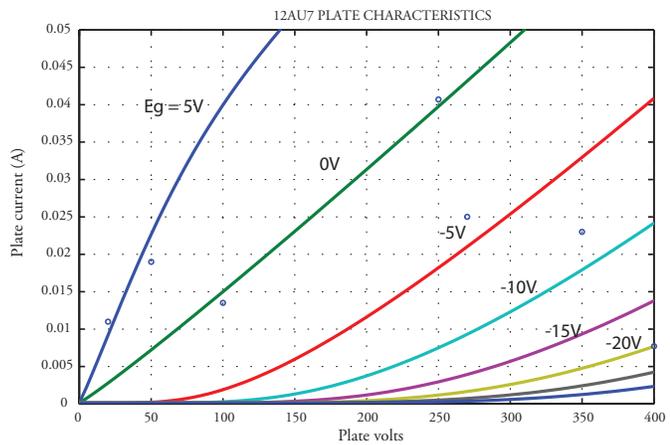
(a)



(b)

```
.SUBCKT 12AU7 1 2 3 ; P G C (Triode)
+ PARAMS: MU=542.22 EX= 1.070 KG1= 216.6 KP= 47.27
+ KVB=11954.4 VCT= 0.00
.ENDS
```

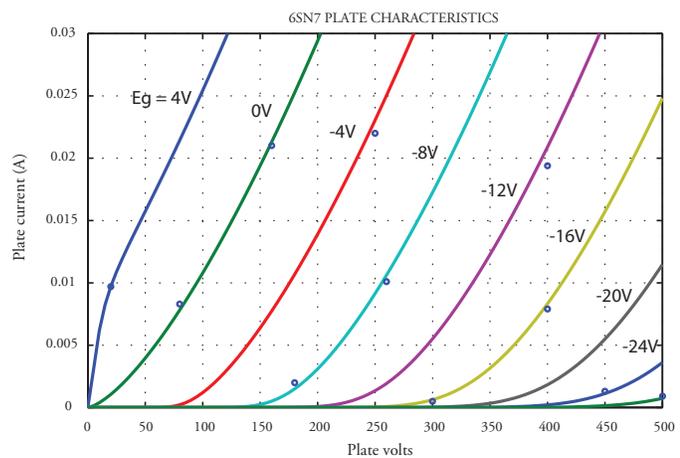
(c)



(d)

```
.SUBCKT 6SN7 1 2 3 ; P G C (Triode)
+ PARAMS: MU= 20.33 EX= 1.446 KG1=1856.8 KP=174.61
+ KVB= 97.0 VCT= 0.00
.ENDS
```

(e)



(f)

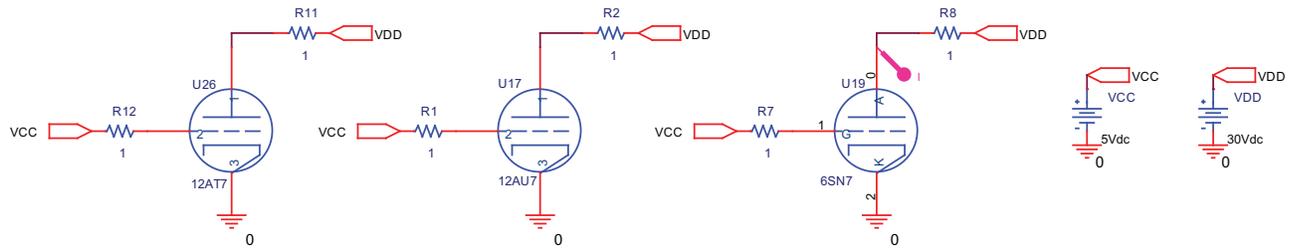
Figura 3.7: Resposta da otimização dos parâmetros da válvula (a) 12AT7 (c) 12AU7 (e) 6SN7, com a curva característica de placa para a válvula (b) 12AT7 (d) 12AU7 (f) 6SN7 obtidas pelo *software* implementado no Matlab[®]

equacionamento de válvula implementado por [Koren, 1996]. A figura 3.5 mostra este modelo implementado para a válvula YD1160. A diferença entre os modelos de válvulas, são os parâmetros da equação 7.1 e as capacitâncias parasitas (que são obtidas pelo fabricante da válvula) de cada uma. Com o modelo para o dispositivo em estudo, gerou-se uma bateria de simulações no PSpice[®], de forma a gerar as curvas características de placa da válvula. O esquemático do circuito é apresentado na figura 3.8a. O modelo foi validado pois as curvas características de placa obtidas pela simulação apresentaram um erro de $\pm 1\%$ comparadas com as curvas fornecidas pelo fabricante da válvula.

Partindo destas validações, pode-se então gerar um modelo para PSpice[®] de qualquer válvula, utilizando os parâmetros para a equação 7.1 otimizados no Matlab[®] dado que, tem-se a relação entre a corrente de placa, tensão de placa e tensão de grade. Para o caso da válvula YD1160, que é utilizada na máquina S12 KWTV[®] [de Freitas, 2003] da Politron[®], o fabricante não forneceu as curvas características da válvula, então, houve a necessidade de gerar estas curvas experimentalmente, para que então pudesse ser feito o modelo desta válvula para o PSpice[®].

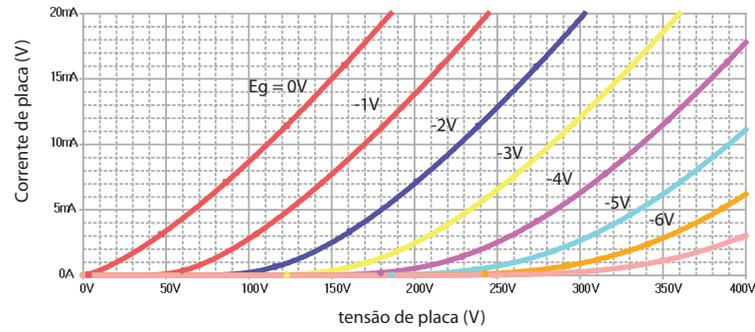
O experimento para obter a curva característica, foi implementado utilizando o sistema de alimentação da máquina S10 KWTV[®] da Politron[®], por motivos de segurança, já que se trata de um sistema de alta potência (12kW). Utilizou-se de um VARIAC para variar a tensão da rede trifásica, e assim obtendo a mudança de valor na tensão de placa. Para a tensão de grade foi possível somente o controle para duas tensões, -6.3V e -5V. Foi monitorado, a tensão de placa e a corrente de placa, mantendo a tensão de grade constante, pegou-se 30 pontos para cada curva e obteve-se a curva característica de placa que é mostrada na figura 3.9.

Alguns pontos selecionados do experimento foram utilizados como dado de entrada para otimizar os parâmetros do equacionamento da válvula através do *software* implementado. Foi necessário fazer a otimização dos parâmetros mais de uma vez, pois não tinha-se condições iniciais deles de forma a garantir a melhor otimização. A figura 3.5 mostra o modelo deste componente implementado para o PSpice[®] sendo as primeiras linhas deste os parâmetros obtidos pelo Matlab[®]. Para validar o modelo da válvula YD1160, simulou-a no circuito conforme a figura 3.3, o gerou a figura 3.10. Mostrando o comparativo das curvas, representada na figura 3.11, mostra que o modelo para a válvula YD1160 é válido.

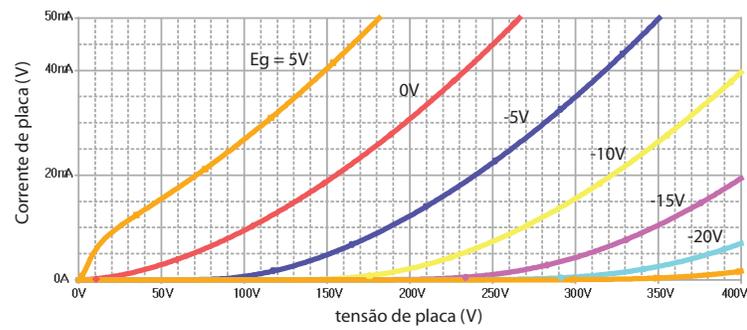


Teste de modelo da válvula, para validar o modelo

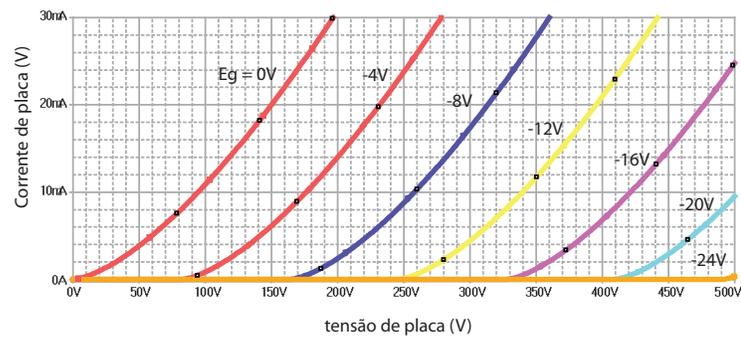
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.8: Simulação dos modelos de válvulas implementados no PSpice® com as curvas características de placa obtidas para a válvula (b) 12AT7 (c) 12AU7 (d)6SN7

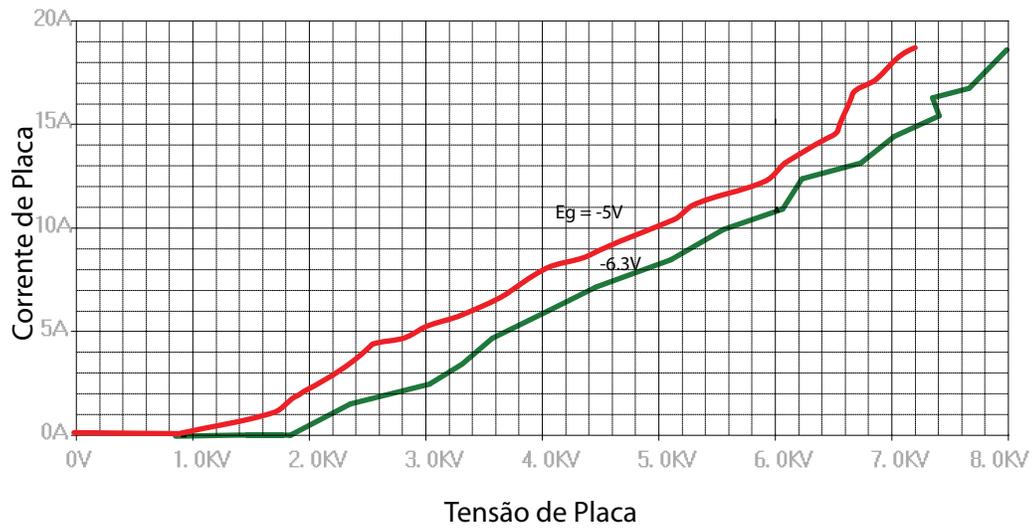


Figura 3.9: Curva característica de placa da válvula YD1160 para tensão de grade de -5 e -6.3V

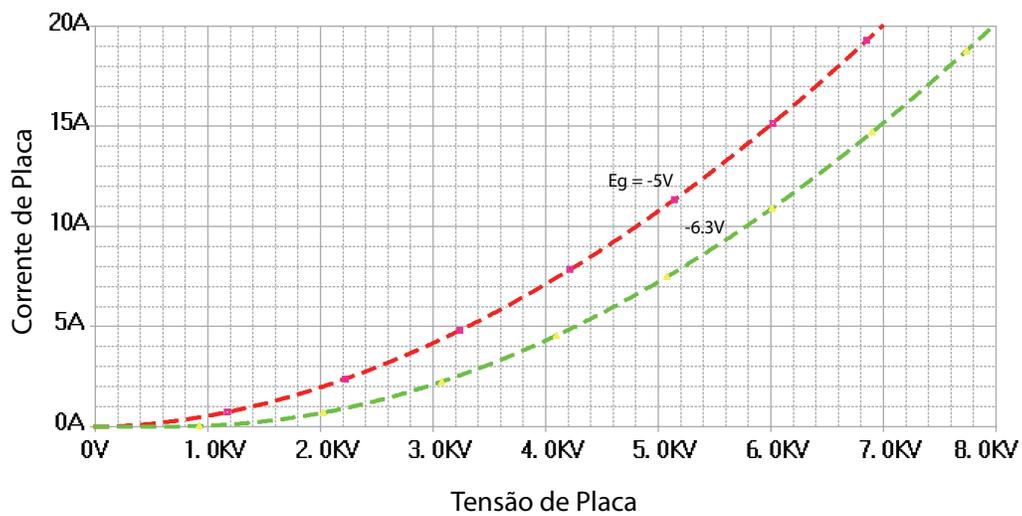


Figura 3.10: Curva característica de placa do modelo para válvula YD1160 no PSpice®

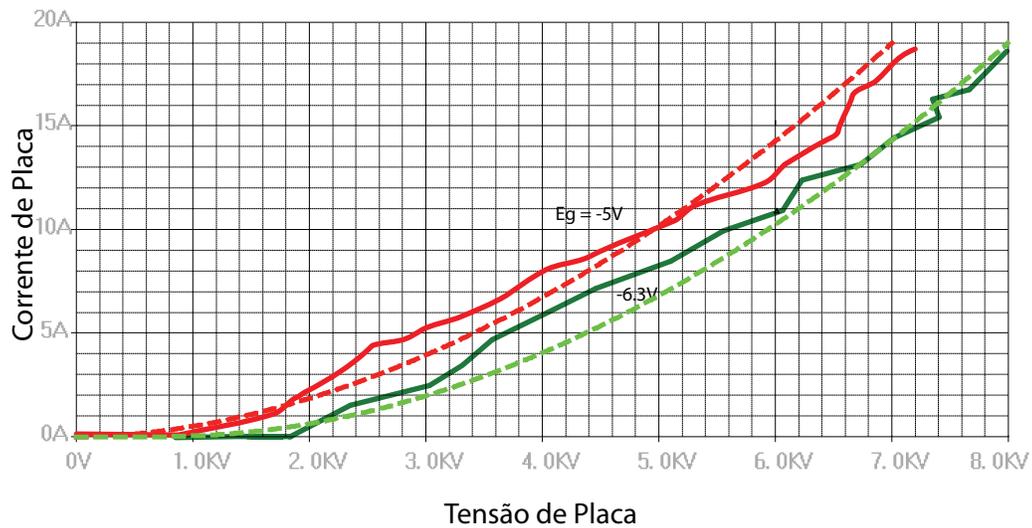


Figura 3.11: Comparativo das curvas característica, prática e experimental, de placa da válvula YD1160

3.3 Osciladores

Osciladores são circuitos que produzem um sinal alternado com uma determinada frequência, a partir de um sinal contínuo, ou seja, o oscilador não possui sinal de entrada, basta-lhe aplicar a tensão contínua de alimentação. Num sistema eletrônico, de um modo geral, é necessário dispor de um oscilador ou de um gerador de onda. A existência de uma fonte regular de oscilações é essencial em qualquer instrumento de medida de acontecimentos cíclicos, em qualquer instrumento que inicialize medidas ou processos e em qualquer instrumento que envolva fenômenos periódicos. Por exemplo, osciladores ou geradores de ondas são usados em multímetros digitais, osciloscópios, rádios, computadores e quase todos os periféricos de computadores. Não é um exagero afirmar que um circuito oscilador, de qualquer tipo, é um ingrediente tão fundamental quanto uma fonte de alimentação. As características requeridas a cada oscilador dependem do tipo de aplicação. Se esse oscilador é usado como fonte de pulsos regularmente espaçados, por exemplo como *clock* para um circuito digital, então o fator mais importante é uma rápida transição de um nível para outro (*slew rate*). Se esse oscilador é utilizado para gerar a base de tempo de um frequencímetro, então é importante que tenha uma boa estabilidade e precisão. A capacidade de ajuste da frequência de oscilação é, também, fundamental num oscilador local de um dispositivo transmissor ou receptor de dados. A capacidade de gerar formas de ondas precisas é essencial na construção de um amplificador

horizontal de um osciloscópio. O controle de amplitude, estabilidade da frequência de oscilação e uma baixa distorção são, também, parâmetros importantes nos geradores de ondas. Os geradores de ondas dividem-se em duas categorias: osciladores sintonizados (*tuned oscillators*) e osciladores de relaxação (*relaxation oscillators*).

3.3.1 Osciladores LC Sintonizados

Osciladores sintonizados usam os conceitos da teoria dos sistemas. É criado um par de pólos complexos conjugados exatamente colocados no eixo imaginário do plano complexo para garantir a instabilidade do circuito e a conseqüente oscilação.

Em poucas palavras um oscilador é um circuito eletromagnético que transforma CC em CA, através da conversão de energia elétrica em magnética. Contudo esta conversão só é possível se o circuito estiver ligado a um dispositivo eletrônico, sendo este dispositivo um transistor, ou um TEC, um bipolar, ou mesmo uma válvula [Mammana, 1977]. Quando juntos, estes realizam tal conversão. Um oscilador pode ser feito usando um estágio de amplificação simples e uma rede LC, ou seja com indutores e capacitores, para fornecer um deslocamento de fase de 180° entre entrada e saída. A frequência de oscilação é facilmente ajustada, ou sintonizada, pelo dimensionamento do indutor ou do capacitor. Os osciladores LC são usados em transmissões de rádio, receptores AM e FM e geradores de função. Os osciladores LC mais utilizados são o Clappe, o Hartley e o Colpitts.

O capacitor, em um tempo igual a zero, oferece uma impedância próxima á zero ohms, o que permite fluir uma grande intensidade de corrente elétrica através do qual vai diminuindo até que suas placas tenham cargas elétricas positivas e negativas como permite o tamanho do mesmo e a permissividade elétrica do isolante que tem entre as placas do capacitor. Num instante o capacitor funciona como um isolante, já que não pode permitir a passagem de corrente, e se cria um campo elétrico entre as duas placas, que cria a força necessária para manter armazenadas as cargas elétricas positivas e negativas, em suas respectivas placas. Por outra parte, num tempo igual a zero o indutor possui uma impedância quase infinita, que não permite o fluxo de corrente através dele, a medida que passa o tempo, a corrente começa a fluir, criando-se então um campo magnético proporcional a magnitude da mesma. Passado um tempo, o indutor atua praticamente como um condutor elétrico, pelo que a sua impedância tende a zero. Por estar o condensador e o indutor em paralelo, a energia

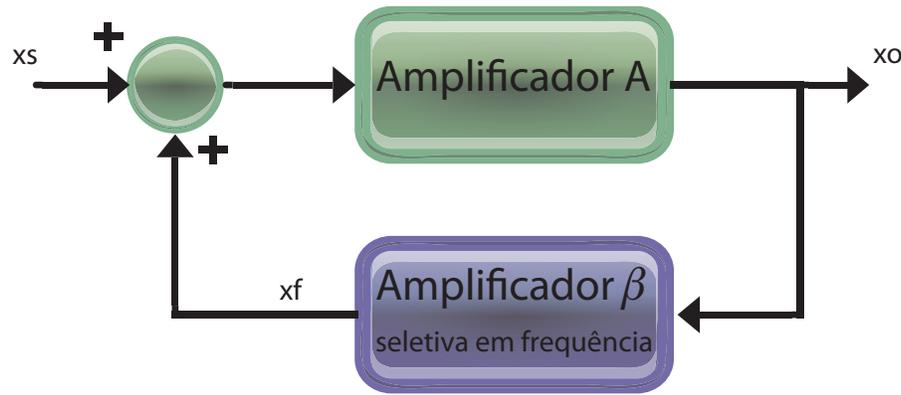


Figura 3.12: Estrutura básica de uma oscilador senoidal

armazenada pelo campo elétrico do capacitor (em formas de cargas eletrostáticas), é absorvida pelo indutor, que a armazena em seu campo magnético, porém a continuação, esta é absorvida e armazenada pelo capacitor, para novamente ser absorvida pelo indutor, e assim sucessivamente. Isto cria um vai e vem de corrente entre o capacitor e o indutor. Este vai e vem constitui uma oscilação eletromagnética, no qual o campo elétrico e o magnético são perpendiculares entre si, o que significa que nunca existem os dois ao mesmo tempo, já que quando está o campo elétrico no capacitor não existe campo magnético no indutor, e vice-versa. A característica deste tipo de circuito, também conhecido como circuito tanque LC, é que a velocidade com que flui e regressa a corrente desde o capacitor e o indutor ou vice-versa, se produz com uma frequência própria, denominada frequência de ressonância, que depende dos valores do capacitor e do indutor, e é dada por:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (3.7)$$

3.3.2 Critério de Oscilação

Um dos principais conceitos em eletrônica é o de realimentação. Em linhas gerais a realimentação consiste em um sinal de entrada que alimenta um dispositivo, um sinal de saída deste dispositivo pode ser utilizado na entrada de modo que a alimentação inicial pode ser retirada e o sistema ainda funcionará. Os osciladores empregam esta mesma metodologia, já que estes são amplificadores realimentados com ganho de pelo menos a unidade, posteriormente explicaremos melhor este conceito.

Os osciladores senoidais, também chamados de osciladores lineares de onda senoidal, apesar de levarem o nome de linear, apresentam alguma não-linearidade e esta é empregada para fornecer o controle da amplitude as senóide de saída. Na realidade, todos os osciladores são circuitos não-lineares.

A estrutura básica de um oscilador consiste em um amplificador e uma malha seletiva a frequências conectada em um elo de realimentação positiva. Como pode ser vista na figura 3.12. Para ajudar no entendimento é considerado um sinal de entrada. Desta forma o ganho com realimentação é dado por:

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 - A(s)\beta(s)} \quad (3.8)$$

Onde defini-se o ganho da malha com sendo

$$L(s) = A(s)\beta(s) \quad (3.9)$$

Logo a equação característica de ganho da malha é:

$$1 - L(s) = 0 \quad (3.10)$$

Que corresponde ao ganho real visto em torno da malha de realimentação da figura 3.12.

Pela análise da equação 3.8, se $A\beta$ for igual à unidade, para uma dada frequência f_0 , isso significa que, A_f será infinito, ou seja, nesta frequência o circuito terá uma saída finita com uma entrada de sinal zero. Tal circuito é, por definição um oscilador. Portanto, a condição para a malha de realimentação da figura 3.12 produzir uma oscilação linear senoidal de frequência ω_0 é que

$$L(j\omega_0) = A(j\omega_0)\beta(j\omega_0) \quad (3.11)$$

Ou seja, em ω_0 a fase do ganho da malha deve ser zero e a amplitude do ganho de malha deve ser unitária. Este é o critério de Barkhausen [Sedra & Smith, 2000]. Observe que, para o circuito oscilar em uma certa frequência, o critério de oscilação deve ser satisfeito apenas nessa frequência (ω_0); caso contrário a forma de onda será uma onda resultante não será uma senóide pura.

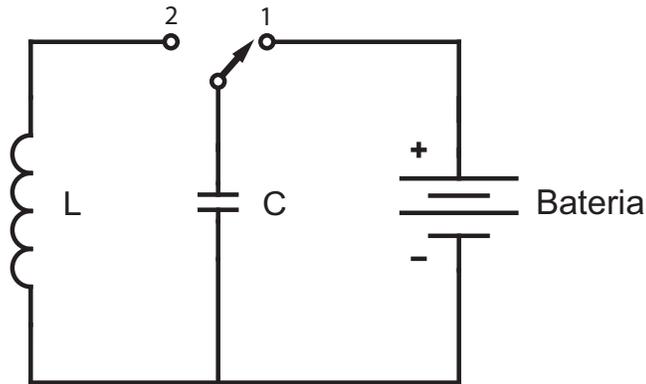


Figura 3.13: Circuito ressonante em paralelo - LC

Um outro método alternativo para estudar os circuitos osciladores consiste no exame dos pólos do circuito, que são as raízes da equação característica (equação 3.10). Para o circuito produzir e manter as oscilações na frequência ω_0 , a equação característica deve ter raízes em $\pm j\omega_0$. Portanto $1 - A(s)\beta(s)$ deve ser da forma $s^2 + \omega^2$.

Quando um circuito satisfaz o critério de oscilação, o determinante da equação nodal de tensão ou equação de malha de corrente será zero. E prevê uma sequência matemática conveniente para frequência de oscilação, se as equações algébricas necessárias podem ser solucionadas.

3.3.3 Oscilador Colpitts

As oscilações do circuito tanque nada mais são que a troca de energia entre os capacitores e o indutor, a velocidade de troca é o que determina a frequência de oscilação e está diretamente ligada aos valores de L e dos C's. Posteriormente será mostrado a expressão para o cálculo desta frequência. [Osc, 1961]

Para uma melhor compreensão do processo de oscilação vamos considerar um circuito formado por um indutor, um capacitor e uma simples chave de dois estágios, como mostrado na figura 3.13.

Primeiro mantendo a chave na posição 1, a bateria carregaria o capacitor, em seguida esta chave é posicionada na posição 2, ou seja, o capacitor é colocado em paralelo com o indutor, e então a energia acumulada nas placas do capacitor agora é aplicada nos terminais do indutor, uma corrente surge no circuito, à descarga do capacitor não é instantânea devido as reatâncias do indutor ([N. M. Borges, 2004]), logo esta descarga é nula no início e aumenta gradualmente, isso faz com

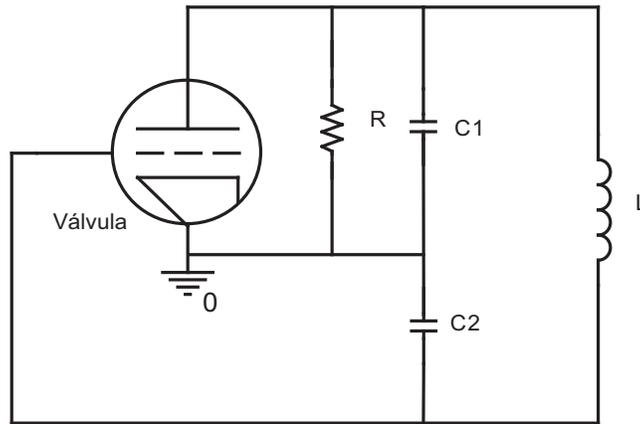


Figura 3.14: Configuração de um oscilador Colpitts catodo comum.

que surja nas bobinas do indutor um campo magnético, inicialmente fraco mas que se intensifica com o tempo. Ao mesmo tempo, devido a essa corrente de descarga do capacitor o campo elétrico entre placas diminui, até tornar-se zero. Em outras palavras a energia que inicialmente estava na forma de campo elétrico passa para a forma de campo magnético. A intensidade da corrente atinge seu valor máximo quando a tensão entre placas chega a zero. Nesse instante, toda a energia está contida no campo magnético. Com o capacitor descarregado a corrente do circuito deveria ser nula, contudo isso não ocorre pois, devido à existência de L, que procura manter o fluxo de corrente, o que é feito às custas da energia acumulada no campo magnético, que vai se contraindo gradualmente. Devido a este diminuição do fluxo de corrente, começam a se acumular elétrons nas placas do capacitor (carregamento do capacitor), só que na polaridade inversa. Quando todo o campo magnético é extinto, novamente as placas do capacitor estão carregadas, ou seja, a energia do campo magnético foi transformada em energia de campo elétrico. Este processo se repete indefinidas vezes fazendo com que a CC se torne uma CA. Na prática o interruptor mecânico pode ser substituído por dispositivo eletrônico.

Frequência de Ressonância

Se a frequência de operação for suficientemente baixa, a ponto de desprezar as capacitâncias do transistor, a frequência de oscilação será determinada pela frequência ressonante do circuito sintonizado paralelo (o circuito tanque).

Considerando o circuito da figura 3.14, através da análise de pequenos sinais, um oscilador

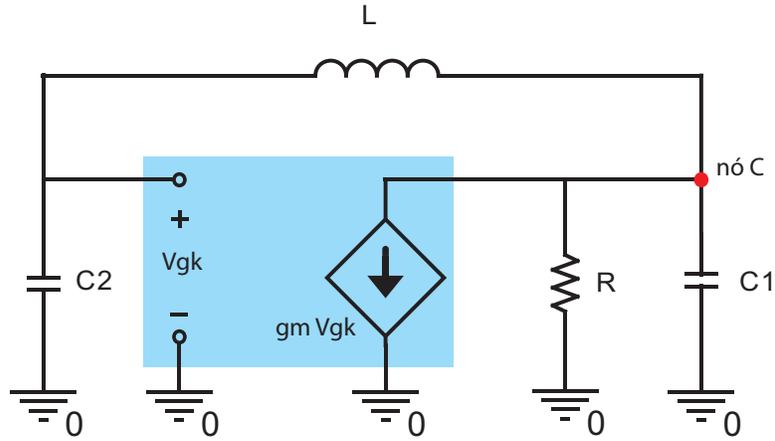


Figura 3.15: Circuito equivalente do oscilador Colpitts da figura 3.14

Colpitts com o circuito LC entre catodo e grade da válvula, ou seja oscilador Colpitts catodo comum, pode-se redesenha-la como mostrado na figura 3.14:

Baseado neste circuito a equação nodal para a corrente no nó C (placa da válvula), será

$$sC_2V_{gk} + gmV_{gk} + \left(\frac{1}{R} + sC_1\right) (s^2LC_2 + 1) V_{gk} = 0 \quad (3.12)$$

Como $V_{gk} \neq 0$, ela pode ser eliminada e a equação se reduz a:

$$s^3LC_1C_2 + s^2\frac{LC_2}{R} + s(C_1 + C_2) + \left(gm + \frac{1}{R}\right) = 0 \quad (3.13)$$

Onde $s = j\omega$, tem-se

$$j \left(\omega(C_1 + C_2) - \omega^3(LC_1C_2)\right) + \left(gm + \frac{1}{R} - \frac{\omega^2LC_2}{R}\right) \quad (3.14)$$

Para que as oscilações se iniciem, as partes real e imaginária devem ser zero, logo igualando a parte imaginária a zero, obtem-se a frequência de oscilação como sendo

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \left(\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\right)}} \quad (3.15)$$

Onde esta é a frequência de ressonância do circuito tanque para um oscilador tipo Colpitts. A análise foi realizada para um oscilador Colpitts catodo comum, que é análoga as outras configurações,

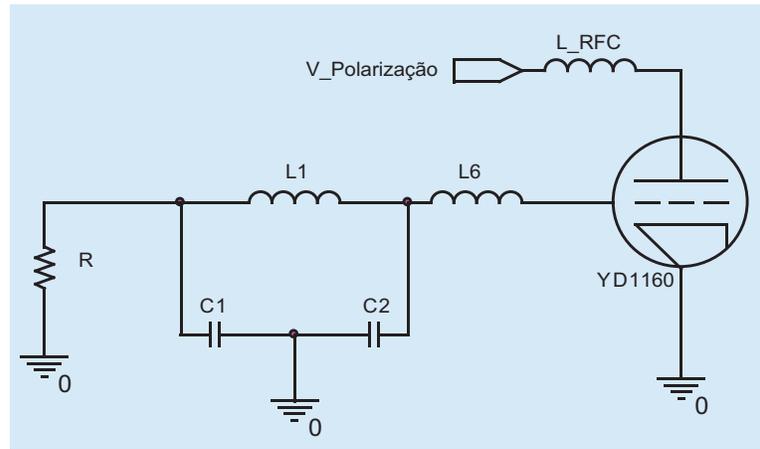


Figura 3.16: Oscilador Colpitts implementado na S12 KW-TV[®]

chegando a mesma frequência de oscilação [Mammana, 1977].

3.4 Oscilador em Rádio Frequência para Máquina de Solda de Polímeros

Será utilizando como base para análise de oscilador de um gerador componente de uma máquina de solda de polímero, o oscilador implementado na máquina S12 KW-TV[®] produzida pela empresa Politron[®] ([Pol,]). Trata-se de um oscilador Colpitts valvulado como mostrado na figura 3.16. Porém, detalhes da polarização não foram considerados para manter a atenção na estrutura do oscilador.

O circuito em questão, é regido por uma válvula do fabricante AMPEREX[®], sendo o modelo YD1160. Esta válvula possui uma capacitância parasita da placa para grade com um valor elevado, de forma que não pode-se desconsiderá-la na análise na frequência de oscilação. A função da resistência R é modelar as perdas no indutor [Sedra & Smith, 2000].

Introduzindo o circuito equivalente para válvula e assumindo que a reatância do choque RF é infinita e a reatância das capacitância entre placa e catodo e entre grade e catodo são zero, e considerando a função da resistência R, tem-se o circuito equivalente para análise de pequenos sinais para a figura 3.16 é mostrado na figura 3.17.

No circuito oscilador completo é importante frisar que, L_1 é a indutância do circuito tanque. Note

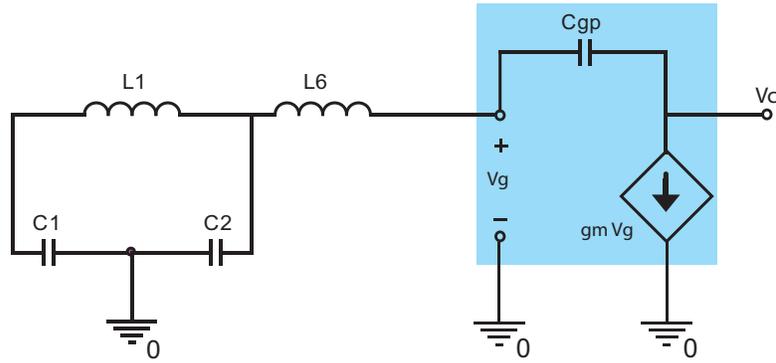


Figura 3.17: Circuito equivalente de pequenos sinais para o oscilador Colpitts

que L_1 está efetivamente em paralelo com a combinação série de C_1 e C_2 . O indutor choque de RF na entrada da placa, como mostrado na figura 3.18 previne contra dissipação de potência de RF para a fonte de polarização. O capacitor C_{gp} , ou seja a capacitância parasita entre placa e grade, faz o papel de realimentação do oscilador, porém por ser de uma valor de reatância considerável, é necessário uma reatância que anule o seu efeito na frequência de ressonância, para isso é incluído no circuito o indutor L_6 , que pode-se demonstrar este efeito através tensão na placa. Assim como demonstrado no item 3.3.3, é fácil mostra que para a figura 3.17 a tensão na placa da válvula é:

$$V_c = gmV_g \cdot \left(sL_6 + \frac{1}{sC_{gp}} + \left(\frac{s^2 L_1 C_1 + 1}{s^2 L_1 C_1 C_2 + (C_1 + C_2)} \right) \right) \quad (3.16)$$

De forma que a frequência de oscilação seja apenas resultante de L_1 , C_1 e C_2 , a capacitância parasita C_{gp} deve ter sua reatância na frequência de oscilação desejada anulada, por isso a inserção de L_6 .

$$sL_6 + \frac{1}{sC_{gp}} = 0 \quad (3.17)$$

Onde $s = j\omega$, tem-se

$$\omega L_6 = \frac{1}{\omega C_{gp}} \quad (3.18)$$

Fazendo com que a equação 3.17 seja verdadeira então, chega-se que a reatância resultante na placa é dada pela equação 3.19.

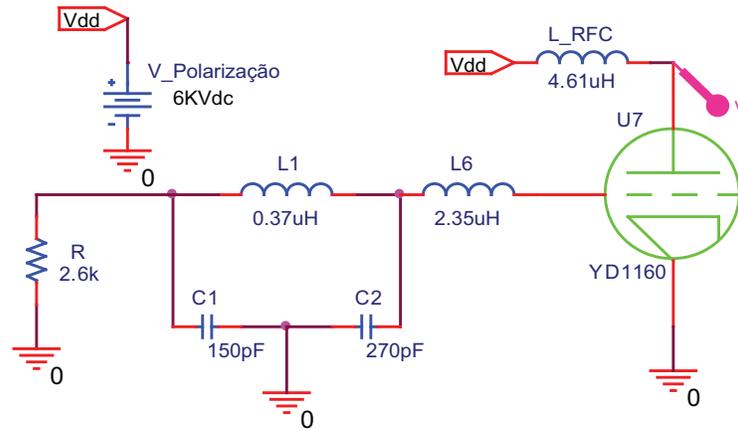


Figura 3.18: Oscilador Colpitts simulado no PSpice®

$$Z_c = \frac{s^2 L_1 C_1 + 1}{s^2 L_1 C_1 C_2 + (C_1 + C_2)} \quad (3.19)$$

Com a equação 3.19, vê-se que o oscilador em análise possui duas frequências de oscilação. Uma frequência de oscilação chamada de frequência de oscilação série, ω_s , e uma frequência que será a frequência de oscilação do oscilador devido ao critério de ganho[Mammana, 1977]. Assim, tem-se que a frequência de oscilação do oscilador será dado conforme a equação 3.15.

Para comprovar esta análise, os dados do oscilador utilizado na máquina S12 KW-TV® tomou-se como base. $L_1 = 0.37\mu H$, $C_1 = 150pF$, $C_2 = 270pF$, $L_6 = 2.35\mu H$, e com os valores das capacitância parasitas da válvula YD1160 obtidas pelo fabricante $C_{gp} = 14.5pF$. Com estes valores é fácil comprovar a aproximação da equação 3.18, e que para a equação 3.15 a frequência de ressonância é $f_0 = 26,64MHz$. Com isso utilizou-se o PSpice® para análise do comportamento do oscilador.

A figura 3.18 mostra o circuito implementado no simulador. A curva de saída do oscilador é uma quase senóide, como pode ser visto na figura 3.19, isto porque possui perturbações em frequências próximas a frequência de oscilação. Isto pode ser analisado pela figura 3.20, que é o mesmo sinal de saída analisado, porém no domínio da frequência. Nesta ainda pode-se verificar que a frequência de oscilação é 27.97MHz, isto deve-se ao fato de que no modelo utilizado para a válvula quando análise do oscilador Colpitts não foram consideradas todas as características desta, e que não se considerou a não linearidade da válvula na análise teórica.

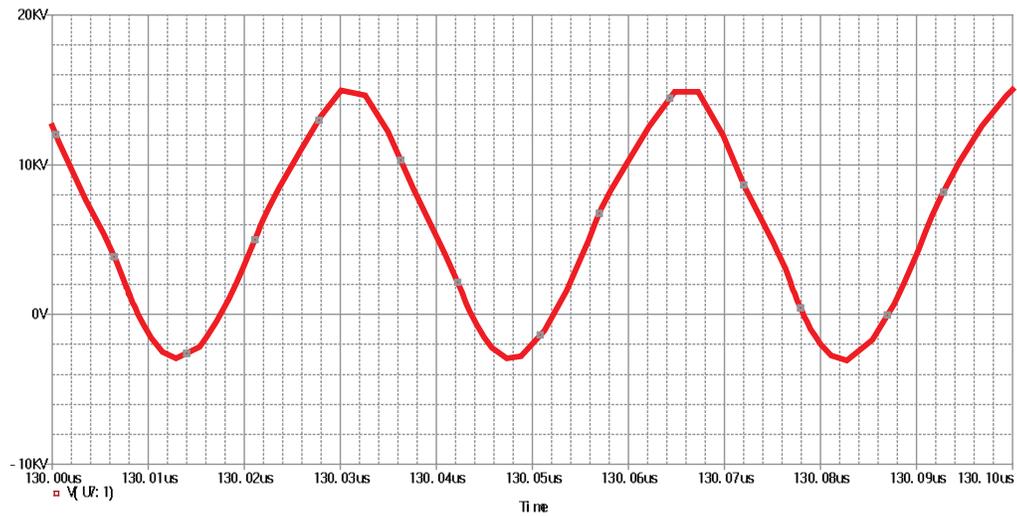


Figura 3.19: Sinal de saída do oscilador colpitts simulado no PSpice®

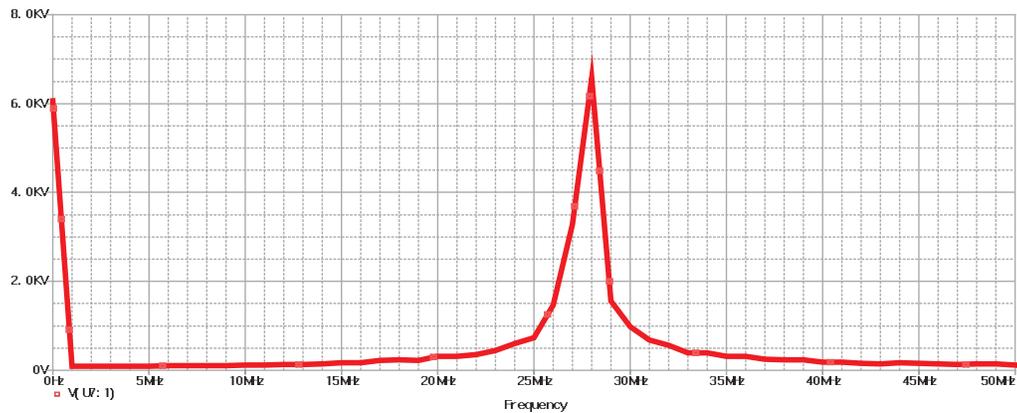


Figura 3.20: Sinal de saída do oscilador colpitts simulado no PSpice® no domínio da frequência

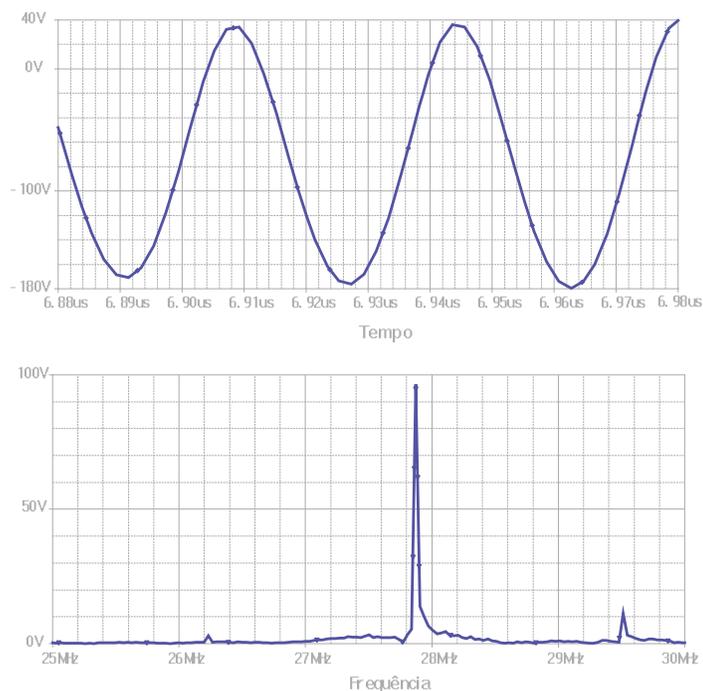


Figura 3.21: Sinal no circuito tanque do oscilador colpitts no PSpice® (a) domínio do tempo, (b) domínio da frequência

A figura 3.21 mostra o comportamento do circuito tanque. Observa-se uma senoide na frequência de 27.87MHz. Comparando com a onda resultante na placa da válvula, tem-se as frequências de oscilação próximas, o que mostra que o comportamento da capacitância parasita C_{gp} não teve grande influência na frequência devido a inclusão do indutor L_6 . Os componentes parasitários da válvula que não foram considerados para o modelo matemático, contudo, estes não fazem com que o modelo seja de baixa confiabilidade, e sim um modo aproximado para a análise do oscilador. É importante frisar que para o PSpice® o modelo da válvula é mais complexo do que o modelo apresentado na figura 3.17.

Capítulo 4

Cavidade Coaxial Ressonante

Tudo que existe, existe talvez
porque outra coisa existe. Nada é,
tudo coexiste: talvez assim seja
certo...

Fernando Pessoa

Os sistemas convencionais de soldagem por rádio frequência produzem um alto teor de harmônicos, devido a natureza deste [R.I.Neophytou & A.C.Metaxas, 1999]. A saída da energia do gerador de RF para a carga, é em campo aberto nas máquinas convencionais de solda por perdas dielétricas, havendo a radiação de energia, gerando interferência eletromagnética. De forma a minimizar estas interferências, empresas vem investindo em pesquisas. A forma encontrada é colocar antes do estágio de saída uma cavidade ressonante, para blindar a energia eletromagnética, e inseri-la de forma mais precisa na carga.

Estudou-se o caso específico de cavidade ressonante coaxial, a qual é implementada pela empresa Politron[®] na máquina S12 KW-TV[®] mostrado na figura 2.1 [Pol,]

4.1 Ressonância

O fenômeno da ressonância em uma cavidade ressonante, é fisicamente devido à reflexão das ondas coerentes viajantes, ocorrendo devido ao espaçamento crítico das superfícies. A ocorrência de

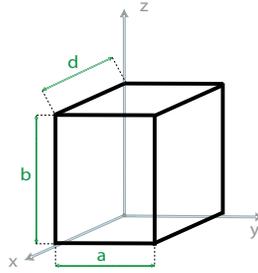


Figura 4.1: Cavidade de paredes retangulares

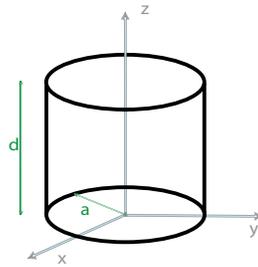


Figura 4.2: Cavidade de paredes circulares

ondas estacionárias, ou distribuições de campo estacionário, é comum a todos os ressonadores e é, de fato, o mecanismo no qual energia armazenada e transformação de tensão, corrente e impedância são realizadas em circuitos distribuídos

A distribuição de campo na maioria das cavidades, de forma qualitativa, tem alguma semelhança analítica com ondas estacionárias de ressoadores de linha de transmissão. Uma análise aprofundada do conceito do fenômeno da ressonância pode ser obtida a partir de análise de um diagrama vetorial da representação da onda incidente e refletida no ressonador em um comprimento de linha.

4.2 Introdução à Cavidade Ressonante

Cavidades ressonantes são dispositivos que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos. Cavidades ressonantes são constituídas, na maioria dos casos, quando um guia de ondas é limitado fechando-se as extremidades de um trecho finito do guia por paredes condutoras, são compartimentos metálicos fechados, comumente de forma cúbica ou cilíndrica como mostrado nas figuras 4.1 e 4.2, respectivamente, onde a energia eletromagnética é armazenada ou retirada através de sondas ou fendas devidamente posicionadas em suas paredes.

Nas condições que são construídas, um sistema de ondas estacionárias se forma na região limitada pelas superfícies condutoras, comporta-se como um circuito tanque, sendo assim, pode ser utilizada como filtro ou em circuitos osciladores. A diferença entre as cavidades e os circuitos ressonantes de alta frequência, que utilizam componentes como capacitores e indutores, está na capacidade de trabalhar com potências relativamente altas. O critério de ressonância resulta da condição de igualdade entre as energias médias armazenadas no campo elétrico e no campo magnético. Para uma dada cavidade ressonante existem modos de oscilação próprios que correspondem a determinados estados eletromagnéticos estacionários. A cada modo de oscilação próprio da cavidade é associada uma frequência de ressonância. As principais características de uma cavidade ressonante são a frequência de ressonância e o fator de qualidade. Uma cavidade possui várias frequências de ressonância, cada uma correspondendo a diferentes modos. Para obter a configuração dos campos dos diversos modos e suas frequências de ressonância, as equações de Maxwell devem ser resolvidas sujeitas às condições de contorno impostas. Mas em suma pode-se dizer que:

$$f_r = \frac{c}{\lambda_r \cdot \sqrt{\epsilon_r}}$$

onde:

$$\lambda_r = \frac{2 \cdot \pi}{k_r}$$

Onde k_r é denominado número de onda de ressonância, cuja a expressão depende da geometria da cavidade e do modo de excitação.

O fator de qualidade é definido como sendo o produto da energia máxima armazenada pela frequência angular de ressonância, dividido pela potência dissipada num ciclo, ou seja,

$$Q = \omega_r \cdot \frac{W_m}{P_d}$$

Onde W_m representa a energia armazenada máxima (no campo elétrico ou magnético); ω_r é a frequência angular de ressonância e P_d é a potência média dissipada [Jr., 1981]. A potência dissipada pode ser originária de perdas no dielétrico ou nas paredes condutoras da cavidade. O Q correspondente a cada tipo de perdas pode ser calculado separadamente. Representando por Q_c o

valor de Q quando se leva em consideração apenas as perdas no condutor e por Q_d o valor de Q referente às perdas no dielétrico, o Q efetivo da cavidade pode ser calculado segundo.

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}$$

O fator de qualidade é também uma medida de quão seletiva é a cavidade em relação às frequências do sinal de excitação. Para uma tensão de excitação fixa, a potência absorvida pela cavidade varia com a frequência do sinal de entrada segundo a *curva de ressonância*. O fator de qualidade pode então ser relacionado com a largura da faixa de passagem (ou rejeição) através de

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f}$$

onde Δf é a faixa de frequências cuja atenuação é igual a 3dB.

4.3 Cavidade Coaxial Ressonante

A geometria do condutor coaxial tem sido um tema de interesse em engenharia elétrica desde o advento do rádio e os fundamentos da engenharia rádio. A simplicidade desta geometria e os modos ressonantes a ela associados, tem atraído cientistas de voltar para o desenvolvimento de diferentes tecnologias e modelos analíticos utilizando a geometria coaxial. Quase todos estes têm sido desenvolvidas nas áreas de tecnologias de comunicação e têm utilizado de base a teoria clássica de linha de transmissão e dos respectivos modelos analíticos.[Sartori, 1999]

A simplicidade analítica da geometria do coaxial prevê uma estrutura ressonante distribuída e que tem modos que podem ser fisicamente interpretados e visualizados com elos para a análise qualitativa através da teoria de linha de transmissão, mas, como é freqüentemente o caso, a complexidade da análise do modelo da cavidade ressonante impede a interpretação física de suas propriedades.

O ressonador coaxial pode ser encarado como uma geometria de transição entre a linha de transmissão e a cavidade ressonante. Com uma boa síntese da teoria analítica do campo, modelos de linha de transmissão, modelo equivalente de circuitos concentrados, considerações analíticas de cavidades, uma compreensão mais ampla e completa de todas as estruturas pode ser adquirida.

4.3.1 Linha de transmissão Coaxial

Uma Linha de Transmissão (L.T.) é um dispositivo utilizado para guiar uma onda eletromagnética de um ponto a outro do espaço. Na prática, uma L.T. pode ser utilizada, por exemplo, para ligar um transceptor a uma antena, um conjunto de computadores em rede, uma difusora de sinais de TV aos seus assinantes ou, então, conectar os diversos componentes e circuitos de um sistema de alta frequência. Existem diversas geometrias de linha de transmissão em aplicações de alta frequência [Hayt & Jr, 2000]. Além de um circuito capaz de conduzir energia elétrica de um ponto ao outro, em alta frequência as L.T. atuam como elementos de circuito tais como indutores, capacitores, circuitos ressonantes, filtros, transformadores, isoladores.

Nesta seção serão estudadas as equações que descrevem o comportamento das LTs no modo principal. Uma estrutura simples capaz de propagar ondas TEM¹ é aquela constituída por dois planos condutores paralelos infinitos. Os planos são condutores perfeitos e o campo elétrico na região dielétrica entre os planos deve ser normal a eles. No modo TEM os campos elétricos e magnéticos são perpendiculares entre si e à direção de propagação de energia.

Coefficiente de Reflexão

O coeficiente de reflexão de um ponto na linha é dado pela relação entre a onda refletida e incidente no ponto.

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}}$$

Relacionando as tensões refletidas (V_{ref}) e incidentes (V_{inc}) na posição qualquer ao longo da linha, o coeficiente de reflexão resulta [Sartori, 1999] :

$$\Gamma(x) = \frac{(V_{carga} - Z_0 \cdot I_{carga})}{(V_{carga} + Z_0 \cdot I_{carga})} \cdot e^{-2\gamma x}$$

onde Z_0 é a impedância característica da linha, que para um linha coaxial é dada [Sartori, 1999]:

¹TEM(Onda Transversais Eletromagnéticas): Onda eletromagnética plana cujas amplitudes dos campos são constantes em todos os pontos de uma superfície de fase constante. [Freire & Diniz, 1973]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{b}{a}$$

Fazendo $Z_{carga} = V_{carga}/I_{carga}$ encontra-se:

$$\Gamma(x) = \frac{(Z_{carga} - Z_0)}{(Z_{carga} + Z_0)} \cdot e^{-2\gamma x}$$

Relação de onda Estacionária

A relação de onda estacionária é definida entre os valores máximos e mínimos de tensão ou corrente tomados em pontos adjacente [Kraus & Carver, 1973].

$$SWR = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|}$$

Sucedem-se ao longo da linha, máximos e mínimos, e entre dois máximos, ou mínimos adjacentes há uma distância de $\lambda/2$. As ondas de corrente se subtraem quando as ondas de tensão se adiconam, quando estas estão em fase. Este fenômeno ocorre porque a tensão está defasada em $\lambda/4$ da corrente.

A medida de SWR pode ser realizada experimentalmente por meio de uma pequena prova introduzida na região de campo elétrico em torno da linha. Essa é ligada a um detector de cristal que gera um corrente cuja a intensidade é proporcional ao campo elétrico relativo ou à tensão relativa na posição de prova [Freire & Diniz, 1973].

SWR pode ser também definida em termos do coeficiente de reflexão. Para isto

$$|V_{max}| SWR = |V_{inc}| + |V_{ref}|$$

$$|V_{min}| SWR = |V_{inc}| - |V_{ref}|$$

Logo:

$$SWR = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{|V_{inc}| + |V_{ref}|}{|V_{inc}| - |V_{ref}|} = \frac{1 + \frac{|V_{ref}|}{|V_{inc}|}}{1 - \frac{|V_{ref}|}{|V_{inc}|}}$$

Com isso,

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Observa-se que a relação de onda estacionária depende apenas do módulo do coeficiente de reflexão [Staelin et al., 1994].

Impedância ao longo da Linha de transmissão

A relação entre tensão e corrente em um ponto qualquer da carga, fornece a impedância naquele ponto [Balanis, 1989], como mostrado na equação 4.1 .

$$Z_x = \frac{V_x}{I_x} = Z_0 \cdot \frac{V_{inc} \cdot e^{-i\beta x} + V_{ref} \cdot e^{i\beta x}}{V_{inc} \cdot e^{-i\beta x} - V_{ref} \cdot e^{i\beta x}} \quad (4.1)$$

$$Z_x = Z_0 \cdot \frac{1 + \Gamma_{carga} \cdot e^{-2i\beta x}}{1 - \Gamma_{carga} \cdot e^{-2i\beta x}} \quad (4.2)$$

e que a Γ_{carga} é facilmente encontrada por:

$$\Gamma(x) = \frac{(Z_{carga} - Z_0)}{(Z_{carga} + Z_0)} \cdot e^{-2\gamma x}$$

logo para $x = 0$ temos Γ_{carga}

$$\Gamma_{carga} = \frac{(Z_{carga} - Z_0)}{(Z_{carga} + Z_0)}$$

Como mostrado por [King, 1965], substituindo Γ_{carga} na equação da impedância ao longo da linha dada por 4.4 tem-se:

$$Z_x = Z_0 \cdot \frac{Z_{carga} + i \cdot Z_0 \cdot tg(\beta \cdot x)}{Z_0 + i \cdot Z_{carga} \cdot tg(\beta \cdot x)} \quad (4.3)$$

A equação 4.3 relaciona a impedância da carga com a impedância que pode ser observada em qualquer ponto ao longo da linha.

Considerando que a na saída tem-se um curto circuito, ou seja a impedância da carga será zero,

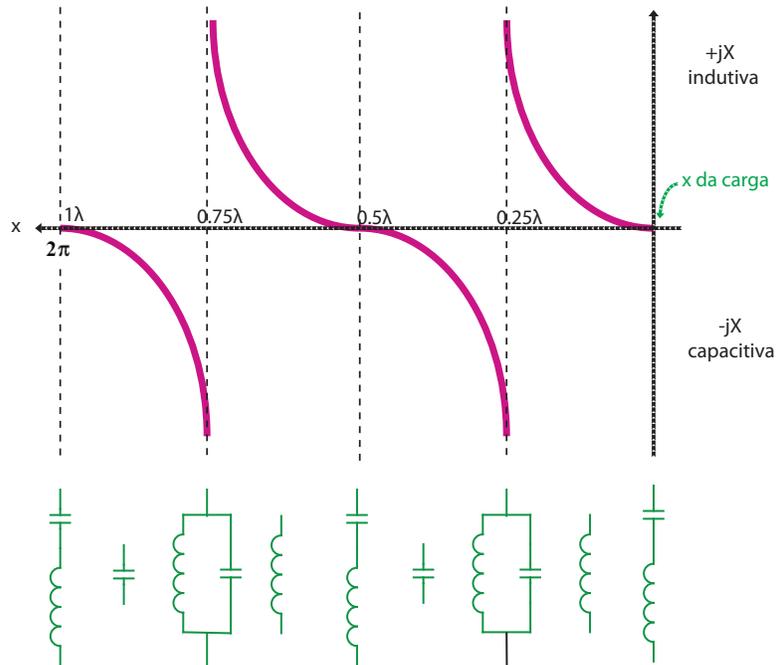


Figura 4.3: Comportamento da linha de transmissão em alta frequência em curto circuito com o circuito elétrico equivalente. [Silver, 1995]

encontra-se então:

$$Z_x = i \cdot Z_0 \cdot \operatorname{tg}(\beta \cdot x) \quad (4.4)$$

A figura 4.3 mostra o comportamento da impedância ao longo da linha de transmissão em termos de comprimento de onda (λ), para uma impedância de carga igual a zero. Dependendo de seu comprimento, poderá ter o desempenho de um circuito ressonante paralelo ou em série.

Circuitos concentrados

Os parâmetros como resistência, condutância, capacitância e indutância são distribuídos ao longo da linha, e não concentrados. Porém num trecho curto pode-se considerar concentrado e aplicar a teoria usual de circuitos, e então, deduzir o comportamento da linha em seu comprimento total [Cheng, 1992]

O modelo de circuitos concentrados para linha de transmissão é apresentado em muitos cursos de eletromagnetismo e é considerada uma das técnicas analíticas clássicas de engenharia

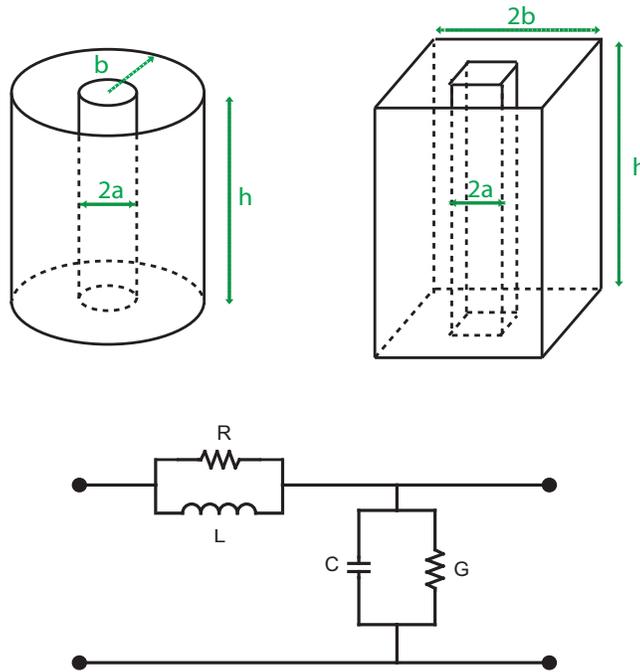


Figura 4.4: Linha coaxial com seu respectivo modelo de circuito concentrados

elétrica. As origens desta análise podem ser obtidas nos trabalhos de [Oliver Heaviside 1880] e em [Schelkunoff, 1935].

A técnica provê meios por quais circuitos distribuídos possam ser comparados com, e analisados como, circuitos concentrados e é uma análise crítica ligando sistemas ressonantes concentrados e distribuídos. A apresentação usual do modelo é focada no desenvolvimento das propriedades da transformação de impedância de linhas de transmissão de redes casadas e demonstra ou enfatiza o fenômeno da ressonância.

A figura 4.4 ilustra como um ressonador coaxial seria representado na teoria de circuito concentrado equivalente, e a tabela 4.1 a relação da dimensão do coaxial com os elementos do circuito concentrado.

| Parâmetros | Equação | Unidade |
|------------|--|------------|
| R | $\frac{R_s}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$ | Ω/m |
| L | $\frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{b}{a}$ | H/m |
| G | $\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma}{\ln \frac{b}{a}}$ | S/m |
| C | $\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{b}{a}}$ | F/m |

Tabela 4.1: Tabela de parâmetros distribuídos para um linha coaxial, onde $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}$. [Cheng, 1992]

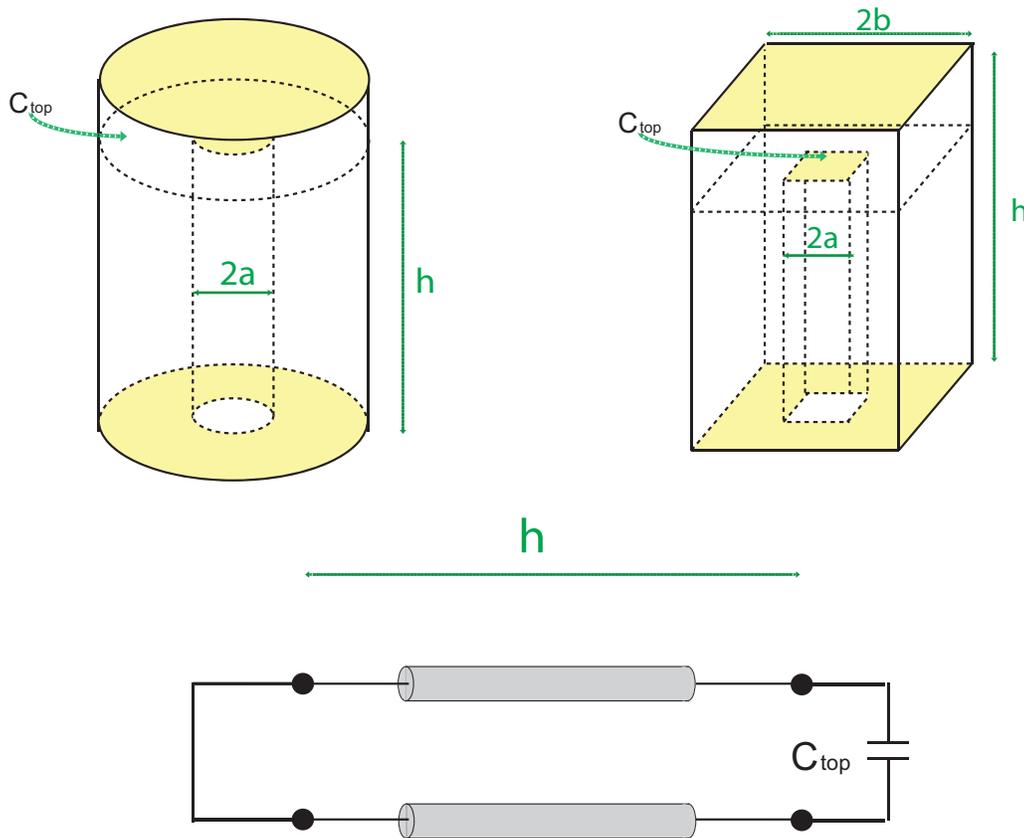


Figura 4.5: Cavidade ressonante coaxial com o modelo de parâmetros distribuídos

4.3.2 Projeto de uma Cavidade Ressonante coaxial

A transição da linha de transmissão ressonante para cavidade coaxial ressonante ocorre quando a entrada da linha é curto circuitada como mostrado na Figura 4.5 . Várias coisas se tornam aparentes com esta observação fundamental. A estrutura tem a natureza de um sistema completamente fechado, ou *hohlraum* como têm sido chamado ([Hansen, 1938]), como a geometria tradicional de uma cavidade exibindo propriedades de ambas, LT e cavidades. Este tipo de cavidade é uma importante ligação conceitual para o desenvolvimento de todas as classes de cavidade ressonantes para aplicação em sistemas de RF de potência.

Pode ser demonstrado que a otimização das dimensões de cavidades coaxiais podem ser desenvolvidas a partir de critérios de maximização do armazenamento da energia (Q) da cavidade relação de onda estacionária (SWR) da linha de transmissão. Os critérios para o desenvolvimento máximo de Q podem ser vistas na otimização do Q a partir das considerações de potência. O Q de

uma cavidade ressonante é definida na seção 4.2

4.3.3 Excitação e recepção de ondas em cavidades

Com relação a problemas de excitação e recepção de ondas em cavidades, um tratamento analítico rigoroso não é uma solução simples a ser realizada [Freire & Diniz, 1973]. Uma solução, de forma qualitativa, seria inicialmente um estudo das configurações de campo elétrico e magnético dentro da cavidade para o modo desejado, aplicando um dos seguintes métodos [Colinn, 1966]:

1. Colocação de provas na indicação do campo elétrico, nas posições de máximo de campo.
2. Colocação de uma laçada em um plano normal ao campo magnético e na posição de um máximo desse campo.

Existe outros métodos, porém estes apresentados são os mais comumente utilizados.

4.4 Cavidade Coaxial para Máquina de Solda de Polímeros

As cavidades ressonantes têm sido utilizadas em máquinas de solda de polímeros devido à necessidade de diminuir a interferência eletromagnética emitida pelas máquinas, ou seja, de forma a blindar o sistema. A cavidade é colocada após o oscilador, e sua frequência de ressonância é projetada na mesma frequência do oscilador de RF [Reynolds et al., 1970].

A modelagem de uma estrutura ressonante de alta frequência requer, inicialmente, o conhecimento de algumas figuras de mérito da estrutura, tais como frequência de ressonância e fator de qualidade do modo desejado. Além disso, o conhecimento da distribuição dos campos eletromagnéticos no interior da estrutura desempenha um papel importante no processo, visto que, qualquer modelo alternativo deve manter a distribuição de energia na região modelada. É uma técnica consagrada na literatura a modelagem de dispositivos ressonantes através de estruturas baseadas em linhas de transmissão e parâmetros distribuídos ou concentrados.

Este trabalho apresenta a modelagem de uma cavidade ressonante componente num sistema de solda de plástico por rádio frequência, e baseou-se no modelo utilizado pela empresa Politron[®]. A estrutura é constituída por três paralelepípedos constituído por ar com uma casca de 3mm de espessura

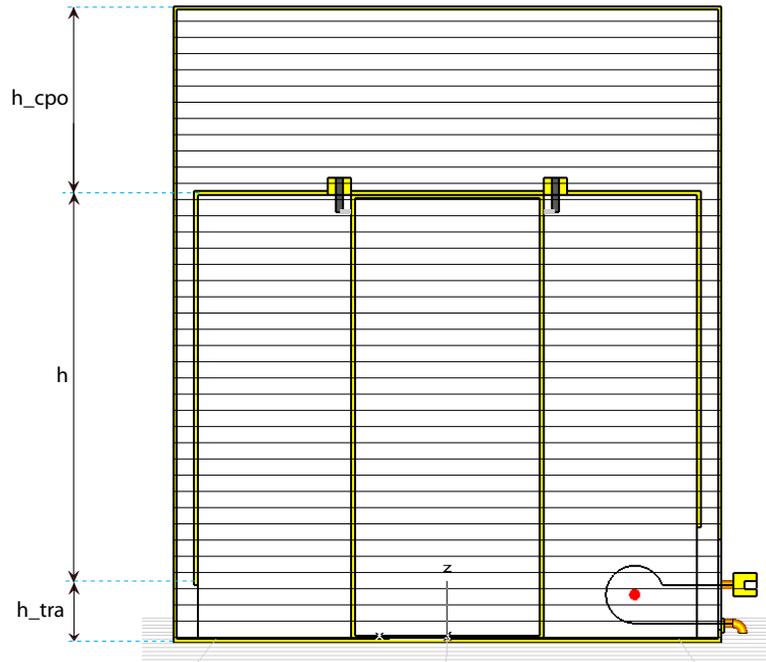


Figura 4.6: Estrutura da cavidade coaxial em corte lateral

de alumínio. Em corte superior têm-se três quadrados concêntricos de lados $a = 464mm$, $b = 438mm$, $c = 160mm$, e em corte lateral a altura do paralelepípedo interno é $h = 385mm$, o externo é a altura do interno mais $h_{cop} = 135mm$, e o entre o externo e interno tem a mesma altura do interno, porém há um corte neste de forma que este fique a uma altura de $h_{tra} = 50mm$ do zero dos outros paralelepípedos. Esta estrutura é apresentada em cortes nas figuras 4.6 e figura 4.7.

Esse modelo alimentou um simulador eletromagnético, *CST STUDIO SUITE™*, afim de analisar a frequência de ressonância e a distribuição dos campos elétricos e magnéticos na estrutura. Para isso utilizou-se da ferramenta de análise modal, tendo como resultado a frequência de ressonância da estrutura apresentada no modo TEM é 25.97MHz. Convém observar que na análise dos modos não são usadas fontes externas para excitar a cavidade, pois os modos dependem da geometria e são calculados pelo simulador utilizando o método de auto-valores, que compõe os métodos de simulação apresentados pelo simulador eletromagnético usado. Dois outros modos de simulação, porém que exigem a presença de um alimentador externo, são a simulação transiente no tempo e a simulação no domínio da frequência.

A figura 4.8a e 4.8b mostram a distribuição de campos elétrico e magnético respectivamente do

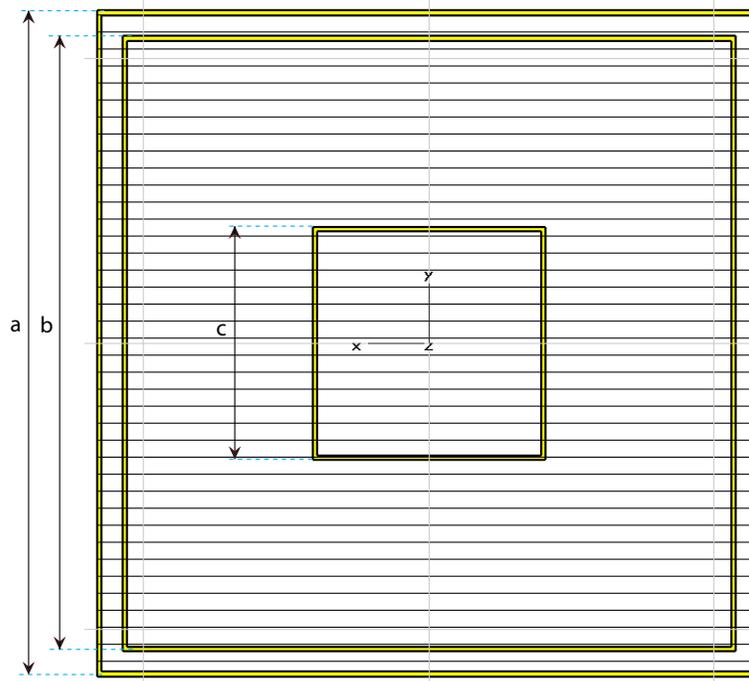


Figura 4.7: Estrutura da cavidade coaxial em corte superior

modo fundamental TEM, na frequência de ressonância calculada pela análise modal. Nas figuras geradas pelo simulador, quanto maior e quanto mais escuras as setas que representam a distribuição dos campos, mais intensos os mesmos são; a intensidade das setas está em escala logarítmica.

A figura 4.8a, é um corte no plano xy na estrutura apresentada, mostra que o campo elétrico é muito concentrado entre as placas **a** e **b**. Entre essas placas, o campo possui o máximo no centro destas e uma diminuição da intensidade até as bordas, chegando a zero. Como era esperado para o modo TEM, o campo elétrico é radial. É importante frisar o espalhamento do campo elétrico no topo da cavidade.

A figura 4.8b, é uma imagem no plano xy da estrutura da cavidade ressonante, mostra que a distribuição do campo magnético por análise modal, ou seja, comportamento que o campo deve ter quando submetido a uma excitação com um bom casamento. Ao contrário do campo elétrico, o campo magnético é concentrado entre as placas **b** e **c**. O campo magnético é circular, como era esperado para o modo TEM.

Em análise deste parâmetro h_{cop} , observou-se que com a diminuição desde, ou seja na altura do fechamento da cavidade, a frequência de ressonância sofre uma diminuição em sua magnitude.

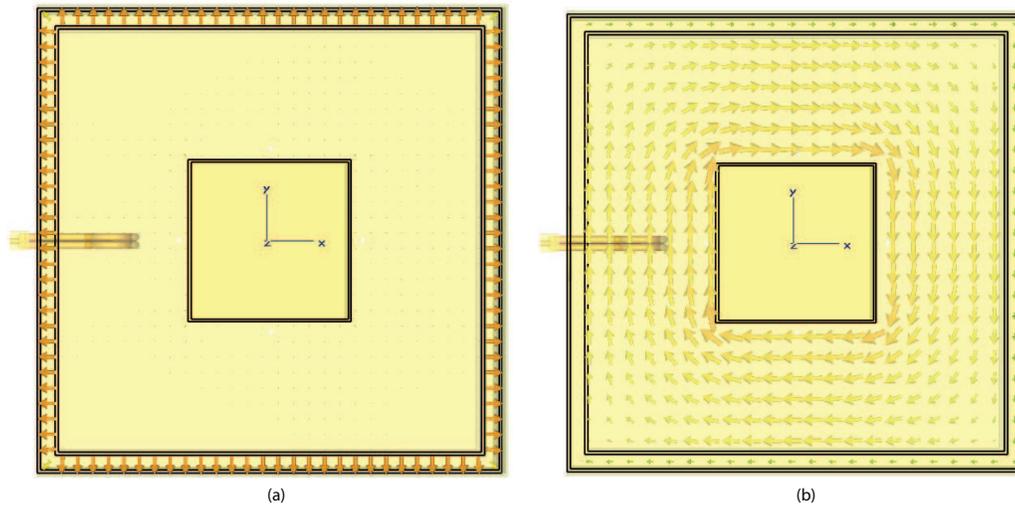


Figura 4.8: Distribuição dos campos para o modo TEM (a) Campo Elétrico, (b) Campo Magnético

Há duas condições necessárias para a excitação de um modo específico em um ressonador: a primeira é que a frequência do alimentador tem que ser maior que a frequência de corte do modo desejado e menor que a frequência de ressonância do próximo modo do mesmo tipo, para garantir operação monomodo; a segunda, é que o alimentador deve estar em uma posição que fisicamente favoreça o surgimento do campo a ser excitado. Para este último, por inspeção da distribuição do campo elétrico na estrutura por análise modal, fica evidente que, para excitá-lo, é necessário um condutor alinhado ao longo do eixo z . Devido a estrutura da cavidade, é necessário que esta deva ser excitada por 4 pontos, de forma que o campo seja distribuído conforme análise modal. Com base nisso, colocaram-se quatro pontas de excitação, posicionada a uma distância de 13mm do paralelepípedo interno e centralizado no eixo ortogonal, com uma penetração na cavidade de 30mm, tendo esta ponta de excitação um diâmetro de 6.5mm. O alimentador, bem como sua posição são mostrados na figura 4.9. Observa-se que a excitação é por campo elétrico, porém, convém explicar que a excitação dar-se-a por tensão, o que foi considerado na simulação da estrutura real.

É necessário obter um acoplamento forte entre alimentador e a cavidade, e em termos de parâmetros S , esta condição traduz-se da maneira ilustrada, para o caso particular do posicionamento das pontas na cavidade, na figura 4.10: uma forte oscilação em fase na frequência de ressonância, um baixíssimo nível de $S_{11}(j\omega)$, que implica em não haver reflexão de energia da cavidade para o alimentador. Com isso conclui-se que a estrutura de excitação da cavidade possui um forte

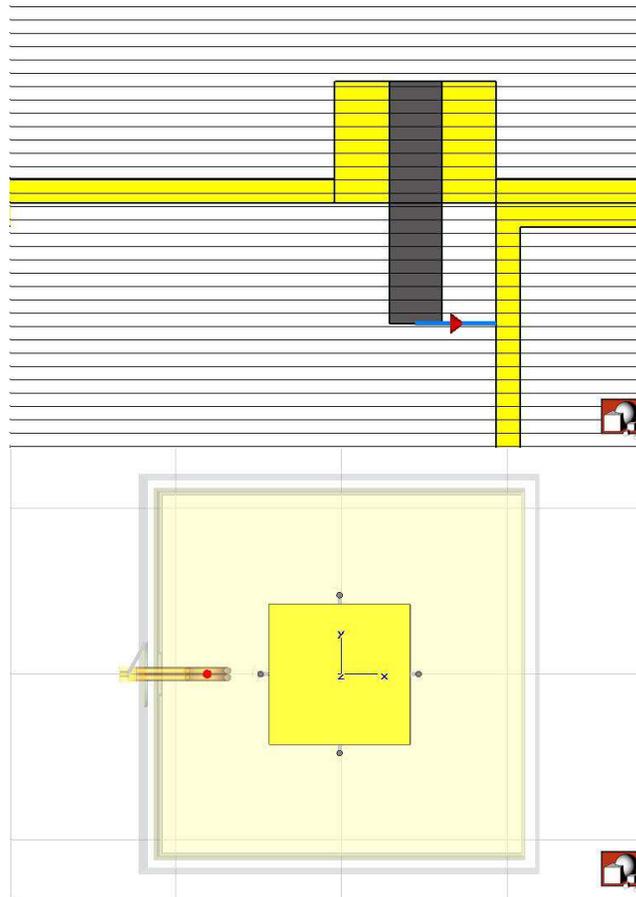


Figura 4.9: Pontas de excitação da cavidade (a) corte no eixo z para visualização da penetração de um alimentador na cavidade e a distância entre a placa central. (b) a distribuição dos quatro alimentadores

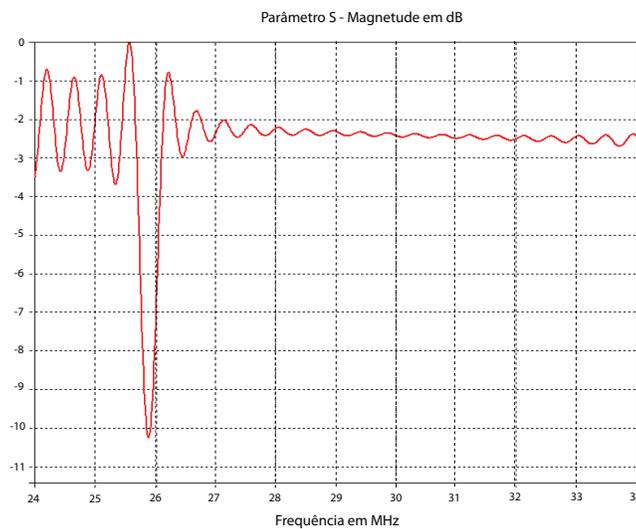


Figura 4.10: Resposta da perda de retorno para a estrutura de alimentadores na cavidade ressonante

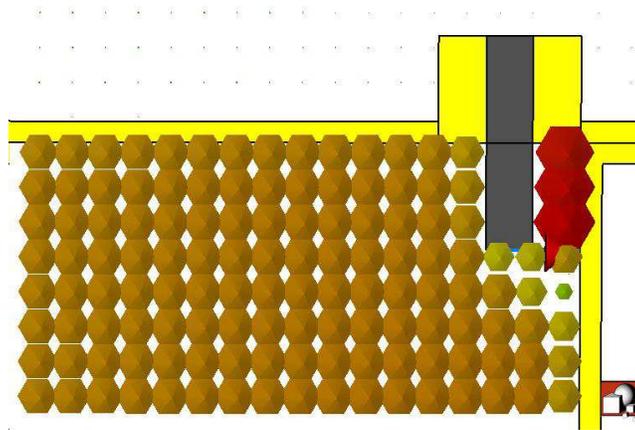


Figura 4.11: Distribuição do Campo Magnético na região de um dos alimentadores.

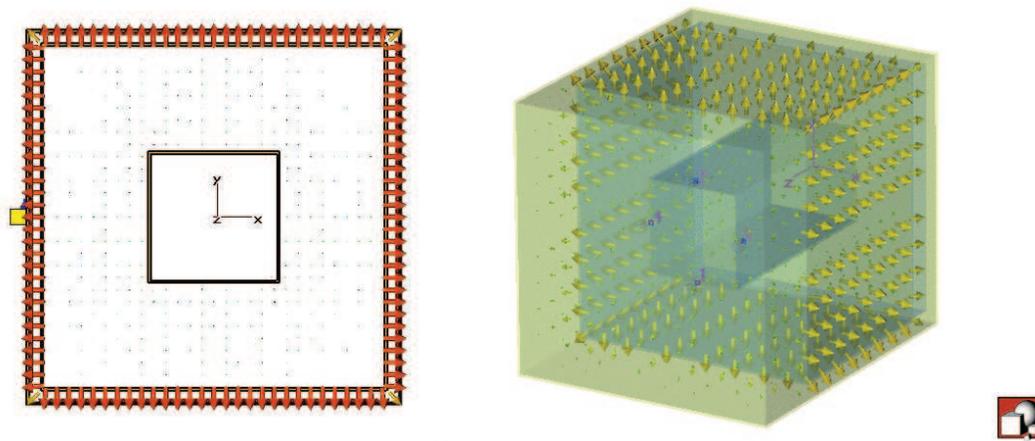


Figura 4.12: Distribuição do Campo Elétrico excitado na cavidade em 25.97MHz

acoplamento.

A distribuição dos campos elétricos e magnéticos excitados por este conjunto de alimentadores é mostrado nas figuras 4.12 e 4.13. Comparando estes com os campos gerados pela análise modal, observa-se que a distribuição dos campos muito próximas, existindo uma deformação nos campos nas regiões próximas aos alimentadores como mostrado na figura 4.11, quando analisados os campos excitados. Com isso conclui-se que, tem-se uma excitação eficiente para o modo analisado, quando utilizado o conjunto de alimentadores na configuração apresentada.

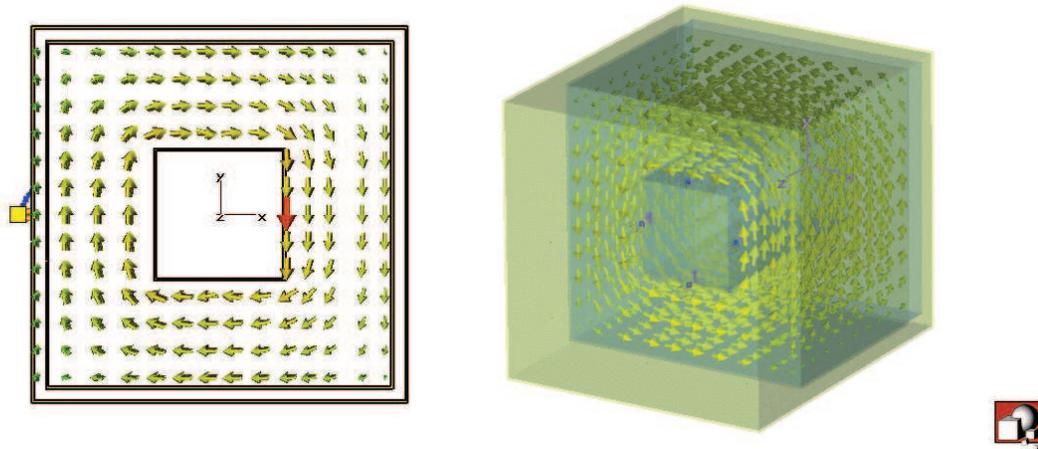


Figura 4.13: Distribuição do Campo Magnético excitado na cavidade em 25.97MHz

4.4.1 Cavidade Coaxial em modelos de parâmetros distribuídos e concentrados

Analisando a estrutura da cavidade ressonante através das figuras 4.6 e 4.7, observa-se que esta é constituída por duas linhas de transmissão coaxiais concêntricas, com a linha central curto-circuitada. Para a transição entre as linhas de transmissão é formando uma terceira linha coaxial. A linha de transmissão coaxial externa é ligada a duas placas paralelas que fazem o fechamento da cavidade ressonante. Esta duas placas paralelas, em parâmetros concentrados é representado por um capacitor. Então com esta análise pode-se concluir que para parâmetros distribuídos a cavidade ressonante é modelada como mostra a figura 4.14. Ou seja, a cavidade é então modelada por 3 linhas de transmissão coaxiais em série com carga zero, sendo que na entrada é considerada uma capacitância proveniente da estrutura de fechamento dela. A saída do sinal desta é retirada por um acoplador que é posicionado em um ponto ótimo na linha de transmissão interna, ou para parâmetros distribuídos, a terceira linha de transmissão, para a máxima energia magnética na cavidade. De forma a ter a máxima energia na carga, é necessário colocar o acoplador a normal ao campo magnético, ou seja no plano xz , ou yz . Porém este estudo não é parte deste trabalho. Utilizou-se o ponto de melhor acoplamento. E quando em análise de parâmetros distribuídos o acoplamento foi considerado perfeito.

Observa-se que esta cavidade foi construída desta forma, de forma a diminuir o espaço físico

utilizada por ela.

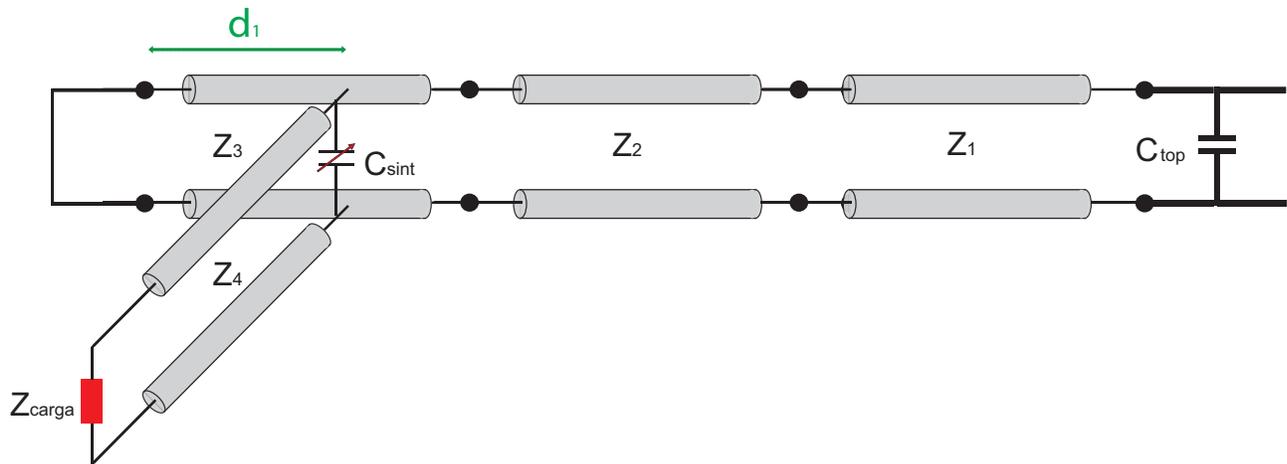


Figura 4.14: Modelo de parâmetros distribuídos para a cavidade ressonante coaxial

De forma a validar o modelo distribuído, implementou-se no simulador eletromagnético a estrutura mostrada na figura 4.15, e comparando os campos distribuídos do modelo físico real da cavidade com este modelo por linha de transmissão (campo elétrico e campo magnético respectivamente são mostrados na figura 4.16), mostra-se que as distribuições dos campos são tanto qualitativa ou quantitativa, são consideradas próximas o suficiente para validar o modelo. Haja visto que a frequência do modo TEM para os dois casos são diferentes, pois para o modelo de parâmetros distribuídos não considerou-se o capacitor C_{top} .

Para o modelo físico real da cavidade, analisou-se via simulação o comportamento da impedância de entrada da cavidade, esta é mostrada na figura 4.17. Observa-se uma descontinuidade na curva quando a frequência do sinal de excitação é 25.97 MHz.

Retornando ao modelo por linha de transmissão, ou modelo de parâmetros distribuídos, de forma a validar o modelo com a figura 4.17, calculou-se a frequência de ressonância para a figura 4.14, desconsiderando o estágio de saída. Utilizando o cálculo de impedância ao longo de uma linha de transmissão, e obtendo a impedância de entrada da linha de transmissão.

Cada linha de transmissão tem sua impedância característica, que é fornecida por

$$Z_0 = 138 \log \left(\frac{a}{b} \right) \quad (4.5)$$

onde **a** é a dimensão do lado do condutor externo e **b** é a dimensão do lado do condutor interno.

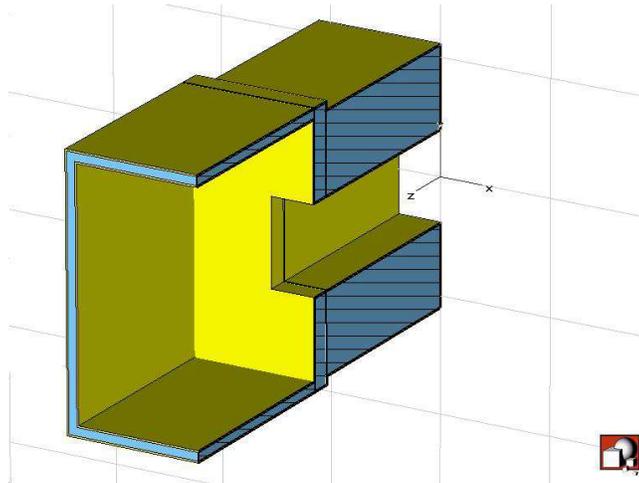


Figura 4.15: Modelo físico para o modelo de parâmetros distribuídos da cavidade ressonante

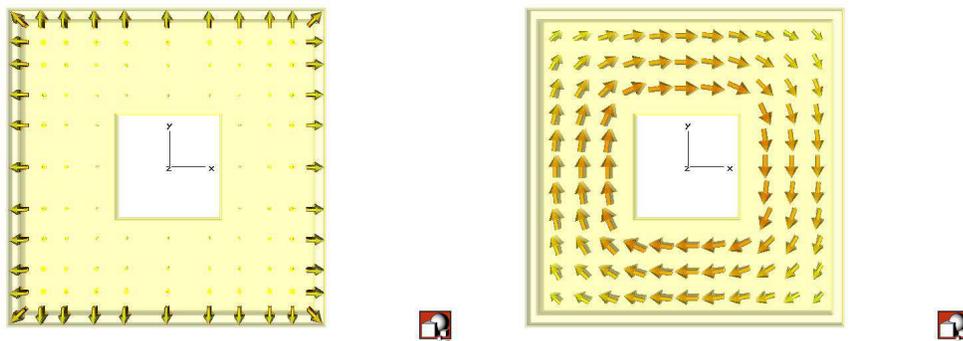


Figura 4.16: Distribuição dos campos elétricos e magnéticos para o modelo físico do modelo de parâmetros distribuídos da cavidade ressonante

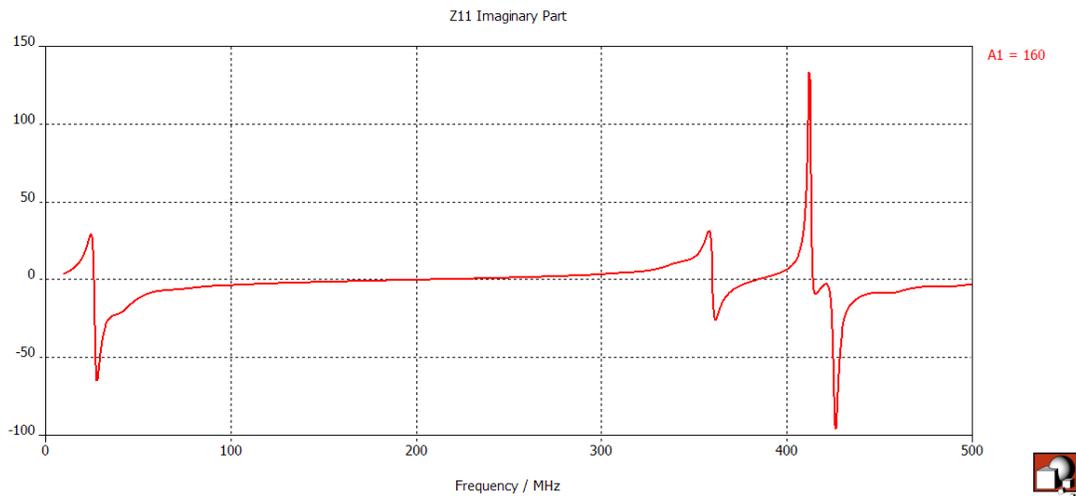


Figura 4.17: Comportamento da impedância de entrada da cavidade ressonante

Considerando a terceira linha em curto, a impedância de carga é zero, com isso tem-se que para este trecho o comportamento da impedância na frequência ao final desta linha será dado por :

$$Z_3 = iZ_0^3 \operatorname{tg} \left(2\pi f \left(\frac{h}{c} \right) \right) \quad (4.6)$$

Z_3 será a impedância de carga para a próxima linha, que terá o comportamento da impedância descrita conforme:

$$Z_2 = Z_0^2 \cdot \frac{Z_3 + i \cdot Z_0^2 \cdot (2\pi f (\frac{h_{tra}}{c}))}{Z_0^2 + i \cdot Z_3 \cdot \operatorname{tg}(2\pi f (\frac{h_{tra}}{c}))} \quad (4.7)$$

Com a mesma análise, pode-se chegar finalmente, incluindo a terceira linha de transmissão, ao comportamento da impedância de entrada em relação a frequência.

$$Z_{in} = Z_0^1 \cdot \frac{Z_2 + i \cdot Z_0^1 \cdot (2\pi f (\frac{h}{c}))}{Z_0^1 + i \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg}(2\pi f (\frac{h}{c}))} \quad (4.8)$$

O comportamento da equação 4.8 é mostrado na figura 4.18. Um circuito ressonante paralelo como mostrado na figura 4.3 é obtido na frequência de 27.5 MHz (figura 4.19). Esta frequência é superior a obtida pelo simulador, como mostrado na figura 4.17, pois ainda não está sendo considerado a capacitância formada pela tampa da cavidade. Porém o comportamento é qualitativamente idêntico, o que mais uma vez pode-se considerar um modelo de parâmetros distribuído para o modelo físico da

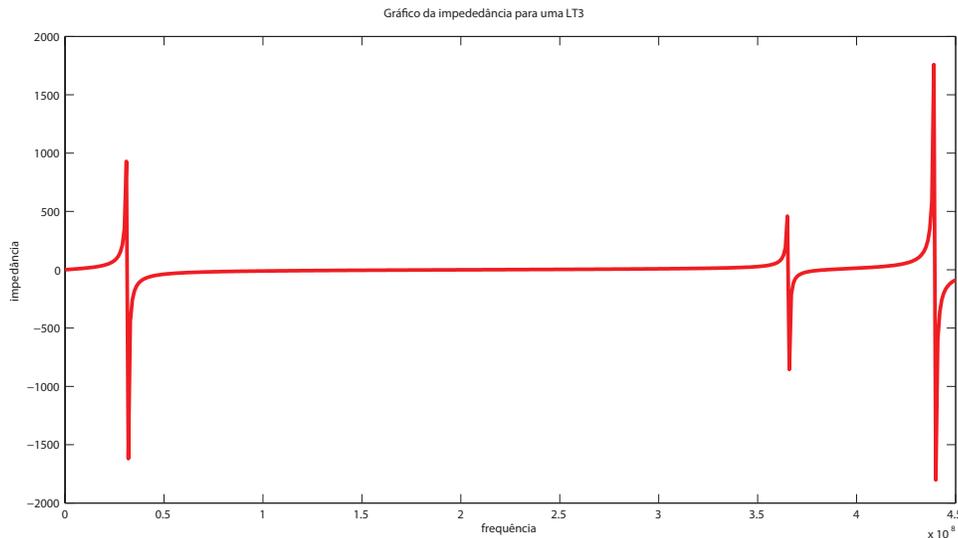


Figura 4.18: Comportamento da impedância de entrada para o modelo distribuído

cavidade em análise.

Com o objetivo de modelar a cavidade em parâmetros concentrados, parte-se da equação 4.8 que rege o comportamento da impedância de entrada para o modelo de parâmetros distribuídos, conforme mencionado no item 4.3.1, quando há uma descontinuidade na curva, o circuito comporta-se como um circuito LC em paralelo. Então, na frequência de ressonância da cavidade, pode-se considerá-la para parâmetros concentrados como sendo um circuito com um indutor e um capacitor em paralelo.

De forma a obter um circuito de parâmetros concentrados, ou seja um circuito ressonante LC em paralelo, considera-se a impedância desse circuito que é dada por $\frac{i\omega L}{1-\omega^2 LC}$ sendo que a frequência de ressonância em um circuito LC em paralelo é dado por $\frac{1}{\sqrt{LC}}$. Assume-se que para a frequência de ressonância (ω_0) a impedância do circuito tanque LC seja a mesma que para a equação 4.8 (Z_{in}). É importante comentar que em ω_0 na curva obtida pela equação 4.8, tem-se um pólo, e a técnica utilizada aqui é para retirar este pólo, e então com o valor da constante encontrada obtêm-se a relação entre L e C na impedância de entrada. Com isso chega-se a conclusão que:

$$L = Z_{in} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{i\omega_0} \quad (4.9)$$

Fazendo $\omega \rightarrow \omega_0$ na equação 4.9, remove-se a singularidade e obtêm-se o valor de L, que

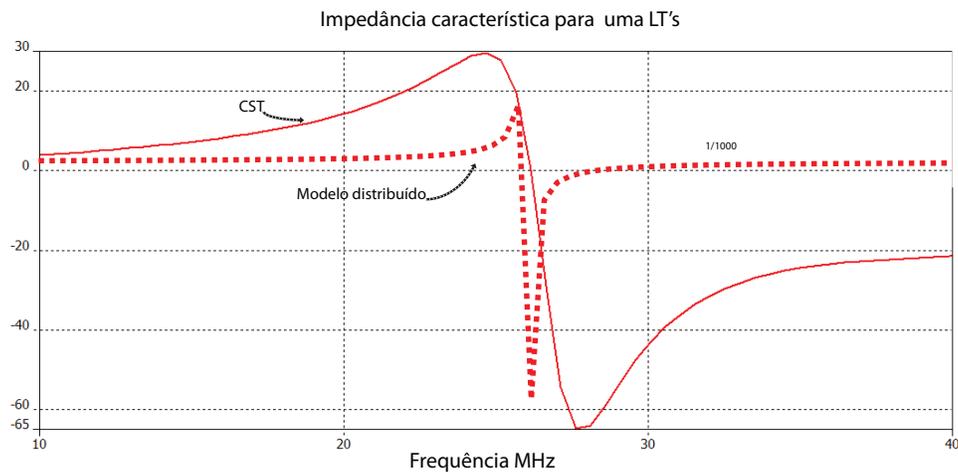


Figura 4.19: Comportamento da impedância de entrada em relação a frequência, $f_0 = 27.5\text{MHz}$

para o caso estudado será de 196.82nH , e pela definição de ω_0 tem-se o valor da capacitância $C = 166.33\text{pF}$. Tem-se então o circuito de parâmetros concentrados para o modelo distribuído de 3 linhas de transmissão em série.

De forma a finalizar o modelo de parâmetros concentrados para a cavidade, ainda falta o capacitor formado pela estrutura de fechamento da cavidade. Partindo do princípio de capacitores de placas paralelas tem-se que:

$$C_{top} = \frac{\epsilon \cdot \text{Área da placa}}{\text{distância entre placas}} \quad (4.10)$$

Logo será $C_{top} = 12.56\text{pF}$. Fazendo esta capacitância em paralelo com o circuito LC obtido para o modelo de parâmetros distribuídos, o circuito de parâmetro concentrados é obtido para a cavidade ressonante coaxial utilizada pela Politron[®] na frequência de ressonância de 26.81MHz , que comparado com o modelo real simulado possui uma pequena margem de erro que é ocasionado pelas perdas nas paredes de alumínio da cavidade. Observa-se que com a inclusão desta capacitância houve uma diminuição na magnitude da frequência de ressonância, e pode-se concluir que aumentando esta capacitância pode-se diminuir a frequência de ressonância, sendo válido o inverso.

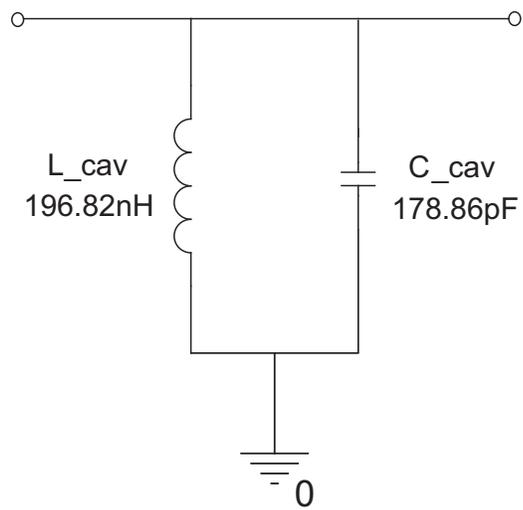


Figura 4.20: Modelo de parâmetros concentrado para uma cavidade ressonante coaxial

Capítulo 5

Processo de Rádio Frequência de Potência Teórico e Experimental

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

O primeiro indivíduo na literatura a perceber que os Sistemas Ressonantes de RF poderiam ser proveitosos nos processos (ou transformação) de larga energia elétrica para aplicações de engenharia foi Nikola Tesla [Staff, 1970]. Ele primeiro desenvolveu o *distributed helical resonator* exatamente com o significado de gerar altas voltagens e o resultado foram descargas espetaculares pelas quais ele é famoso, ele completou vastos testes empíricos e a otimização desta estrutura durante o ano 1890 e propôs uma variedade de possíveis aplicações incluindo transmissão sem fio de energia e o conceito de energia dirigida a armas.

O dispositivo *Tesla Colorado springs*, desenvolvido por Tesla, é um dos primeiros equipamentos a introduzir a cavidade ressonante num circuito de RF. Quando examinado como um modelo de sistema para processamento de energia quatro processos básicos podem ser observados. A conversão

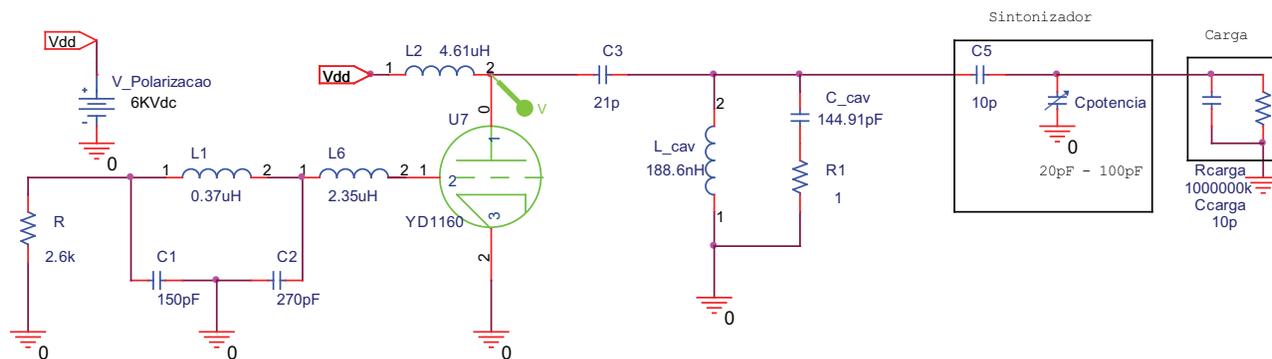


Figura 5.1: Circuito do gerador de um máquina de solda por RF

da energia de 60 Hz para RF; a transformação por modulação de pulso por picos de alta potência e a variação do fator de trabalho (oscilador) ; a entrada do sistema de acoplamento; e a saída acoplada com a carga. Estes blocos de componentes podem ser implementados por técnicas RF padrão em uma variedade de caminhos dependendo da magnitude da energia a ser processada e da eficiência desejada.

Tendo estes como princípio, pode-se analisar o gerador de RF da máquina S12 KWTV[®] da Politron[®]. Tendo em vista que até agora fez-se os modelos dos componentes relevantes em caráter individual, necessita-se para finalizar o trabalho e realmente constatar que os modelos até aqui apresentados condizem com a realidade, apresenta-se nesta seção a unificação dos modelos, mostrando os resultados obtidos, tanto teórico quanto experimental.

5.1 Sistema de Solda por RF

Uma variedade de projetos de osciladores de potência foi desenvolvida para diferentes aplicações na indústria e tornaram-se parte de muitos padrões de texto na eletrônica valvulada.

No oscilador, o circuito na grade atua com um oscilador principal para conduzir a o circuito tanque para a placa da válvula, A placa é sintonizada para uma desprezível diferença de frequência ao sinal na grade, para suprir a impedância capacitiva proveniente da capacitância parasita entre placa e grade, que é consideravelmente grande, de forma a atender o critério de Barkhausen [Sedra & Smith, 2000].

O arranjo geral deste oscilador de potência é mostrado na figura 5.1. A configuração coloca

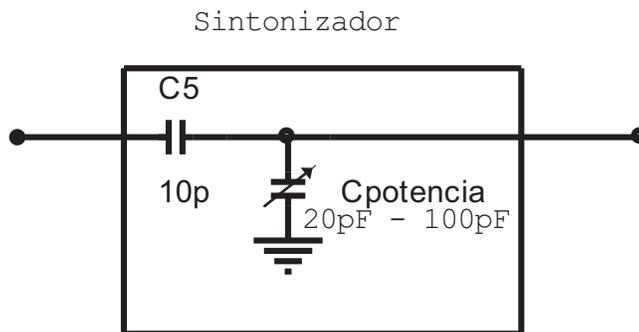


Figura 5.2: Circuito Sintonizador para uma máquina de solda por RF

um oscilador principal na grade da válvula, e por causa disso, a ineficiência na dupla sintonia, E para que isso não aconteça, como demonstrado no capítulo 3, foi colocado um indutor de forma que a capacitância parasita entre placa e grade não traga ressonância e não desenvolva oscilações parasitas. Esta configuração evita a divisão da linha espectral e a limitação da eficiência do circuito em dupla sintoniana placa, e permite acoplamento fechado para ser utilizado na eficiente transferência de energia para o ressonador. O uso de uma cavidade é vantajoso na minimização das perdas do circuito gerador de uma máquina de solda por RF, isto porque, o sinal elétrico proveniente do oscilador valvulado é confinado na cavidade ressonante, e transformado em sinal eletromagnético. Se a frequência de oscilação do oscilador não estivesse na faixa de operação da cavidade, não haverá acoplamento entre eles. Observa-se que na figura que mostra o arranjo do gerador, a existência do capacitor C_3 é para eliminar níveis DC na entrada da Cavidade. Para este modelo está sendo considerado o acoplamento perfeito entre oscilador-cavidade e cavidade-carga. Partes deste gerador não serão analisados neste capítulo, pois foram tratados nos capítulos anteriores.

O material a ser soldado é considerado um circuito capacitivo [Nichols, 2003], ou seja, tem-se uma carga capacitiva. O valor desta capacitância muda com o material a ser soldado, a espessura e a área deste material. Quanto maior esta capacitância, maior deverá ser a energia a ser entregue para a soldagem seja realizada com qualidade. Como existe a possibilidade de soldar diversos materiais, ou seja diferentes capacitâncias, há a necessidade da inclusão de um circuito sintonizador, pois a impedância vista pela saída da cavidade deverá ser muito maior que a impedância da própria cavidade, de forma que a impedância dita neste como impedância de carga não influencie significativamente na frequência de operação do gerador. Com isto é colocado o circuito mostrado na figura 5.2, este

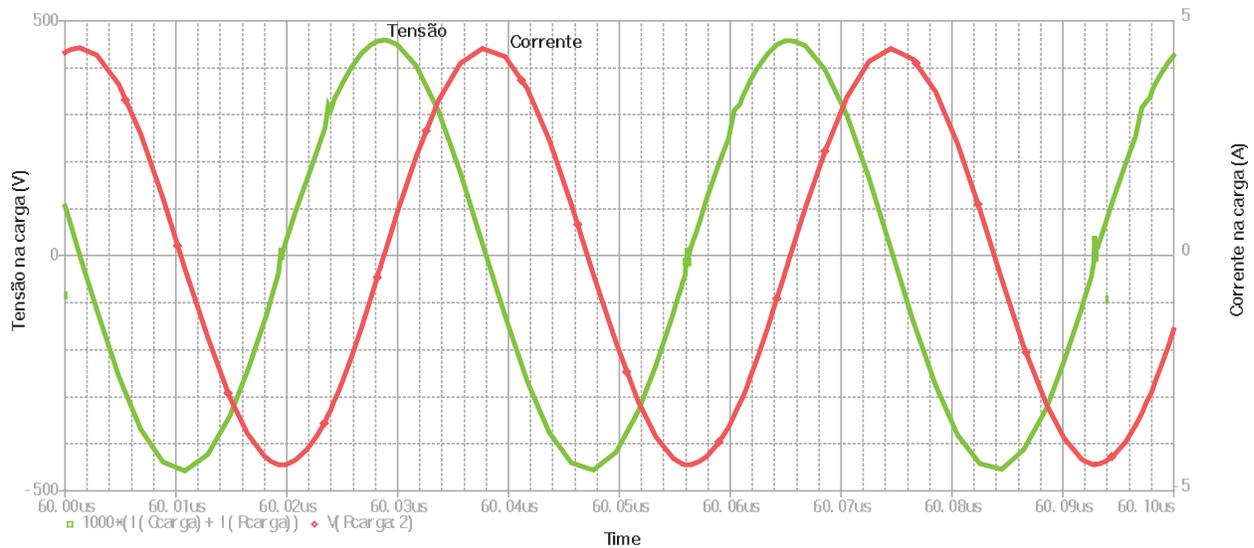


Figura 5.3: Tensão e corrente na carga menor carga possível a ser soldada

é chamando de circuito sintonizador. Observa-se que a reatância mínima a ser visto pela cavidade será de 100 vezes a reatância capacitiva da própria cavidade, isto devido ao capacitor C_5 . Mesmo com a variação da carga, a potência entregue pela cavidade será sempre a mesma, porque possui um capacitância variável, que tem o mesmo intervalo das possíveis cargas, fazendo com que a impedância vista pela cavidade seja a mesma. Tem-se o controle da potência fornecida a carga, este proveniente do $C_{potencia}$ que é um capacitor variável. Quando tem-se a carga máxima, a capacitância de sintonização terá seu valor mínimo, passando o máximo de energia para a carga; a energia será mínima na carga quando a capacitância de sintonização for máxima. Com isso pode-se concluir que a potência entregue pela cavidade será sempre a mesma impedância vista pela cavidade será a mesma para qualquer carga.

A figura 5.3 mostra o comportamento da tensão e corrente na carga, ou seja no substrato a ser soldado. Tem-se para este caso, a menor carga possível. A tensão na carga é fixa em 500V de pico, e corrente em 0.82A. Porém para potência máxima na carga, tem-se tensão de pico 500V e corrente 4.29A de pico, como mostrado na figura 5.4. A potência entregue pela cavidade é de 2.5kVA.

Tem-se então o modelo circuital para uma máquina de solda de polímeros por rádio frequência, apresentado na figura 5.1. Seu comportamento é coerente com os resultados esperados de operação de tal processo.

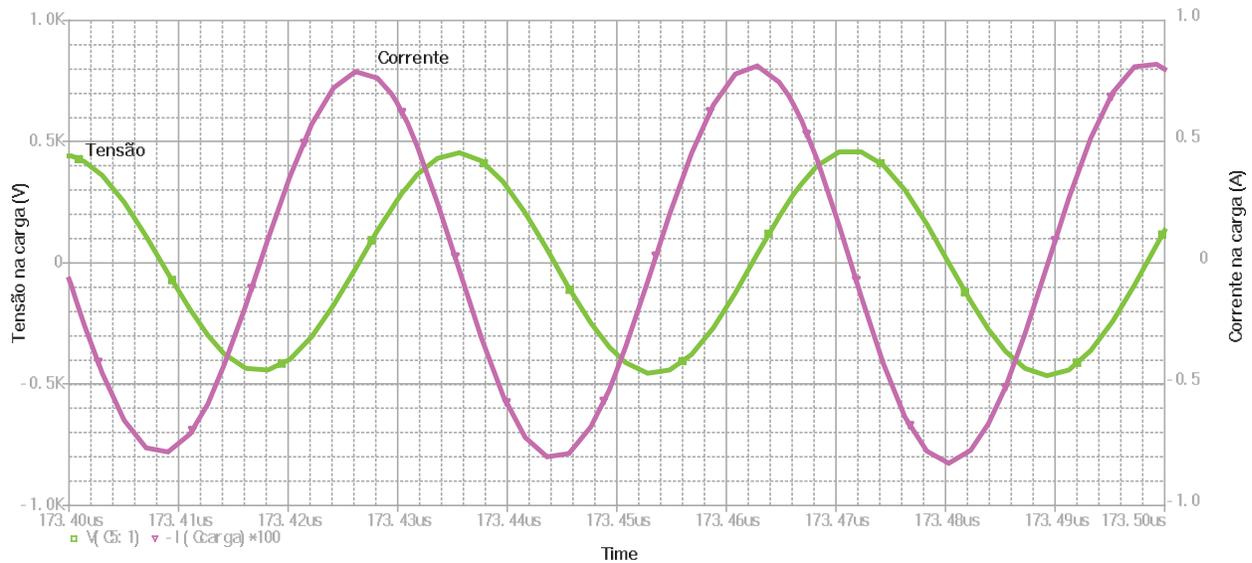


Figura 5.4: Tensão e corrente na carga maior carga possível a ser soldada

5.2 Resultados Experimentais do Sistema de Solda de RF

Visando a validação dos modelos teóricos e conclusões obtidas a partir destes, foi realizada uma bateria de testes no equipamento S12 KW-TV[®], onde foram escolhidos alguns pontos chave, e nestes foram feitas medidas do campo magnético irradiado.

As medições utilizando sistema de potência sempre são cercadas de cuidados e precauções, pois acidentes envolvendo estes sistemas são muito perigosos e pode causar sérios riscos a saúde dos experimentadores.

Pensando nisso, e sempre levando em conta a segurança como premissa básica, utilizou-se a técnica de medição indireta, pois esta é a que traria a melhor reposta, com certa margem de segurança durante suas realizações.

Foi utilizada uma bobina como sonda, onde em suas extremidades foi conectado um osciloscópio a através da tensão induzida na bobina, podemos mapear o campo magnético e os parâmetros de interesse, principalmente a forma da tensão e a frequência.

Na figura 5.5, vê-se o aparato utilizado nas medidas. Para estas medidas foi utilizado um osciloscópio da marca *Agilent Technologies* modelo DSO3202A, a sonda utilizada foi uma espira com 5 voltas e meia com diâmetro interno de 22.9mm feita com fio rígido de 4mm, como mostrado

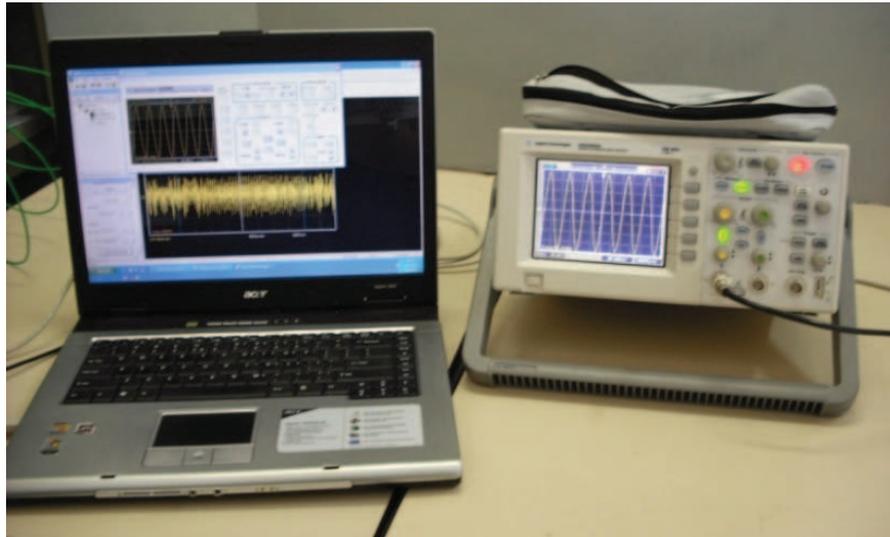


Figura 5.5: Sistema de aquisição de dados utilizado.

na figura 5.6.

De modo a simular a variação de carga e observar sua influência na frequência foram utilizadas quatro cargas, esta variação ocorreu devido à potência requerida no momento da solda depender na área a ser soldada, foram utilizadas as ferramentas de soldagem cujas áreas podem ser observadas na tabela 5.1, pode-se ver fotos destas na figura 5.7.

| Ferramenta | Geometria | Área (cm^2) |
|---------------|--|-----------------|
| Grande | Disco com diâmetro de 15cm | 176.7 |
| Intermediário | Anel com diâmetro externo de 13.6cm e diâmetro interno de 5cm | 125.6 |
| Médio | Anel com diâmetro externo de 13.6cm e diâmetro interno de 8.25cm | 91.8 |
| Pequeno | Retângulo 12.4cm por 17.9 cm e espessura de 0.32cm | 23.7 |

Tabela 5.1: Nomenclatura, geometria e área das ferramentas de soldagem utilizadas durante os ensaios.

5.2.1 Medidas de segurança adotadas

Além de utilização das medidas por sonda, foram feitos dois escudos de chapa de ferro a fim de proteger tanto os equipamentos com as pessoas envolvidas durante o experimento. Ver figura 5.8.

Os escudos foram feitos com chapa 16 (espessura de aproximadamente 2mm), cada chapa possuem 1.2m de altura por 1.5m de comprimento, nas suas extremidades foram feitas duas dobras formando um ângulo de 30° no tamanho de 0.3m, em seguida estas foram cobertas por uma camada de tinta a fim de protegê-las contra corrosão e umidade e em seguida foram conectadas por um cabo



Figura 5.6: Sonda utilizada para as medições.

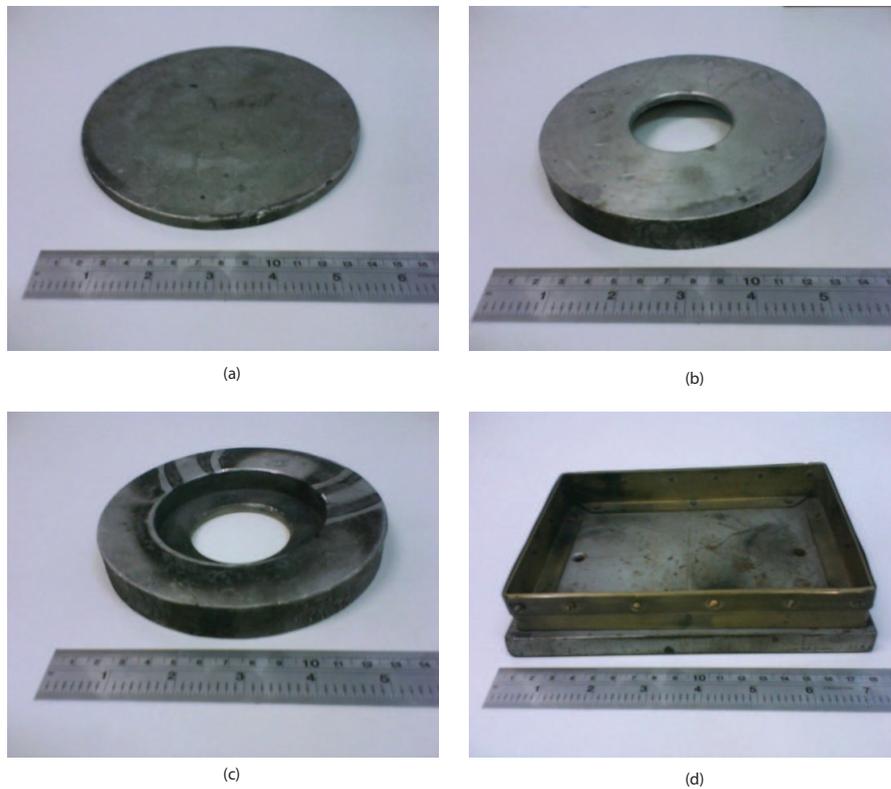


Figura 5.7: Ferramentas utilizadas durante as medidas. (a) grande, (b) intermediária, (c) média e (d) pequena.



Figura 5.8: Foto a máquina de solda S12 KW-TV[®], do lado esquerdo pode-se observar o escudo feito para proteção.

ao sistema de aterramento da do prédio. O critério adotado na escolha da chapa foi definido quando observado que esta espessura atendia prontamente o critério de profundidade pelicular (que para uma chapa de ferro na frequência de 30MHz é de $\delta = 3\mu m$) e pelo fato desta chapa não necessitar de uma estrutura de suporte, como pode ser visto na figura 5.8, as chapas se sustentam somente pela sua geometria.

5.2.2 Pontos de medição

Para as medições foram escolhidos alguns pontos estratégicos, tais como:

1. Saída da cavidade, entrada do capacitor variável;
2. Linha de transmissão da cavidade até a mesa de soldagem;
3. Na ferramenta de solda;
4. No indutor L1 do circuito Colpitts;
5. No indutor L6;



Figura 5.9: Saída da cavidade, entrada do capacitor de placas paralelas.

6. Na válvula;

7. Ao lado da mesa de solda utilizando o *Dip Meter*.

Foram escolhidos estes pontos, pois são de fácil acesso, são pontos seguros quanto a descargas e são pontos onde temos resultados das simulações e podem ser conflitados.

O primeiro ponto a ser analisado foi logo após a saída da cavidade. Ver figura 5.9. Neste ponto foi colocada a sonda paralela a linha que segue até o capacitor variável. Observa-se na figura 5.10, o sinal coletado pela sonda na posição indicada pela Figura 5.9, sem carga, a chamada medida a seco pelos técnicos. Pode-se notar que na figura 5.10, temos a leitura da frequência de 25.77MHz.

Na figura 5.11 - (a), (b) e (c), pode-se ver o comportamento do sinal quando vamos colocando carga, ou melhor, conforme extraímos potência da cavidade de acordo com a área a ser soldada, vê-se respectivamente as áreas grande, média e pequena.

Observa-se que as figura 5.11 - (a) e (b) estão na mesma escala de 20V/div. e a figura 5.11 - (c) está na escala de 5V/div., vê-se que a potência depende diretamente da área a ser soldada, áreas menores potência menor, área maior requerem uma maior potência. Uma vez que a tensão na mesa de soldagem é constante (aproximadamente 500V), observa-se que a corrente diminui sua magnitude, por isso é que se vê uma redução do sinal detectado pela sonda quando comparamos as figura 5.11 - (a), (b) e (c).

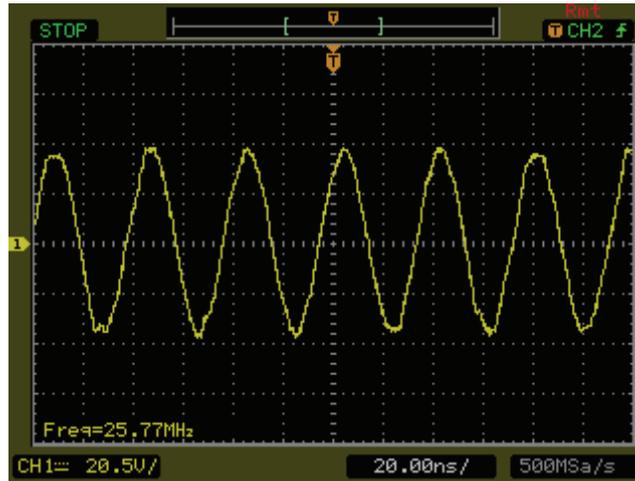


Figura 5.10: Sinal coletado pela sonda na posição indicada pela Figura 5.9

Todas as leituras de frequência indicam uma pequena variação, porém estas estão variando entorno dos 26MHz.

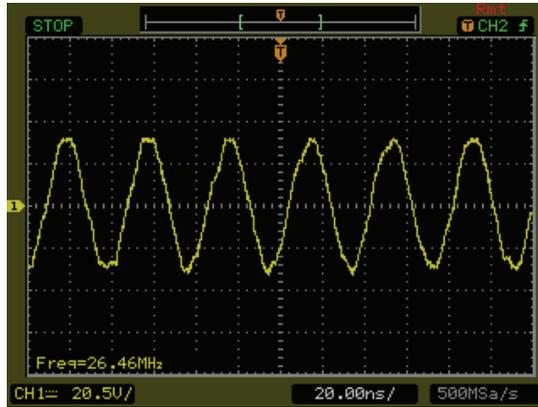
Passando a sonda da alimentação do capacitor para linha de transmissão (LT) que liga a saída da cavidade para a carga. Veja figura 5.12.

Na figura 5.13, vê-se as medidas da radiação emitida na região da linha de transmissão. Na figura 5.13 - (a), temos o sinal para uma região de soldagem grande, seguida figura 5.13 - (b) pela área de solda média e por fim a figura 5.13- (c) área de solda pequena. Observa-se que as figura 5.13 - (a) e (b) estão na mesma escala de 10V/div. e a figura 5.13 - (c) está na escala de 5V/div.. Todas as leituras de frequência indicam uma pequena variação, más centrada em 26MHz.

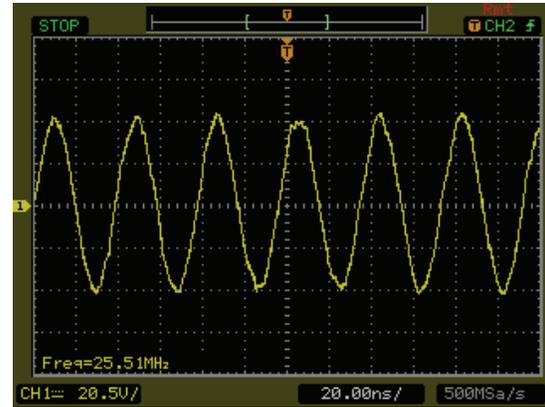
Para avaliar a direção do campo magnético e a influência de outras fontes giramos em 90° a posição da sonda, como se pode ver na figura 5.14.

Com a rotação da sonda observou-se que ocorre um grande aumento na magnitude da tensão induzida na sonda. Ver figura 5.15. Logo se conclui que o campo está alinhado com a linha de transmissão girando ao seu redor, similarmente ao campo magnético que envolve de um fio. Nas figura 5.15 - (a), (b) e (c) todos os sinais estão na mesma escala de 50V/div. Mais uma vez vê-se que a frequência de operação do sistema permanece variando entorno dos 26MHz.

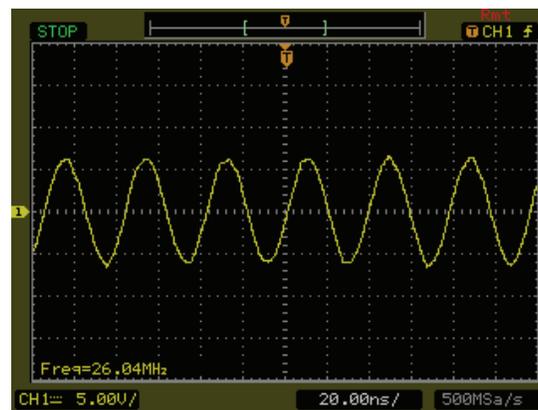
Na figura 5.16, vê-se a sonda alinhada com a carga, onde a carga é composta pelo conjunto: material a ser soldado mais o tipo de ferramenta a ser usada na soldagem. Nas figura 5.17, (a), (b) e (c) podemos ver os sinais para as diferentes áreas de solda.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.11: Sinal coletado pela sonda na posição indicada pela figura 5.9, para diferentes cargas: (a) para uma região de solda grande, (b) solda média e (c) para uma região de solda pequena.

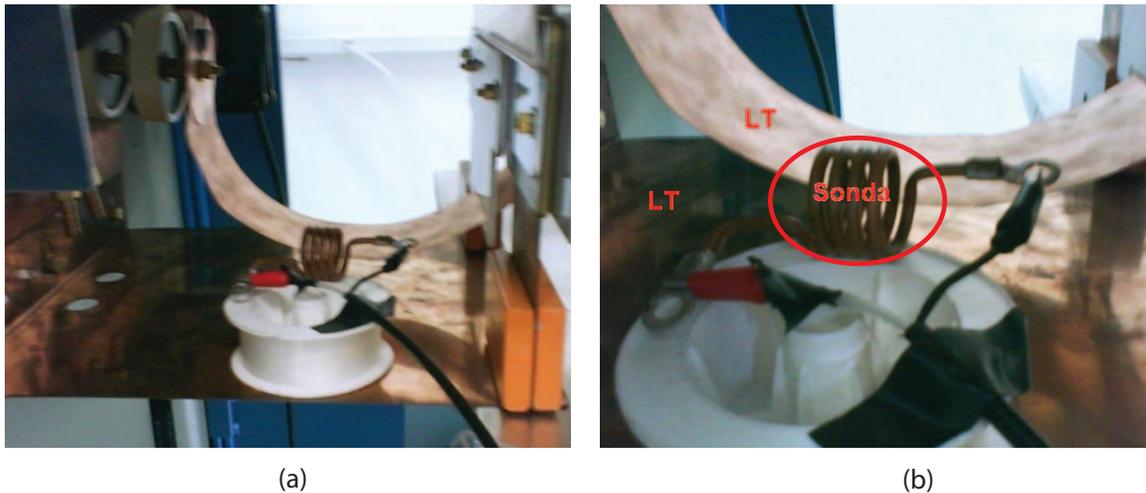


Figura 5.12: Sinal coletado pela sonda na linha de transmissão: (a) para visão geral, (b) ampliação sobre a sonda.

Comparando os resultados das figura 5.11, figura 5.13, figura 5.15 e figura 5.17, vê-se claramente que a carga não influencia sobre a frequência gerada, e entregue a carga. Observa-se também que o sinal entregue para a solda é praticamente senoidal e com uma pequena distorção.

Visando, o mapeamento de todo o processo de geração de RF vamos analisar agora a influência da capacitância parasita causada pela tampa de fechamento da cavidade, na frequência. Ver figura 5.18. Como pode ser visto a capacitância causada pela tampa é desprezível e pouco interfere na frequência.

Na figura 5.19, observa-se a disposição da sonda nas medidas, sobre o indutor L1 do circuito tanque, utilizando como ferramenta de soldagem a área maior, para extrair uma potência maior da cavidade.

Devido à má qualidade do sinal, tentou-se mais uma vez a rotação da sonda de 90° , para reduzir a ação da radiação parasita e para se determinar o sentido correto do campo magnético. Ver figura 5.20.

Contudo ainda não houve um sinal de qualidade para a análise sobre este componente, como pode ser visto na figura 5.20, existem inúmeros picos que provavelmente foram causados por radiação refletida e por outras fontes. Para solucionar este problema colocamos a sonda envolvendo o indutor L1. Ver figura 5.21.

Através desta técnica pode-se ver que obtivemos um sinal claro e na medida do possível livre de interferência, vê-se que o sinal sobre o indutor apresenta um nível de instabilidade elevado, quando

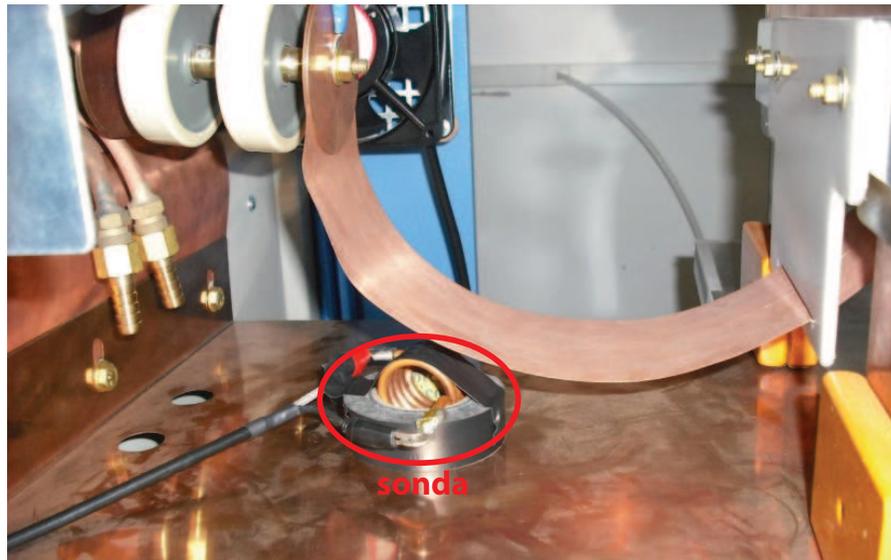


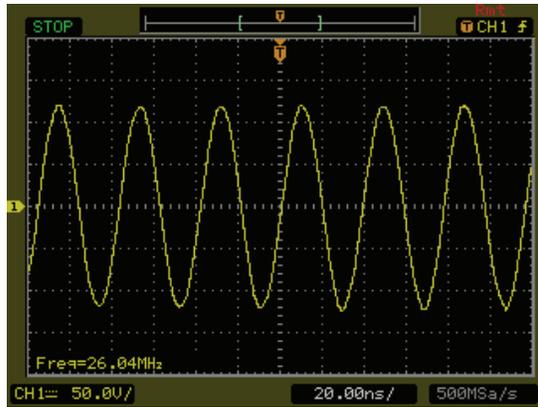
Figura 5.14: Sonda na linha de transmissão entre cavidade e mesa de soldagem, rotacionada em 90°.

este sinal passa pelo indutor L6 do circuito tem parte desta instabilidade filtrada e entrega a válvula um sinal mais limpo. Ver figura 5.22.

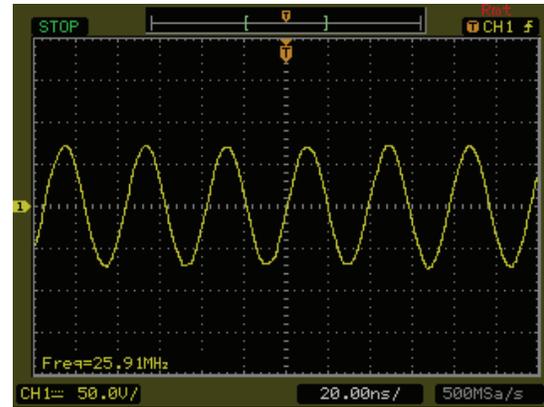
Na figura 5.23, vê-se o sinal sobre a cavidade. Em uma primeira tentativa colocou-se a sonda sobre uma placa isolante, diretamente sobre a tampa superior da cavidade, contudo devido ao grande potencial ao qual esta está submetida (6k Volts), não foi possível fazer medidas, pois o sistema de proteção estava atuando, devido à formação de arcos voltaicos, entre a cavidade e a sonda. Aumentou-se a quantidade de placas isolantes, contudo sem obter resultados positivos.

Na terceira tentativa, colocamos a sonda sobre a base que apóia o circuito tanque. Ver figura 5.24 - (a). Com esta nova configuração conseguiu-se obter uma boa medida do sinal, contudo o sinal apresentava uma pequena distorção na região dos vales (figura 5.24 - (b)), para sanar este problema que suspeitamos ser de radiação refletida, girou-se de 90°, e com isso conseguiu-se acabar com este sinal e deslocá-lo para os picos com isso pode-se confirmar que estes eram provenientes de radiação indesejada. (figura 5.24 - (c)).

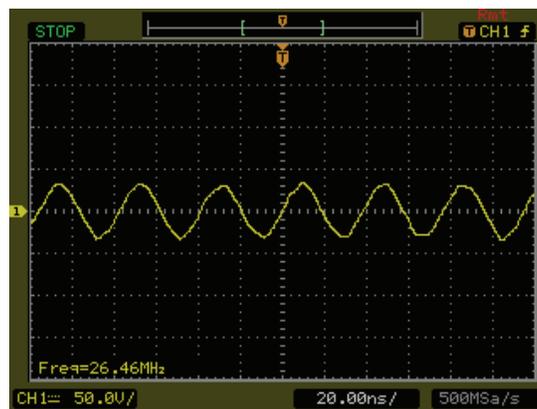
Com estas medidas pode-se concluir que tanto o circuito tanque, como a cavidade, e o sinal entregue a carga estão centralizados em 26MHz, dentro de uma pequena margem de tolerância. Conferindo assim que a carga não influencia na frequência quando esta é ajustada com o capacitor variável.



(a)



(b)

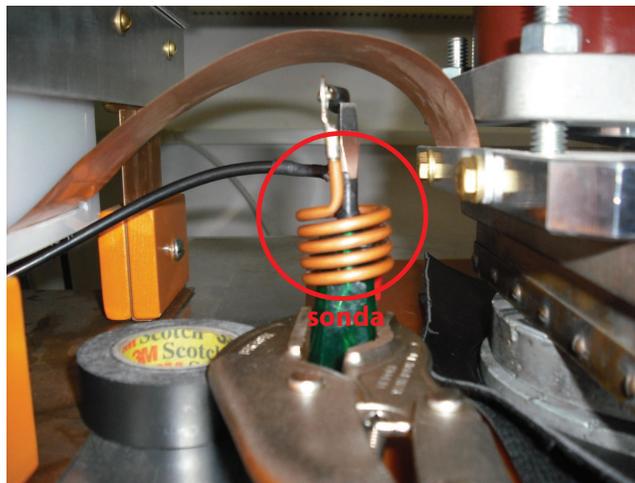


(c)

Figura 5.15: Sinal coletado pela sonda na linha de transmissão entre cavidade e mesa de soldagem, para diferentes cargas: (a) para uma região de solda grande, (b) solda média e (c) para uma região de solda pequena.

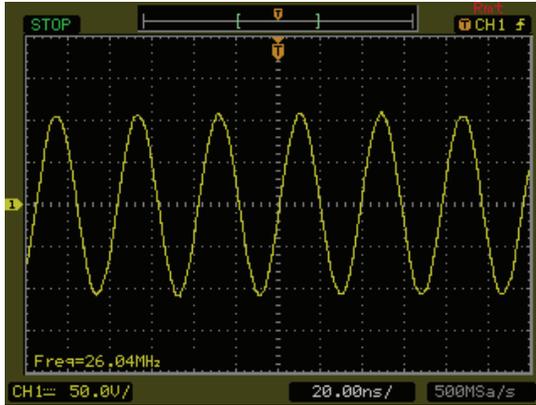


(a)

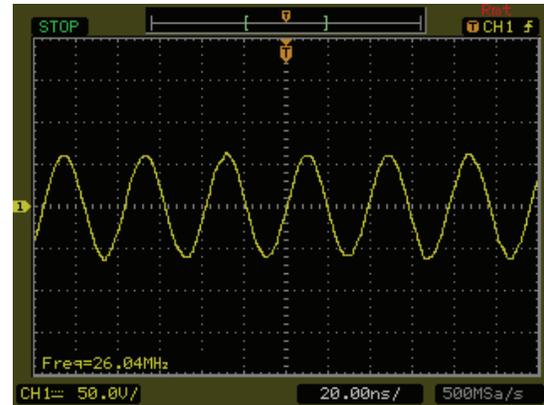


(b)

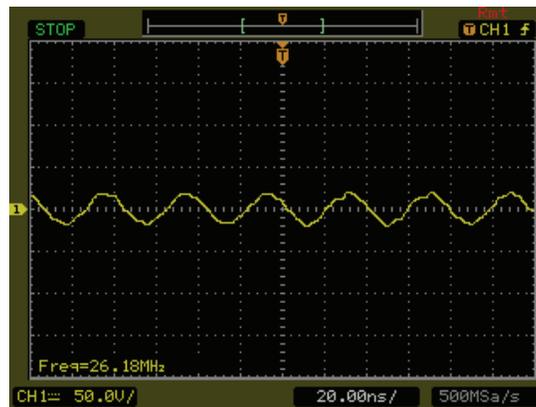
Figura 5.16: Sinal coletado pela sonda na carga: (a) visão geral, (b) ampliação sobre a sonda.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.17: Sinal coletado pela sonda na mesa de soldagem, para diferentes cargas: (a) para uma região de solda grande, (b) solda média e (c) para uma região de solda pequena.

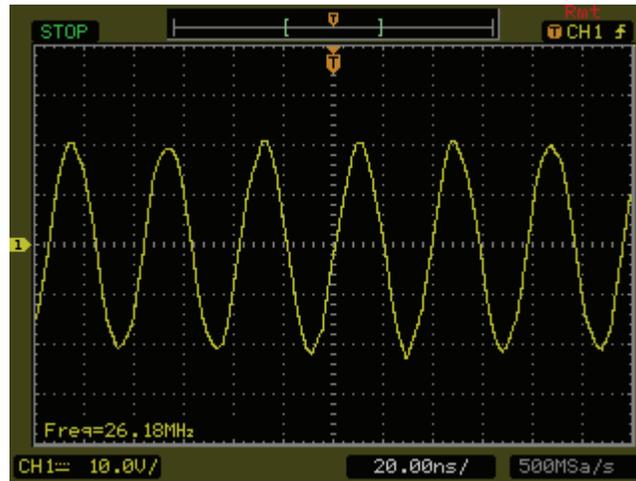
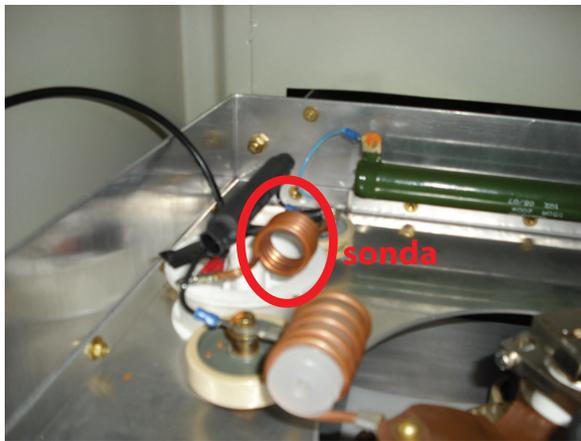
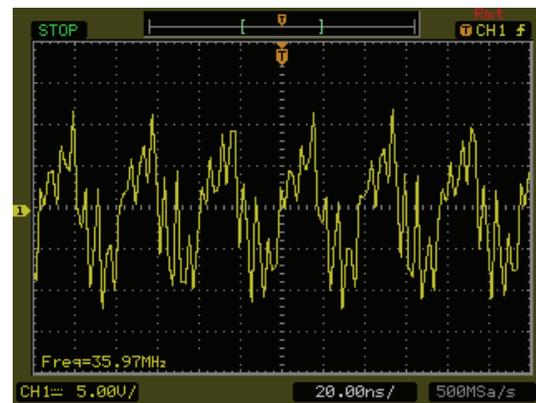


Figura 5.18: Sinal coletado pela sonda na carga, sem a tampa de fechamento da cavidade.



(a)



(b)

Figura 5.19: (a) sonda coletando os sinais no indutor do circuito tanque, (b) sinal obtido pela sonda.

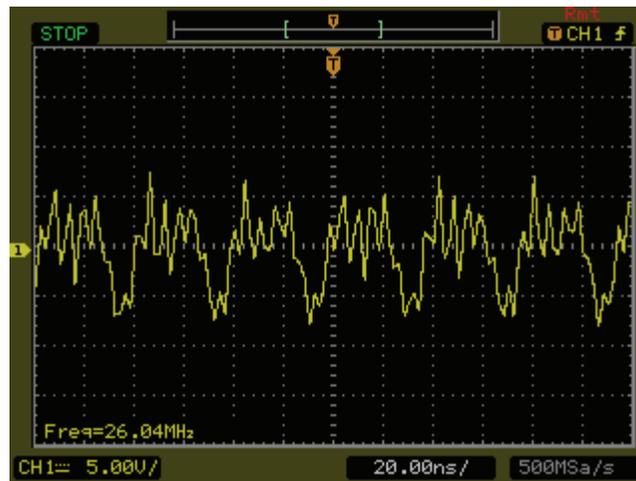
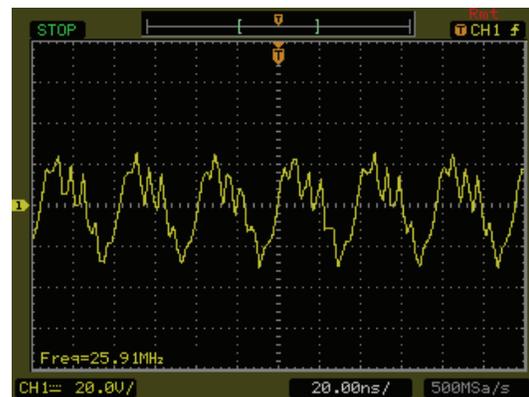


Figura 5.20: Sinal obtido pela sonda, com ela perpendicular ao indutor do circuito tanque.



(a)

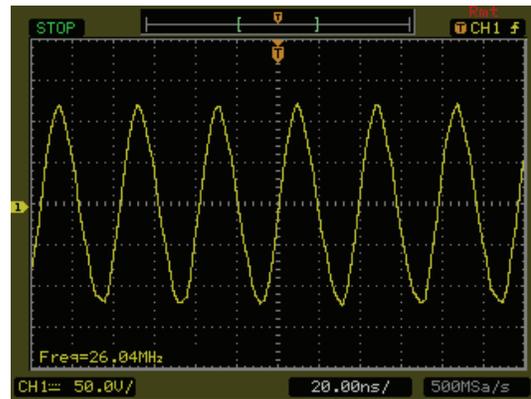


(b)

Figura 5.21: (a) Sinal obtido pela sonda, com ela concêntrica ao indutor do circuito tanque, (b) sinal obtido.



(a)

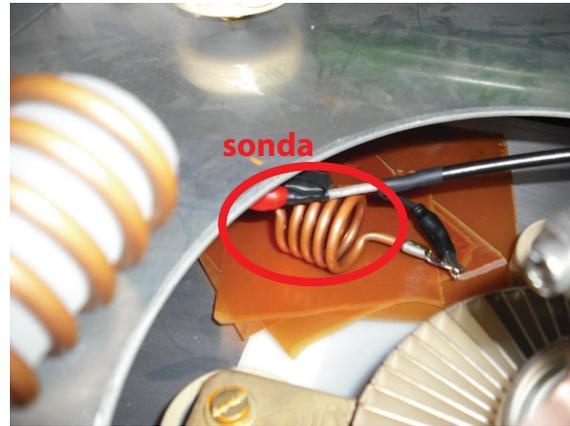


(b)

Figura 5.22: (a) Sinal obtido pela sonda, com ela paralela ao indutor L6, (b) sinal obtido.

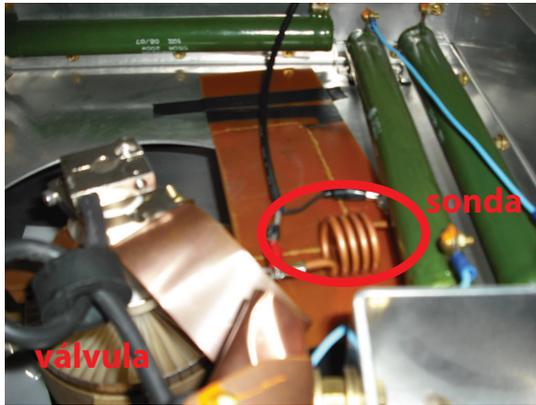


(a)

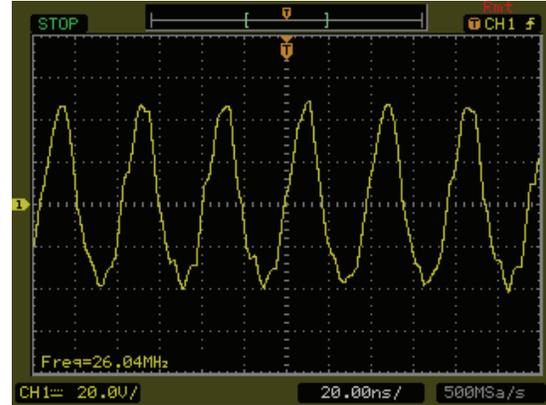


(b)

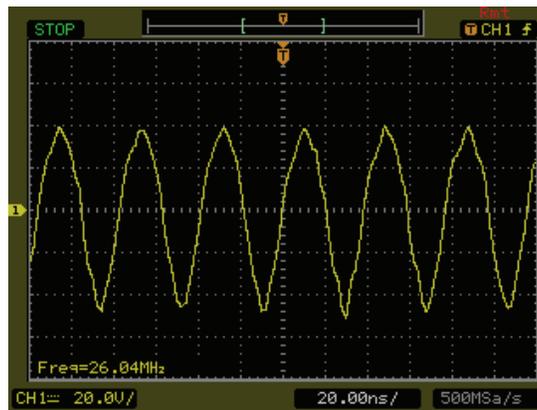
Figura 5.23: (a) Primeira tentativa de medição da radiação emitida pela válvula, (b) segunda tentativa com isolamento maior.



(a)



(b)

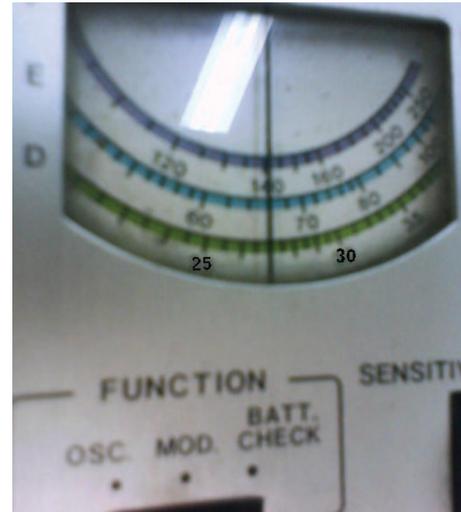


(c)

Figura 5.24: (a) Sonda apoiada sobre a tampa que sustenta o circuito tanque ao lado da válvula, (b) medidas obtidas, (c) espira girada de 90°.



(a)



(b)

Figura 5.25: (a) Medida da frequência utilizando *Dip Meter*, (b) Ampliação da tela de leitura, que indica 27MHz.

A fim de validar os resultados obtidos até agora foram feitas medições da frequência de funcionamento utilizando um *Dip Meter*, que validou os resultados observados. Ver figura 5.25. Com esta medição podemos confirmar que o equipamento está trabalhando em 27MHz.

Através das medidas realizadas pode-se comprovar que os modelos elaborados condizem com o funcionamento do equipamento. Validaram-se as funções de alguns componentes, como por exemplo, o capacitor variável, que serve para ajustar a impedância vista pela cavidade; o indutor L6, que corrige as distorções causadas pelas capacitâncias internas da válvula; e a própria sintonia do circuito tanque, e da cavidade, além de constatar que a variação da área de solda não influi na sintonia da cavidade.

Capítulo 6

Conclusão

O importante não é vencer todos os dias, mas lutar sempre.

Waldemar Valle Martins

Os esforços despendidos durante este trabalho tiveram o objetivo de estudar o comportamento de uma máquina de solda por indução eletromagnética em rádio frequência sendo desenvolvido um modelo de parâmetro concentrados para o gerador desta máquina industrial, que é constituída por um oscilador valvulado, com a função de gerar o sinal de potência na frequência de oscilação para a solda do substrado, uma cavidade ressonante responsável por blindar a energia eletromagnética a fim de reduzir ao máximo a radiação da energia, e também com função de um filtro passa-banda com a frequência central próximo a frequência de oscilação do estágio anterior, um sintonizador com a função de minimizar a interferência da impedância da carga no circuito da cavidade que poderia deslocar a frequência de ressonância dessa ocasionando um mal funcionamento da máquina, e a carga. Fez-se necessário também para a análise da cavidade ressonante, o uso de modelo de parâmetros distribuídos. Todos os modelos propostos concordam com as características de funcionamento de tais máquinas os que os tornam válidos para utilizações futuras.

Todos os resultados apresentados neste trabalho indicam ser possível, utilizando configurações adequadas, obter modelos distribuídos e concentrados para máquinas de solda por indução em RF para qualquer frequência de sintonia e potência de operação do sistema.

Através dos resultados obtidos experimentalmente e as análises destes podemos concluir que tanto

a cavidade como o circuito tanque estão sintonizados e operando em 26MHz, independente da carga (área a ser soldada).

6.1 Trabalhos Futuros

Como extensão natural deste trabalho, sugere-se melhorar o modelo de parâmetros distribuídos da cavidade ressonante coaxial, incluindo o estágio de transferência de energia para a carga. Com este modelo, através do estudo completo do modelo físico da estrutura, pode-se concluir parâmetros para o casamento da carga com a cavidade.

Outro passo importante na sequência deste trabalho é validar o processo dos modelos com a realizações de medições precisas em pontos estratégicos, que permitam monitorar o comportamento da máquina, e assim comprovar as curvas do modelo projetado(modelamento).

Dispondo dessa sistemática, ou seja com o modelo de parâmetros distribuído e parâmetros concentrados, poderá essa tecnologia ser aplicada a máquinas operando em diferentes potências e frequências, inclusive em máquinas que possam ser sintonizadas em frequências.

Referências Bibliográficas

[Pol,] *Manual de instruções da "S"12 KW TV com mesa de tato.*

[Osc, 1961] (1961). Os osciladores de rf. *Revista Monitor.*

[int, 1989] (1989). A spice model for vaccum tubes. Intusoft Newsletter.

[Balanis, 1989] Balanis, C. A. (1989). *Advanced Engineering Electromagnetics.* Wiley.

[Cheng, 1992] Cheng, D. K. (1992). *Field and Wave Electromagnetics.* Prentice Hall, second edition edition.

[Colinn, 1966] Colinn, R. E. (1966). *Foundations for Microwave Engineering.* McGraw-Hill.

[Crawford, 1998] Crawford, R. J. (1998). *Plastics Engineering.*

[Curtis, 1944] Curtis, F. W. (1944). *High-frequency induction heating.*

[de Freitas, 2003] de Freitas, E. (2003). Cavidade ressonante para equipamentos de solda por rádio frequência. In *PI0302603-5.*

[F. James Grist & Glen S. Lawrence, 1993] F. James Grist, Miller Electric Manufacturing Company, I. W. F. & Glen S. Lawrence, F. S. (1993). *Power Sources for Welding.* ASM International.

[FLAWS, 1996] FLAWS, M., Ed. (1996). *Welding handbook: Materials and application.* American Welding Society.

[Freire & Diniz, 1973] Freire, G. F. O. & Diniz, A. B. (1973). *Ondas Eletromagnéticas.* Editora da Universidade de São Paulo.

- [Gruenspecht & Hopper, 2006] Gruenspecht, M. & Hopper, T. (2006). Rf welding device. *US Patent*.
- [Hansen, 1938] Hansen, W. W. (1938). A type of electrical resonator. *Journal of Applied Physics*, (pp. 654–663).
- [Hayt & Jr, 2000] Hayt, W. H. & Jr, J. B. (2000). *Engineeting electromagnetics*. McGraw-Hill.
- [Jr., 1981] Jr., W. H. H. (1981). *Engineering Electromagnetics*. McGraw-Hill, fourth edition edition.
- [King, 1965] King, R. W. P. (1965). *Transmission-line Theory*. Dover Publications.
- [Koren, 1996] Koren, N. L. (1996). Improved vacuum tube models for spice simulations. *Glass Audio*, (pp. 18–27).
- [Kraus & Carver, 1973] Kraus, J. D. & Carver, K. R. (1973). *Electromagnetics*. McGraw-Hill.
- [Leach, 1995] Leach, W. M. (1995). Spice models for vacuum-tube amplifiers. *J. Audio Eng. Soc.*, 45, 117–1126.
- [Mammana, 1977] Mammana, C. I. Z. (1977). *Circuitos Eletrônicos: modelos e aplicações*. McGraw-Hill.
- [Mercer & Slate, 2008] Mercer, J. & Slate, S. (2008). The role of graphite in a quality edm finish. *MoldMaking Technology*.
- [N. M. Borges, 2004] N. M. Borges, E. Lima Verde, B. F. M. M. (2004). Oscilador pwm de alta frequência em ressonância magnética nuclear. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, 7, 93–98.
- [Netto, 2007] Netto, L. F. (2007). *Correntes de Foucault*.
- [Nichols, 2003] Nichols, R. J. (2003). Advances in the emabond induction welding process for high-performance assembly of demanding thermoplastics. *Emabond Solutions Global Headquarters & Innovation Center*, (pp. 1–10).
- [North & Ramarathnam, 1993] North, T. H. & Ramarathnam, G. (1993). Welding of plastics. *ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering*, (pp. 1048–1056).

- [Reynolds et al., 1970] Reynolds, J. F., Berson, B. E., & Enstrom, R. E. (1970). Microwave circuits for high-efficiency operation of transferred electron oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MT18, 827–834.
- [Reynolds, 1993] Reynolds, S. (1993). Vacuum-tube models for pspice simulations. *Glass Audio*, 5, 17–23.
- [R.I.Neophytou & A.C.Metaxas, 1999] R.I.Neophytou & A.C.Metaxas (1999). Combined tank and applicator design of radio frequency heating systems. *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, (pp. 311–318).
- [Sartori, 1999] Sartori, J. C. (1999). *Linhas de Transmissão e Carta de Smith: projeto assistido por computador*. EESC-USP.
- [Schelkunoff, 1935] Schelkunoff, S. (1935). The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields. *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 4, p. 532–79.
- [Sedra & Smith, 2000] Sedra, A. S. & Smith, K. C. (2000). *Microeletrônica*. Makron Books.
- [Shah, 1998] Shah, T. M. (1998). Method of welding polyurethane thin film. *US Patent*.
- [Silver, 1995] Silver, J. (1995). Oscillator resonator design tutorial. *RF, RFIC, & Microwaves Theory, Design*.
- [Staelin et al., 1994] Staelin, D. H., Morgenthaler, A. W., & Kong, J. A. (1994). *Electromagnetic Wave*. Prentice Hall.
- [Staff, 1970] Staff, H. (1970). *The Radio Amateur's Handbook*. The American Radio Relay League, forty-seventh edition edition.
- [Terman, 1943] Terman, F. E. (1943). *Radio Engineers' Handbook*. McGraw-Hill.
- [Valery Rudnev, 2000] Valery Rudnev, Don Loveless, R. C. M. B. (2000). *Handbook of Induction Heating*. ASM International.