

**2º CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS
RIBEIRÃO PRETO - SP**

**ÁREA TEMÁTICA: PROJETOS DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E
SIMULAÇÃO**

**A IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM PROJETOS DE
SISTEMAS NA ÁREA DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Autor: Nivaldo Carleto – Mestre em Ciências e Tecnologia Nuclear – Área: Materiais
Instituição: IPEN/USP (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/USP)

Endereço: Rua Miguel Anselmo, 261 – Bairro: Centro – Taquaritinga – SP
Telefone residencial: (16) 3252-2895 / Celular: (16) 9701-6514
e-mail: nibacarleto@ig.com.br ou carleto@usp.br

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma abordagem sistêmica sobre a importância do modelamento matemático e da simulação computacional no desenvolvimento de um projeto de engenharia elétrica. O trabalho enfatiza a utilização do modelo e da simulação no projeto e na construção de um circuito elétrico de alta tensão utilizado em sistemas de radares de microondas; normalmente conhecido como circuito modulador pulsado. Os resultados obtidos por meio das simulações permitiram reproduzir o comportamento do pulso próximo da realidade de operação do circuito, bem como controlar as variáveis pertinentes ao modelo. Isto foi verificado com os resultados práticos obtidos, onde foi possível ajustar os parâmetros de circuito e, conseqüentemente, obter informações relevantes para a construção do modulador. Embora as simulações não substituam por completo a realidade física de um projeto, elas são essenciais para reproduzir situações que possam levar risco a integridade física do homem, bem como experimentos difíceis de serem realizados na prática. Desta forma, por meio do modelamento matemático e da utilização adequada da simulação, respeitando evidentemente a compatibilidade entre o *hardware* e o *software*, foi possível que a mesma contribuísse significativamente para o sucesso do projeto do modulador.

Palavras-chave: desenvolvimento de projetos na área de engenharia elétrica, simulação computacional, simulação de sistemas de radares de microondas.

ABSTRACT

In this work to present a accosting systematic above importance of the mathematic modeling and of the simulation computational in the development of the design of electrical engineering. The work to emphasize the utilization of the model and of simulation in design and construction of the electrical circuit power voltage used in system of the microwave radar, generality know with pulsed modulator circuit. The results obtained through of the simulations allowed to reproduce the behavior of the pulse proximate of reality of the operation the modulator circuit, how so to control the variables relevant on the model. This was verified with the practices results obtained, where possible to adjust the parameters of the circuit and, consequence, to obtain information's relevant for the construction of the modulator. Although the simulations not substitution for complete reality physical of in design, its are utility for reproduce situations which ruler to take in risk the integrity physique of the men, how so experiments difficult to be accomplished in the practical. Although, across of the modeling mathematics and the utilization adequate simulating respecting evidently the compatibility between the hardware and the software, was possible which same to contribute significantly for successful of the design of modulator.

Keywords: development of the design in area of electrical engineering, simulation computational, simulation of the system microwave of radars.

INTRODUÇÃO

A simulação computacional de sistemas físicos está presente tanto na área científica e acadêmica (desenvolvimento de tecnologia nas áreas da medicina, física, química e engenharia) quanto na otimização de sistemas logísticos e de produção, por exemplo. Ela é uma ferramenta importante, pois permite confrontar a teoria, baseada em conceitos e modelos matemáticos, com a parte experimental, estabelecendo com isso uma relação de compromisso entre estas duas vertentes (teoria/prática). Desta forma, é possível orientar o processo de tomada de decisão, analisar e avaliar sistemas físicos e propor soluções para a melhoria do projeto, possibilitando com isso a previsão de alguns resultados experimentais ou mesmo a realização de experiências que possam comprometer a integridade física do ser humano.

Com os avanços da tecnologia, especialmente na área da informática, modernos equipamentos (*hardware*), novas linguagens de programação (*software*) e sofisticados programas de simulação têm permitido a utilização da simulação computacional em diversas áreas do conhecimento humano; como por exemplo:

- projetar e analisar sistemas industriais automatizados (CLP – Controlador Lógico Programado e aplicações da robótica);
- avaliar o desempenho de sistemas computacionais (*softwares* de avaliação de desempenho, como por exemplo: o Winstone 99 e o Winbench 99 – versões 1.1).
- analisar o comportamento de sistemas físicos (elétricos, eletromagnéticos, mecânicos, pneumáticos e hidráulicos);
- analisar o comportamento de circuitos eletroeletrônicos e de seus componentes;
- projetar e desenvolver sistemas utilizados na área militar;
- estabelecer rotas de atendimento (sistemas logísticos);
- simular células de produção (processos e operações);
- planejar recursos materiais e de manufatura na indústria (MRP e MRP II), entre outros.

Em particular, na área de engenharia, a técnica de simulação é muito utilizada para investigar resultados a partir de um modelo matemático que represente um fenômeno ou um comportamento físico, para reduzir riscos na tomada de decisão, identificar problemas antes de suas ocorrências, excluir processos que não agregam valor na produção, bem como investigar a viabilidade técnica e econômica de um projeto. Diante disso, pode-se dizer que o objetivo desse trabalho é apresentar e discutir o uso da simulação computacional de um circuito elétrico de alta tensão operando em regime pulsado (circuito modulador) e confrontar os resultados obtidos por meio desta simulação com os resultados práticos do projeto. É importante ressaltar que na elaboração deste trabalho utilizou-se a norma técnica de trabalhos científicos desenvolvida por DUPAS (2002).

Este trabalho encontra-se organizado conforme descrito a seguir. Na seção 2, apresenta-se o desenvolvimento teórico sobre a engenharia de sistemas, conceituando inicialmente o significado de sistemas e de modelos. Ainda na mesma seção, mostra-se uma abordagem sistêmica dos modelos, a sistemática de construção de modelos, os tipos de modelos de simulação e a importância da verificação e da validação do modelo propriamente dito. Na seção 3, encontra-se a metodologia utilizada para modelar o circuito modulador. Na seção 4, apresenta-se os resultados obtidos por meio da simulação, os quais são comparados sistematicamente com os resultados experimentais. Na seção 5 descreve-se as

considerações finais com base no referencial teórico e nos resultados obtidos. Finalmente, na seção 6, encontra-se as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos fundamentais: sistema e modelo

2.1.1 Sistema

De acordo com OLIVEIRA (2004), “sistema é um conjunto de partes integrantes e interdependentes que, conjuntamente, forma um todo unitário com determinado objetivo e efetua determinada função”. Em outras palavras, pode-se dizer que sistema é um conjunto de elementos, materiais ou fatores que se relacionam entre si em uma estrutura organizada.

Basicamente, um sistema pode ser constituído dos seguintes componentes:

- os objetivos, que se referem tanto aos objetivos dos usuários do sistema, quanto aos do próprio sistema;
- as entradas do sistema, as quais caracterizam as informações necessárias para a operação do sistema, gerando determinadas saídas que devem estar relacionadas com os objetivos estabelecidos;
- o processo de transformação do sistema, o qual tem como função possibilitar a transformação de um insumo (entrada) em um bem (produto final) ou serviço;
- as saídas do sistema, que correspondem aos resultados do processo de transformação;
- os controles das variáveis e as avaliações do sistema, que servem para investigar se as saídas estão coerentes com os objetivos estabelecidos; e
- a retroalimentação ou realimentação do sistema, que tem por finalidade realimentar uma informação à entrada do sistema de acordo com o resultado investigado, estabelecendo com isso um controle de todo o sistema.

O autor ainda ressalta que outro aspecto fundamental na teoria de sistemas é o ambiente do sistema, o qual pode ser definido como um conjunto de fatores que podem sofrer influência de fatores externos e internos ao próprio sistema.

2.1.2 Modelo

Para OLIVEIRA (2004), modelo é a descrição de um sistema o qual explica o seu funcionamento. Desta forma, para realizar uma simulação, é necessário um modelo específico que represente o comportamento do sistema, o qual este modelo pode ser físico, teórico, matemático ou uma combinação desses.

2.2 Abordagem sistêmica de modelos

Conforme mencionado, um sistema é um conjunto de elementos que interagem entre si e funcionam juntos para desempenhar uma determinada função. Restringindo o estudo na área de engenharia, normalmente quem constrói o modelo considera algumas aproximações, dentro do contexto permitido, tornando constantes algumas variáveis.

A visão sistêmica direcionada ao estudo de sistemas enfatiza as conexões entre as várias partes que constitui um todo. Por sua natureza, a abordagem sistêmica possui como principal característica a interdisciplinaridade. Desta forma, na busca por soluções e no estudo dos problemas, estão envolvidas disciplinas que a princípio não possuem nenhuma interligação. Como exemplo, pode-se mencionar a explicação de um fenômeno físico por meio de um modelo matemático que represente o seu comportamento. Com isso, o estudo desse sistema pode ser abordado de formas diferentes. A primeira seria alterar as rotinas operacionais para ajustar o sistema nas condições ideais de simulação. Para isso, é necessário um estudo preliminar para que as decisões tomadas sobre as alterações das rotinas do programa não diminuam o desempenho do sistema. A segunda refere-se na utilização de modelos matemáticos que representem as condições “reais” de operação do sistema. Com isso, a construção de modelos matemáticos de simulação a serem utilizados em computadores requer o uso das linguagens de programação, como a linguagem C e a linguagem Pascal, ou mesmo de *softwares* de simulação utilizados na área de engenharia eletroeletrônica, como por exemplo, o *Electronic Workbench*. Entretanto, é importante ressaltar que para empregar os modelos de forma adequada é necessário submeter à verificação e a validação desses modelos.

Por fim, vale lembrar que a complexidade de se verificar o comportamento de um sistema não depende somente das suas partes isoladamente, mas, sobretudo, da forma como elas se interagem. Isto sugere um controle sistemático do modelo para que o sistema responda satisfatoriamente dentro das condições e restrições estabelecidas no projeto.

2.3 Sistemática para a construção de modelos

A questão da interdisciplinaridade que torna a abordagem sistêmica extremamente interessante pode, em algumas situações, tornar o estudo complexo, conforme já mencionado. Por exemplo, ao analisar um problema, é possível identificar inúmeros motivos para a sua causa. Porém, este diagnóstico é complexo, sendo fundamental submeter-se a algumas técnicas de simplificação para identificar os motivos do referido problema. Inicialmente, é necessário conhecer a sua natureza e, em seguida, deve-se formar uma equipe especializada para abordar sistematicamente os fatores que proporcionaram o problema em questão. Um segundo fator importante é a organização do conhecimento sobre o problema. Ou seja, é necessário responder algumas questões pertinentes à sua análise, como por exemplo: Quais foram os principais fatores que, teoricamente, puderam originar o problema? Quais fatores poderiam ser omitidos? Outro requisito fundamental para a construção dos modelos são os recursos computacionais, como por exemplo, um *software* específico para uma determinada aplicação.

No processo de modelagem e na simulação computacional existem algumas etapas a serem cumpridas, as quais são descritas a seguir:

- **definição do problema:** a primeira etapa do processo de construção do modelo consiste em reconhecer e definir o problema a ser estudado;

- **concepção do sistema:** a segunda etapa do processo consiste na investigação dos fatores de influência que se acredita estarem agindo sobre o sistema;
- **representação do sistema:** nesta etapa, o sistema é representado por meio de um modelo matemático que caracterize o seu comportamento (físico, conceitual ou matemático);
- **comportamento do sistema:** nesta etapa, a simulação computacional é utilizada para investigar o comportamento do sistema por meio do modelo matemático desenvolvido e com base no problema apresentado;
- **avaliação do modelo:** nesta etapa são realizados diversos testes sobre o modelo para avaliar sua qualidade e validade (verificação e validação do modelo). Nestes testes verifica-se a consistência lógica e matemática do modelo; e
- **estratégias de utilização do modelo:** nesta última etapa, o modelo é utilizado para testar diferentes situações sobre o sistema em estudo, buscando com isso a sua padronização.

É importante ressaltar que as etapas descritas acima são dinâmicas, o que proporciona estabelecer melhorias no modelo com o objetivo de alcançar o resultado mais próximo da realidade.

2.4 Estudo de sistemas e tipos de modelos de simulação

Segundo LAW e KELTON (1991), os estudos de sistemas podem ser realizados sob diferentes formas de abordagem, conforme apresentado na Figura 1.

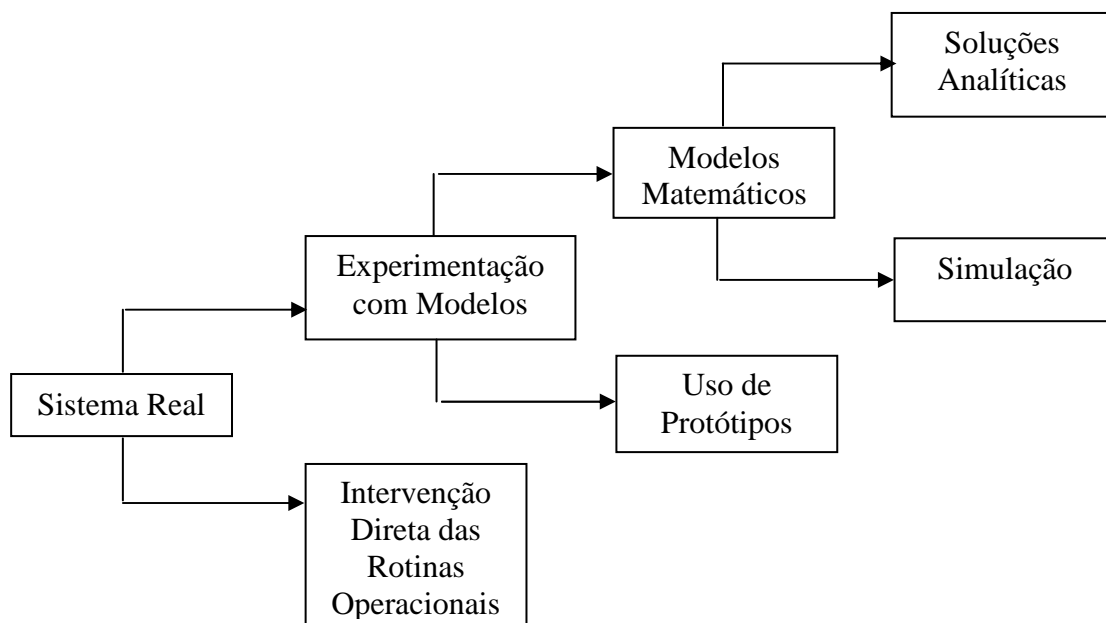


Figura 1 – Formas de estudo de um sistema.
Fonte: LAW e KELTON (1991).

Conforme mostra a Figura 1, a intervenção direta nas rotinas do sistema consiste em implementar ou alterar a forma de operação do sistema com o objetivo de obter uma condição ideal. Este tipo de operação exige experiência do profissional para que as tomadas de decisão não interfiram negativamente no desempenho do sistema. Por outro lado, a experimentação utilizando modelos tem por objetivo demonstrar o funcionamento real do sistema físico.

De acordo com NEELAMKAVIL (1987), os modelos podem ser classificados em mental, físico ou simbólico. Os modelos mentais são heurísticos e intuitivos, existindo somente na mente do tomador de decisão. Por exemplo, você olha para uma “coisa” que precisa usar e faz uma simulação mental de como será o procedimento para a sua utilização. Entretanto, os modelos mentais são confusos, complexos e de difícil comunicação. Isto porque a estruturação do modelo está vinculada ao conhecimento do tomador de decisão sobre o sistema em questão. Atualmente, uma das formas de tentar transcrever os modelos mentais é a estruturação de *expert systems*, que são programas de computador formulados com base no conhecimento de um ou mais especialistas. Quando o usuário emprega o programa, é apresentada uma série de cenários e perguntas que induzem o usuário a uma tomada de decisão de acordo com o conhecimento do especialista.

Já o modelo físico é uma descrição do sistema real por meio de uma representação análoga a este (sistema) ou pela construção de um protótipo. Como um exemplo de representação análoga, pode-se utilizar o funcionamento de um circuito elétrico simples, constituído por uma fonte de tensão e um resistor (resistência elétrica). Assim, a operação de um equipamento eletrodoméstico, como por exemplo, um ferro de passar roupas ou mesmo um chuveiro elétrico, pode ser analogamente representado por meio desse circuito.

Por outro lado, no que se referem aos protótipos, estes são replicas de sistemas físicos reais. Nesse caso, o estudo do sistema é realizado por meio de experimentos práticos.

Com relação aos modelos simbólicos, eles podem ser divididos em não-matemáticos e matemáticos. Os modelos não-matemáticos podem ser como:

- a descrição de um memorial descritivo de um projeto de engenharia (civil, elétrica, mecânica ou hidráulica); ou
- a elaboração de um organograma de uma empresa ou de um fluxograma de uma cadeia de suprimentos, por exemplo.

Já os modelos matemáticos podem ser representados como soluções analíticas ou soluções numéricas. Um típico exemplo de solução analítica seria a explicação da lei da indução eletromagnética de Michael Faraday em conjunto com a lei de Lenz, ou seja:

$$E = -\frac{d\phi}{dt}, \text{ onde } E \text{ é a tensão elétrica induzida na espira (ou bobina) e } \frac{d\phi}{dt} \text{ é a variação do}$$

fluxo magnético em relação ao tempo t . Quanto às soluções numéricas, pode-se dizer que é um conjunto de equações que descrevem um determinado sistema, originando com isso um modelo matemático de simulação.

Os modelos matemáticos de simulação, ou simplesmente modelos de simulação, podem ser classificados em:

- **estáticos ou dinâmicos:** denominam-se modelos estáticos os que tem como principal objetivo representar o estado de um sistema em um instante ou que em suas formulações não se considera a variável tempo t . Já os modelos dinâmicos são

formulados para representarem as alterações de estado do sistema ao longo da contagem do tempo de simulação;

- **determinístico ou estocástico:** no modelo determinístico, as suas formulações não fazem uso de variáveis aleatórias de entrada. Por outro lado, os modelos estocásticos empregam uma ou mais variável aleatória; e
- **discretos ou contínuos:** modelos discretos são aqueles em que o avanço da contagem de tempo na simulação se dá na forma de incrementos, cujos valores podem ser definidos em função da ocorrência dos eventos ou pela determinação de um valor fixo. Nesses casos somente é possível determinar os valores das variáveis de estado do sistema nos instantes de atualização da contagem de tempo. Já nos modelos contínuos, o avanço da contagem de tempo na simulação é de forma contínua, o que possibilita determinar os valores das variáveis de estado a qualquer instante.

2.4.1 Estruturação de modelos de simulação

A estruturação de modelos para a simulação de sistemas leva a organização de estruturas matemáticas que podem ser representadas por uma função f que produz uma saída y a partir de uma entrada x e parâmetros p do sistema, assim: $y = f(x, p)$ (Figura 2). Deve-se ressaltar que y , x e p podem ser variáveis, vetores ou matrizes (MENNER, 1995).

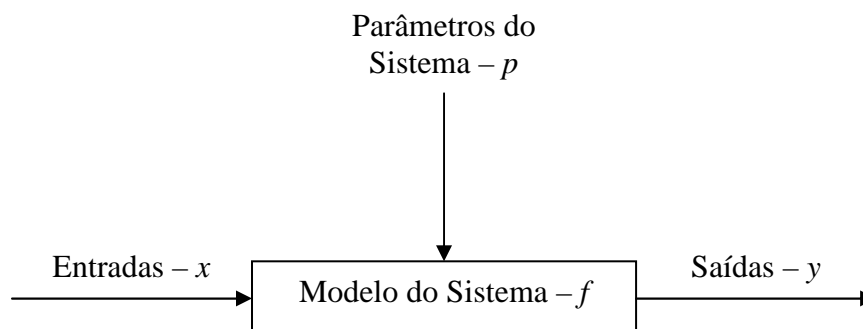


Figura 2 – Visualização de modelos de simulação: $y = f(x, p)$.

Fonte: MENNER (1995).

Geralmente, os modelos matemáticos de simulação levam em consideração as características dos elementos do sistema, as variáveis de entrada, as medidas de desempenho, bem como a relação funcional dos elementos do sistema com o meio externo. Desta forma, o desenvolvimento de um modelo segue os seguintes passos (MENNER, 1995; MARIA, 1997; RIVERA 1997):

- 1) **reconhecer o problema:** é identificar todos os fatos e aspectos que é pretendido estudar (investigar) para que estes sejam considerados na formulação do modelo sistêmico;
- 2) **formular o problema:** implica na seleção dos elementos do sistema, na fixação da fronteira do novo sistema o qual engloba os elementos selecionados, na definição dos

objetivos de estudo, na seleção do conjunto de parâmetros de medida de desempenho do sistema e, finalmente, na identificação dos anseios do usuário final;

- 3) **obter e analisar os dados do sistema:** implica no levantamento, na análise e na caracterização dos dados / informações que competem ao sistema;
- 4) **formular e desenvolver o modelo:** nesta fase, formula-se o modelo conceitual por meio de uma representação gráfica (fluxograma ou diagrama em blocos) a qual será traduzida em um modelo lógico e matemático para torna-se um modelo computacional de simulação;
- 5) **verificar e validar o modelo:** verificar significa certificar se as rotinas computacionais implementadas correspondem aos valores, teoricamente, esperados. Validação consiste na comparação dos dados gerados pelo modelo com os obtidos no sistema real (experimentação prática);
- 6) **documentar o modelo:** durante o desenvolvimento do modelo, o programador deve elaborar relatórios que contenha detalhes como os objetivos, as hipóteses consideradas e a descrição do desenvolvimento das rotinas computacionais. Isto facilita procedimentos futuros, como readequar o modelo a uma nova situação;
- 7) **definir os tipos de experimentos:** estabelece as condições em que os valores gerados são confiáveis para serem utilizados experimentalmente, definindo com isso os tipos de experimentos que serão realizados; e
- 8) **estabelecer as condições de uso:** ou seja, por meio dos experimentos realizados é definida as condições usuais do modelo.

Nestas condições, uma vez realizadas as etapas descritas acima, o modelo de simulação pode ser utilizado para auxiliar na parte experimental e, com isso, ajustar os seus parâmetros por meio dos resultados de saída; tendo em vista a otimização do sistema. Portanto, a elaboração de modelos para a simulação tem como objetivo utilizá-los como ferramenta de suporte à tomada de decisão na investigação do comportamento físico de um sistema. No entanto, para que estas simulações possam realmente ser utilizadas, é necessário que o modelo passe por um processo de verificação e validação.

2.5 Verificação e validação do modelo

Uma das tarefas mais árduas no modelamento e na simulação de um sistema é determinar se o modelo proposto retrata com fidelidade o sistema investigado. Para isso, é recomendado dois preceitos básicos, os quais podem ser verificados a seguir (MARIA, 1997):

- **verificação:** trata-se de um conjunto de ações para certificar se a forma conceitual adotada na formulação do modelo foi transcrita corretamente com a utilização das linguagens de programação ou da própria simulação. Na verificação, recomenda-se rodar o programa para um conjunto variado de situações para analisar os dados de saída, e, conseqüentemente, rastrear o programa verificando a execução dos procedimentos e o comportamento do sistema; e

- **validação:** é uma coletânea de dados e resultados utilizados para analisar se o modelo está apresentando consistência. Ou seja, se ele responde, dentro de um padrão, a realidade física do sistema. Neste caso, é importante que a validação seja conduzida com a verificação, aumentando com isso o poder de análise e a confiabilidade do modelo.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para modelar matematicamente o circuito elétrico de alta tensão (circuito modulador) utilizado no projeto e na construção de radares de microondas (Figura 3), bem como os modelos de simulação podem ser encontrados detalhadamente no trabalho desenvolvido por CARLETO (2005). Porém, é importante ressaltar que, o modelo matemático do circuito da Figura 3 foi baseado nas leis de Kirchhoff (lei das tensões e das correntes) e no conceito de variáveis de estado (DESOER e KUH, 1979), o programa computacional foi escrito na linguagem Pascal e o algoritmo de simulação foi o Runge-Kutta. Foi utilizado também o *software* gráfico MicrocalTM OriginTM 5.0 para plotar as formas de onda. Porém, para calcular os elementos do circuito da Figura 3 (capacitores C e indutores L), foi necessário utilizar os teoremas de Cauer e de Foster (GLASOE e LEBACQZ, 1948). O conceito matemático de variáveis de estado e as formas gerais destes teoremas (Cauer e Foster) podem ser observados, respectivamente, por meio das seguintes expressões:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + bw(t) \text{ (conceito de variáveis de estado),} \quad (1)$$

$$Y(s) = \sum_{v=1,3,\dots}^n \frac{C_v s}{L_v C_v s^2 + 1} \text{ (teorema de Foster),} \quad (2)$$

e

$$Z = z_1 + \frac{1}{y_2 + \frac{1}{z_3 + \frac{1}{y_4 + \dots + \frac{1}{z_{n-1} + \frac{1}{y_n}}}}} \text{ (teorema de Cauer).} \quad (3)$$

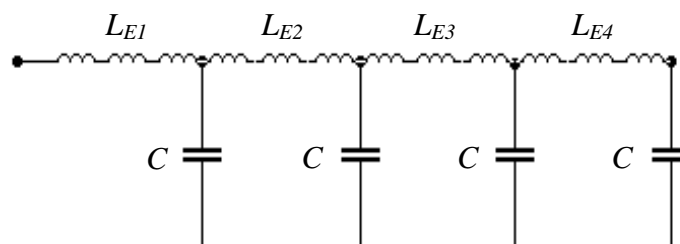


Figura 3 – Circuito de microondas.

Fonte: GLASOE e LEBACQZ (1948).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados obtidos por meio da simulação computacional

Nesta seção, apresenta-se as formas de onda obtidas por meio das simulações computacionais realizadas com o circuito elétrico da Figura 3.

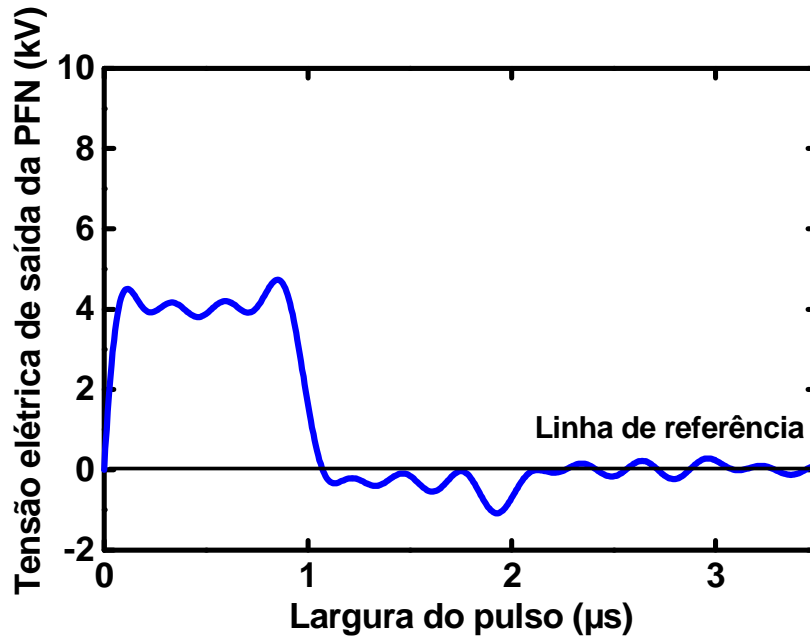


Figura 4 – Forma de onda do pulso de tensão de saída do circuito modulador.

De acordo com o pulso de tensão apresentado na Figura 4, observa-se que as oscilações na região superior estão relacionadas com as quatro frequências de oscilação estabelecidas por meio da expansão da série de Fourier. Estas frequências obedecem ao número de seções LC (indutores e capacitores) especificado no projeto do modulador (fator relevante na execução do projeto). A expressão a seguir representa a forma geral da série de Fourier.

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{v=1,2,3,\dots}^{\infty} \left[a_v \cos\left(\frac{v\pi t}{\tau}\right) + b_v \text{sen}\left(\frac{v\pi t}{\tau}\right) \right]. \quad (4)$$

Ademais, pode-se verificar que a amplitude e a largura τ (duração do pulso) do pulso permaneceram, respectivamente, em torno de $1 \mu\text{s}$ e $4,5 \text{ kV}$, respeitando também a especificação de projeto, com tempos de subida e descida bem definidos (forma retangular). Portanto, o pulso apresentado na Figura 4 representa um exemplo típico de “casamento” de impedâncias. Nestas condições, é possível afirmar que o modelamento matemático apresentou consistência para a devida aplicação.

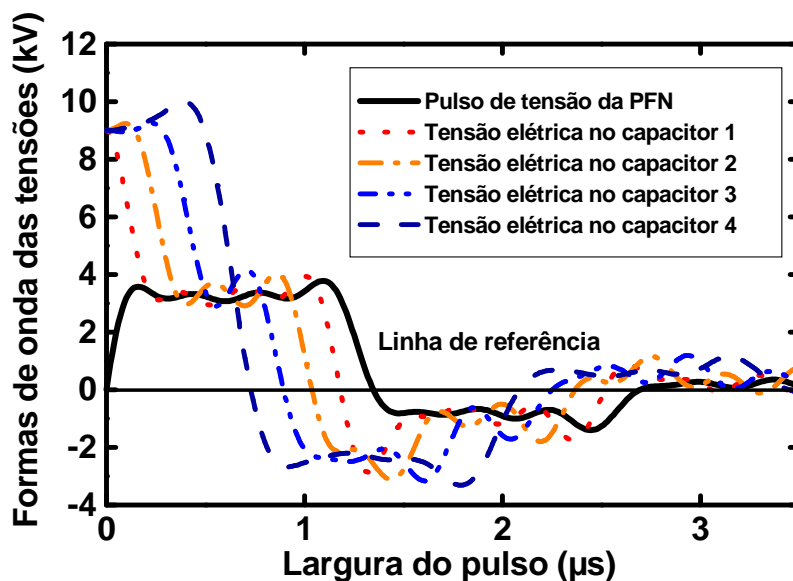


Figura 5 – Formas de onda das tensões elétricas nos capacitores do circuito modulador.

Na Figura 5 apresenta-se o comportamento das formas de onda das tensões elétricas em cada capacitor do circuito modulador (Figura 3). Como o circuito foi simulado com uma tensão elétrica de 9 kV, é possível verificar que o modelo matemático utilizado foi satisfatório, já que as formas de onda partem do ponto de 9 kV (Figura 5).

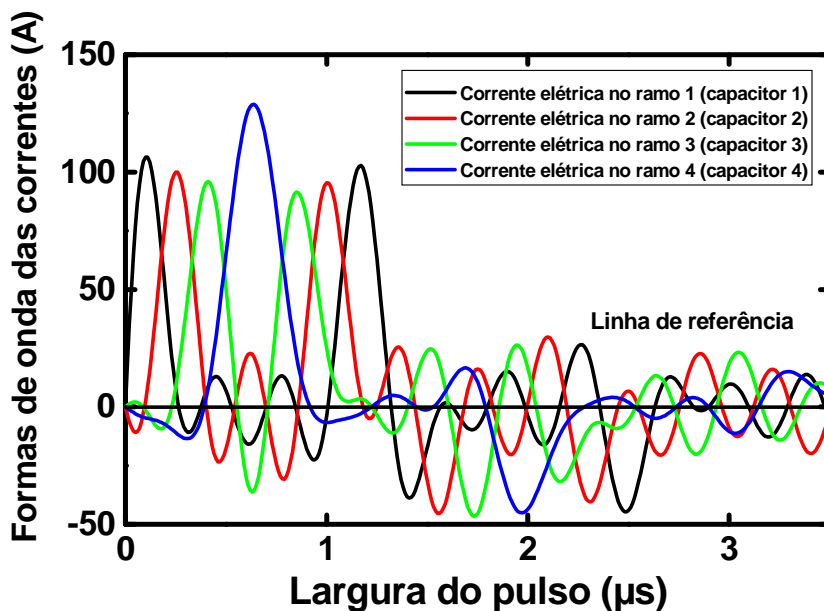


Figura 6 – Formas de onda das correntes elétricas nos capacitores do circuito modulador.

Na Figura 6 apresenta-se o comportamento das formas de onda das correntes elétricas em cada capacitor do circuito modulador (Figura 3). Como a corrente de pico calculada foi da ordem de 145 A (forma de onda azul na Figura 6), é possível verificar que o modelo matemático utilizado também respondeu satisfatoriamente.

4.2 Resultados obtidos experimentalmente

Nas Figuras 7 e 8 encontra-se, respectivamente, as formas de onda dos pulsos de tensão e de corrente; ambas obtidas experimentalmente por meio do circuito modulador. O pulso da Figura 7 equivale à forma de onda da Figura 4 (simulação computacional) e, o pulso da Figura 8 foi obtido utilizando-se uma bobina de Rogowski (Figura 9).

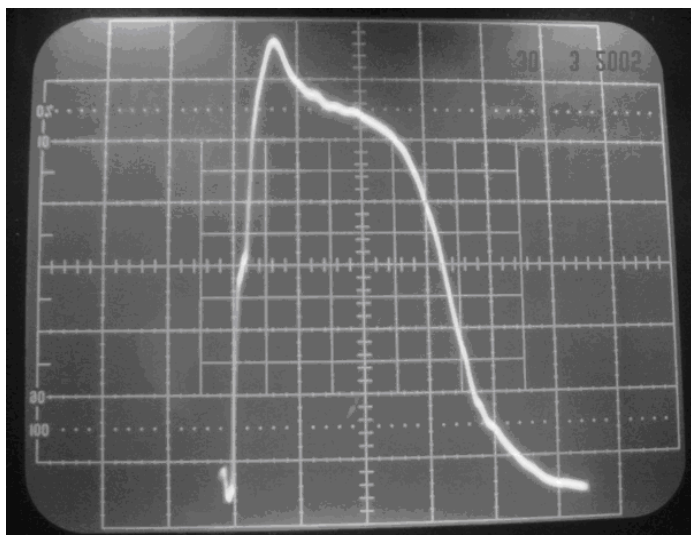


Figura 7 – Pulso de tensão do circuito modulador observado através de um osciloscópio.
Escala vertical reduzida: 2 kV/div. Escala horizontal: 0,2 μ s/div.

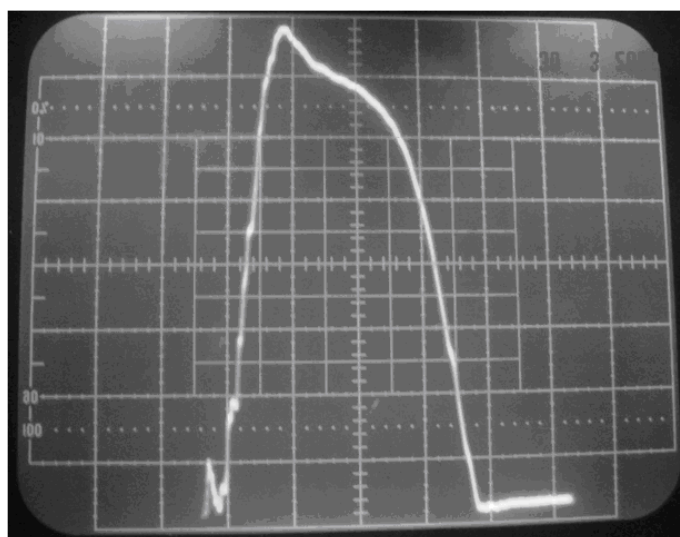


Figura 8 – Pulso de corrente do circuito modulador obtido por meio da bobina de Rogowski e observado através de um osciloscópio.
Escala vertical: 2 A/div. Escala horizontal: 0,2 μ s/div.

É importante mencionar que o pulso de tensão (Figura 7) e o pulso de corrente (Figura 8) apresentaram excelentes tempos de subida (da ordem de 100 ns) e de descida (em torno de 200 ns), permitindo uma forma aproximadamente retangular (requisito mínimo de projeto do modulador). Ademais, é possível observar uma excelente concordância entre os pulsos (tensão e corrente).

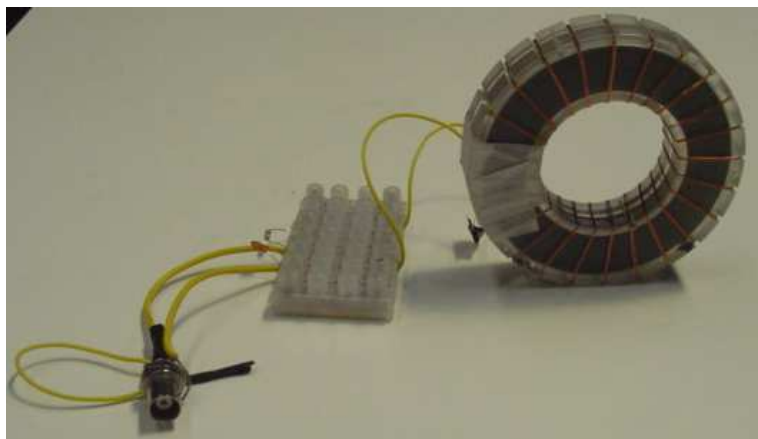


Figura 9 – Bobina de Rogowski utilizada para reproduzir experimentalmente a forma de onda da corrente elétrica no modulador (Figura 8).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a descrição teórica apresentada, pode-se concluir que por meio de um modelo matemático é possível verificar a validação dos resultados, sejam eles referentes a um fenômeno físico ou mesmo ao desenvolvimento de um projeto. Entretanto, para que o modelo torne-se efetivamente confiável, é fundamental analisar sistematicamente os resultados teóricos (obtidos pela simulação computacional, por exemplo) e compará-los com os resultados práticos do projeto. Além dessas observações, também é importante certificar-se que o modelo está relacionado às condições impostas ao sistema (projeto), o que permite obter consistência na resposta final do conjunto modelo-sistema.

Outra conclusão pertinente a este trabalho está relacionada com os resultados obtidos por meio da simulação computacional (Figuras 4, 5 e 6), onde foi possível comparar o resultado experimental (Figura 7) com a referida simulação da Figura 4. Com isso, foi possível verificar que o modelamento matemático apresentou consistência. Esta consistência pode ser observada na largura do pulso, onde tanto na simulação quanto na parte prática o pulso apresentou uma largura em torno de $1 \mu\text{s}$. Além disso, utilizando-se a bobina de Rogowski, foi possível observar uma forte concordância entre os pulsos de tensão e de corrente (Figuras 7 e 8, respectivamente). Portanto, pode-se afirmar que o modelamento matemático do circuito modulador (Figura 3) foi essencial para o seu projeto e para a sua construção, confirmando com isso a importância da simulação computacional para o seu desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLETO, N. *Projeto, construção e caracterização de um modulador pulsado para a operação de uma válvula magnetron de potência*. 2005. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

DESOER, C. A.; KUH, S. E. *Teoria básica de circuitos*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.

DUPAS, M. A. *Pesquisando e normalizando: noções básicas e recomendações úteis para a elaboração de trabalhos científicos*. São Carlos: EdUFSCar, 2002.

GLASOE, G. N.; LEBACQZ, J. V. *Pulse generators*. New York: McGraw-Hill, 1948.

LAW, A. M. ; KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

MARIA, A. Introduction to modeling and simulation. In: The 1997 Winter Simulation Conference. Piscataway, 1997, New Jersey, *Proceedings...* New Jersey: IEEE, 1997. p. 7-13.

MENNER, W. A. *Introduction to modeling and simulation*. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1995.

NEELAMKAVIL, F. *Computer simulation and modeling*. Great Britain: John Wily and Sons, 1987.

OLIVEIRA, D.P.R. *Sistemas, organização e métodos: uma abordagem gerencial*. 14 ed. São Paulo: Atlas, 2004.

RIVERA, J. Modeling with extend. In: The 1997 Winter Simulation Conference. New York, 1997, *Proceedings...* New York: IEEE, 1997. p. 674-676.