

CARACTERIZAÇÃO DE DETECTORES DE POTÊNCIA E APLICAÇÃO EM INSTRUMENTAÇÃO PARA MICRO-ONDAS

Paulo Henrique Rinaldi¹; Eduardo Victor dos Santos Pouzada²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN – IMT)

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN – IMT)

Resumo. *Este trabalho refere-se ao projeto e desenvolvimento de um instrumento compacto para medir potência na faixa de RF e micro-ondas que se apresente como uma opção mais econômica ao uso de medidores comerciais com sensores específicos a eles acoplados. O instrumento serve para monitorar potências na faixa de frequência ISM em 2,45 GHz e possui circuitos analógicos e digitais para o condicionamento e processamento dos sinais. Os softwares desenvolvidos aplicam-se na interface usuário-equipamento, no processamento propriamente dito e na interface USB para posterior visualização (adicional) de resultados em um micro computador.*

Introdução

O uso de campos eletromagnéticos no interior de reatores químicos com o objetivo de diminuir o tempo das reações e/ou aumentar a eficiência energética em relação aos processos químicos convencionais é a característica mais importante do ramo de aplicações industriais de energia de micro-ondas. Este ramo contempla a área designada genericamente por “Microwave Chemistry”. Nos referidos processos químicos utilizam-se potências de micro-ondas na faixa de centenas de watts até algumas dezenas de quilowatts nas faixas de frequências ISM (Metaxas, 1983, p. 320) (Fenn, 2009, p. 163). O monitoramento contínuo das potências incidente e refletida nos acessos dos reatores é muito importante, pois sinaliza o andamento do processo e, o que é muito importante, indica o ponto de operação dos geradores de potência. Os dispositivos geradores (ordinariamente válvulas Magnetron) devem operar com potências refletidas em valores muito mais baixos do que a potência que aplicam nos acessos dos reatores, sob pena de queima do gerador em caso contrário. Esse monitoramento é realizado tipicamente com o auxílio de acopladores bidirecionais em guias de ondas. Os fatores de acoplamento são baixos (da ordem de 50 a 60 dB) a fim de acomodar os níveis de potência em valores compatíveis com os sensores de potência normalmente oferecidos pelos fabricantes de instrumentação (Agilent Technologies, p. 31) (Roussy e Pearce, 1995, seção 5.2.2).

Um instrumento típico é constituído por um ou dois sensores de potência conectados ao medidor de potência. No primeiro encontra-se o *hardware* analógico de alta frequência; no segundo há a facilidade de medição proporcionada pela eletrônica digital e pelo *software*, que opera com sinais de baixíssima frequência (Sorrentino e Bianchi, 2010, seção 17.2).

Esta configuração básica de instrumentação, empregada desde o final da II Guerra Mundial, vem sofrendo modificações nos últimos cinco anos. Os sensores continuam necessários e a eletrônica de condicionamento dos sinais (constituem a maior parte do custo da instrumentação, pois são eles que operam em altas frequências); o software, que opera a partir de sinais de baixíssima frequência, foi transferido dos gabinetes dos instrumentos para microcomputadores acoplados aos sensores. A comunicação eletrônica entre as partes é de natureza serial, com expressivo uso de interface USB (Agilent Technologies, p. 31). Essas mudanças proporcionaram redução no custo, exceto pelo caso dos sensores (entre US\$ 2.000 e US\$ 4.000, por unidade, para atender somente a faixa ISM de 2,45 GHz).

Os diodos semicondutores são adequados para a medição de potência em micro-ondas, especialmente os de GaAs (Teppati *et al.*, 2013, seção 6.3.3). São relativamente mais baratos – da ordem de US\$ 1200 para atender a faixa de 2,45 GHz – mas não são usados diretamente

em instrumentos de medida, pois tem a faixa dinâmica de potência reduzida. Seu comportamento pode ser modelado como o de um detector de envoltória, sendo a dependência entre potência de entrada e tensão de saída regida tipicamente por uma lei quadrática (Sorrentino e Bianchi, 2010, p. 139).

Este trabalho contempla o projeto e a caracterização de um instrumento compacto para medição de potência na faixa de micro-ondas em 2,45 GHz usando como elemento sensor cristais detectores a diodos de GaAs, poupando os instrumentos mais caros quando da ocasião de ensaios preliminares nos quais a precisão de medição pode ser um pouco relaxada.

O instrumento efetua a medição de potência usando curvas de calibração, previamente levantadas para cada sensor utilizado. Essas curvas são gravadas em memória, o que torna possível a leitura da potência, em miliwatt (mW) ou em dBm (decibel em relação à referência de 1 mW), em um display ou, alternativamente, em um microcomputador, com as facilidades decorrentes da programação.

Material e Métodos

No processo inicial de caracterização dos cristais detectores (Agilent 8474B) foram usados os equipamentos: Gerador vetorial de sinais (Agilent E4438C), divisor de potência (coaxial) (Agilent 11667A), sensor de potência (Agilent 8481B e 8481H), medidor de potência (Agilent E4418 e E4419), analisador de espectros (Agilent E4402B), analisador vetorial de redes (Agilent 8753ES e E5062A), multímetro digital (Tektronix DMM830) e osciloscópio digital (Agilent 54642D).

Utilizou-se o gerador de sinais para estimular os sensores de potência conectados aos medidores de potência. Isto permitiu obter tabelas de calibração para caracterizar os detectores de potência quando estes foram, na sequência, estimulados pelo gerador. A frequência de operação foi fixada em 2,45 GHz e a faixa dinâmica compreendeu o intervalo de potência de -30 dBm a +15 dBm, em passos de 0,5 dB. As medições foram realizadas em temperatura ambiente. Considerando a faixa dinâmica de 45 dB, espera-se obter desempenhos não lineares como os citados por Teppati *et al.*(2013, p.141)

No mínimo quatro medições foram realizadas para efeito de caracterização. A média aritmética dos resultados serviu para a construção da “curva característica” de cada sensor 8474B para armazenamento em memória. Não houve preocupação em caracterizar os resultados em função da temperatura.

Caracterizaram-se sete detectores de cristal disponibilizados no laboratório de micro-ondas, usando-se os mesmos intervalos anteriores e obtendo-se as leituras das tensões contínuas resultantes na saída.

Resultados e Discussão

As medições efetuadas para efeito de caracterização de sete detectores de cristal apontaram que dois deles apresentaram tensões de saída muito baixas, comprometendo a relação sinal-ruído. Por este motivo seu uso foi descartado. Os dados coletados mostraram o comportamento de tensão de saída versus potência de entrada, tipicamente caracterizados por uma função logarítmica conforme verificado na figura 1.

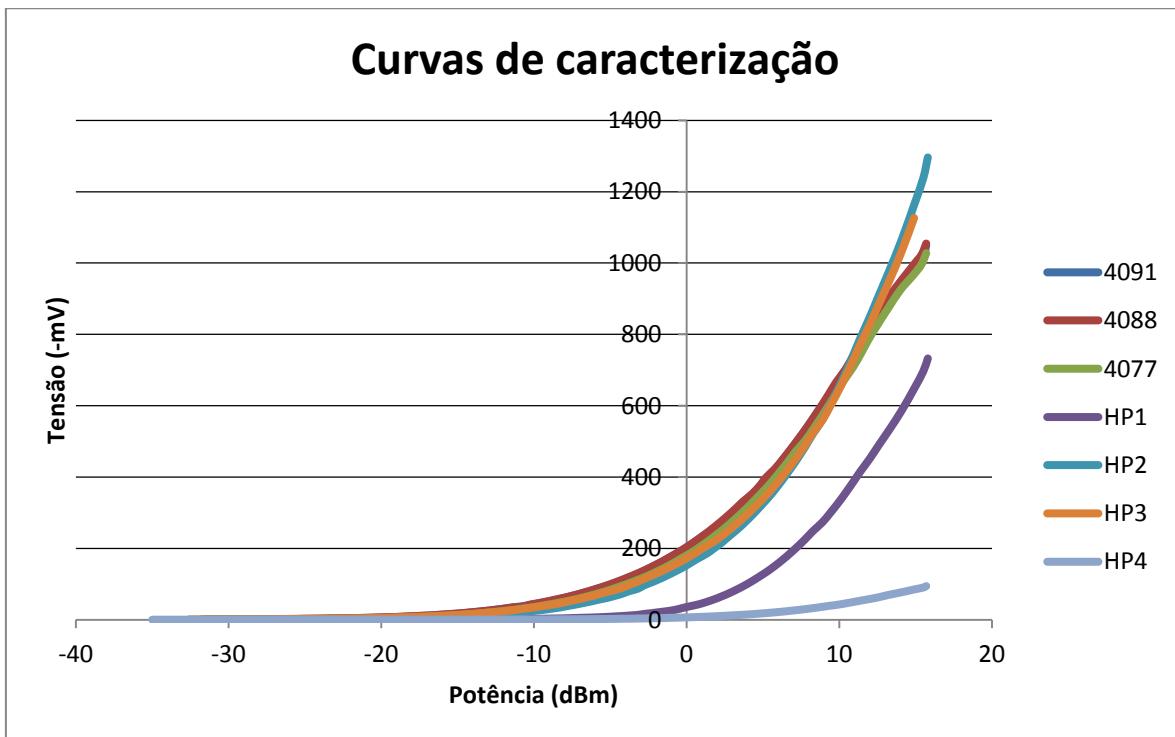


Figura 1 – Leitura de potência de entrada (dBm) versus tensão de saída (mV) de sete detectores. A tensão de saída dos detectores é negativa.

O sensor utilizado é um dispositivo constituído por um cristal detector a diodo GaAs (Agilent Technologies, modelo 8474B). Sua entrada é coaxial (conector N macho) e tem impedância de terminação valendo $50\ \Omega$. Seu terminal de saída (conector BNC fêmea) apresenta tensão contínua (DC) negativa. A dependência entre a potência de entrada (P_{in}) e a tensão de saída (v_{out}) do sensor não é linear. É exatamente esta lei de variação, função de cada dispositivo, que será determinada em laboratório usando instrumentação mais elaborada. Ela servirá como “curva de calibração” dos vários dispositivos individuais, a ser carregada na memória do processador, para a correta medição do valor da potência incidente no sensor.

A caracterização dos detectores de cristal mostrou a necessidade de amplificação das tensões de saída a fim de adequá-las ao intervalo permitido para a entrada do conversor analógico-digital de 10 bits, interno ao micro controlador utilizado. Para tanto utilizaram-se amplificadores operacionais, com configuração inversora, e alimentação simples (Apenas fonte positiva). Para evitar erros de leitura causados por ruído utilizou-se um filtro passa-baixas associado ao estágio amplificador. Um circuito limitador foi colocado entre a saída do filtro e a entrada do conversor analógico-digital para protegê-lo. Todos estes estágios operam como condicionador do sinal para o conversor analógico-digital.

O micro controlador utilizado foi um Arduino Leonardo, escolhido por conter conversores A/D integrados, e permitir conexão física com outras placas de circuito impresso, além de ser uma opção econômica e compacta.

A figura 2 mostra o diagrama de blocos do instrumento.

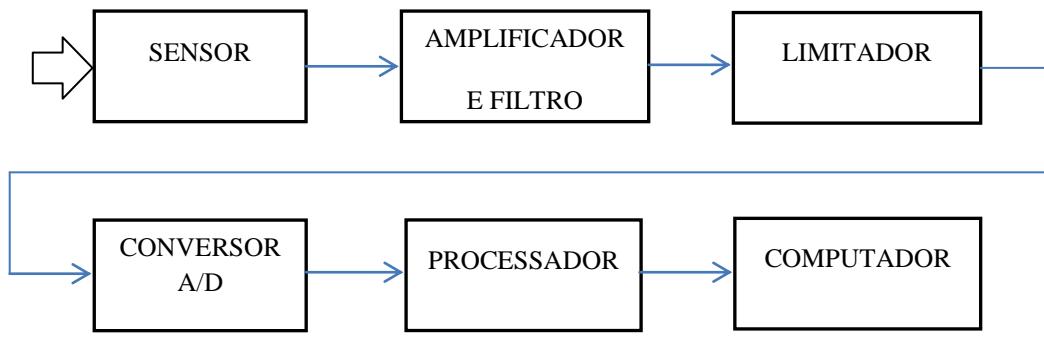


Figura 2 – Diagrama de blocos.

Fragmento do esquema elétrico e a placa de circuito impresso estão reproduzidos, respectivamente, nas figuras 3 e 4.

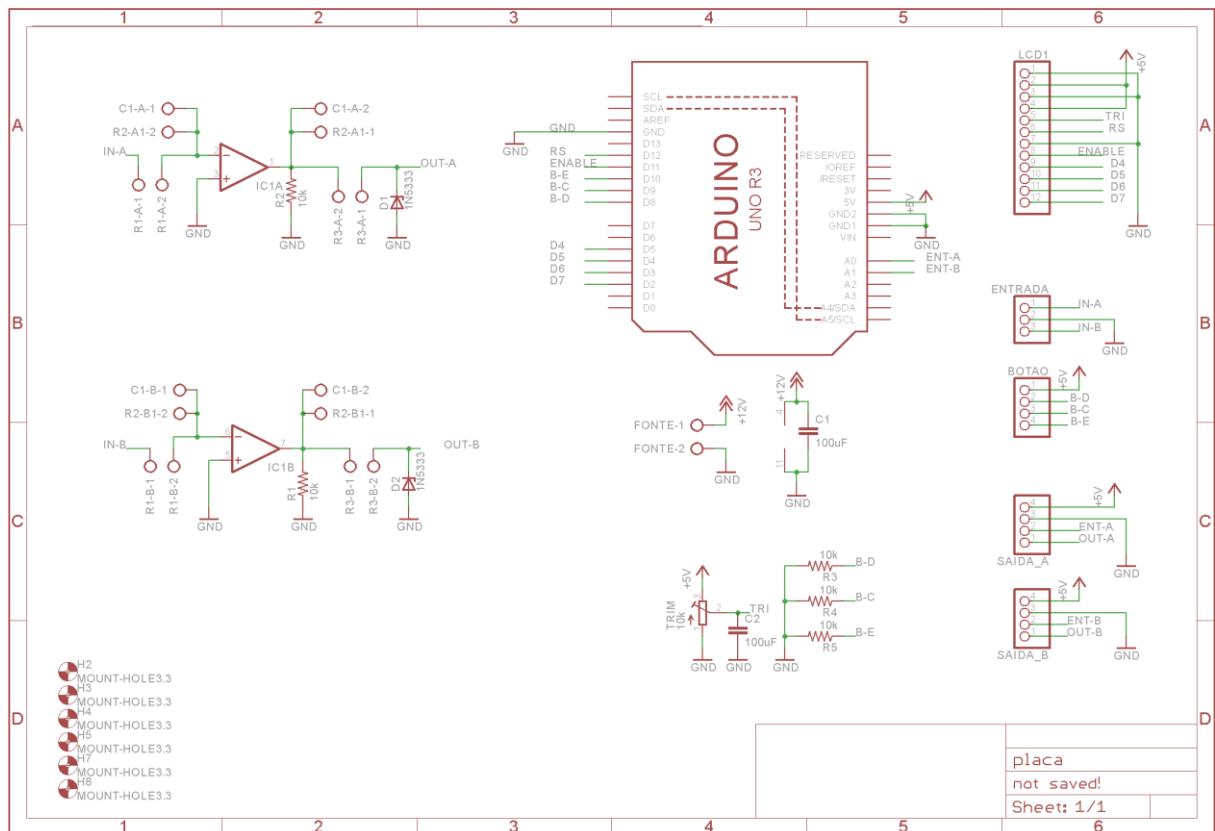


Figura 3 – Fragmento do esquema eletrônico do medidor.

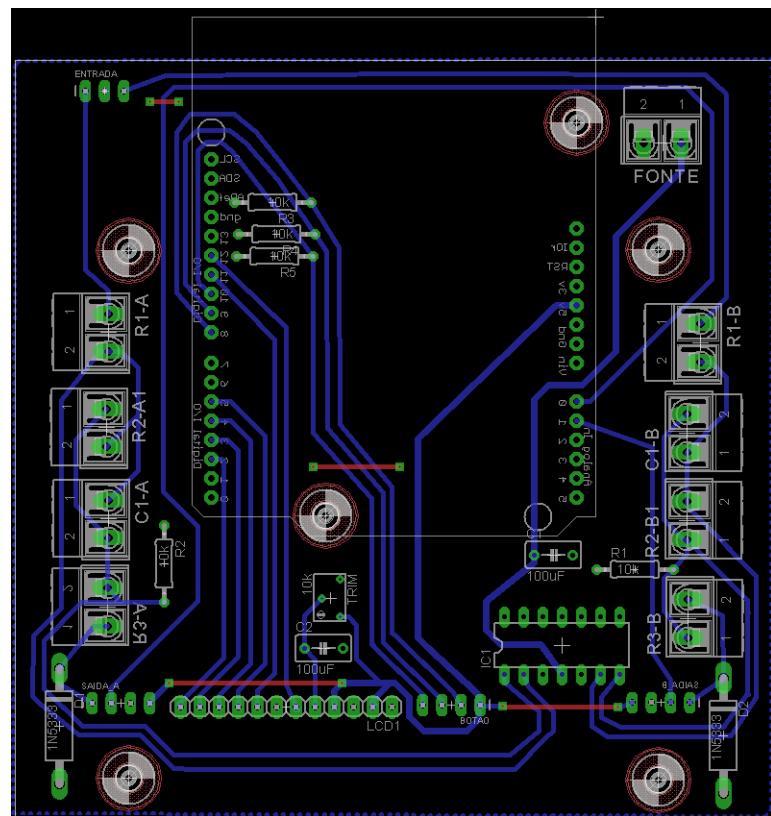


Figura 4 – Layout da placa de circuito impresso, face simples.

As medições de potência podem ser realizadas pela simples leitura do display do instrumento ou, alternativamente, pela leitura em tela de microcomputador acoplado ao sistema. Para este último caso foi necessário programar uma interface. A figura 5 mostra uma tela típica.

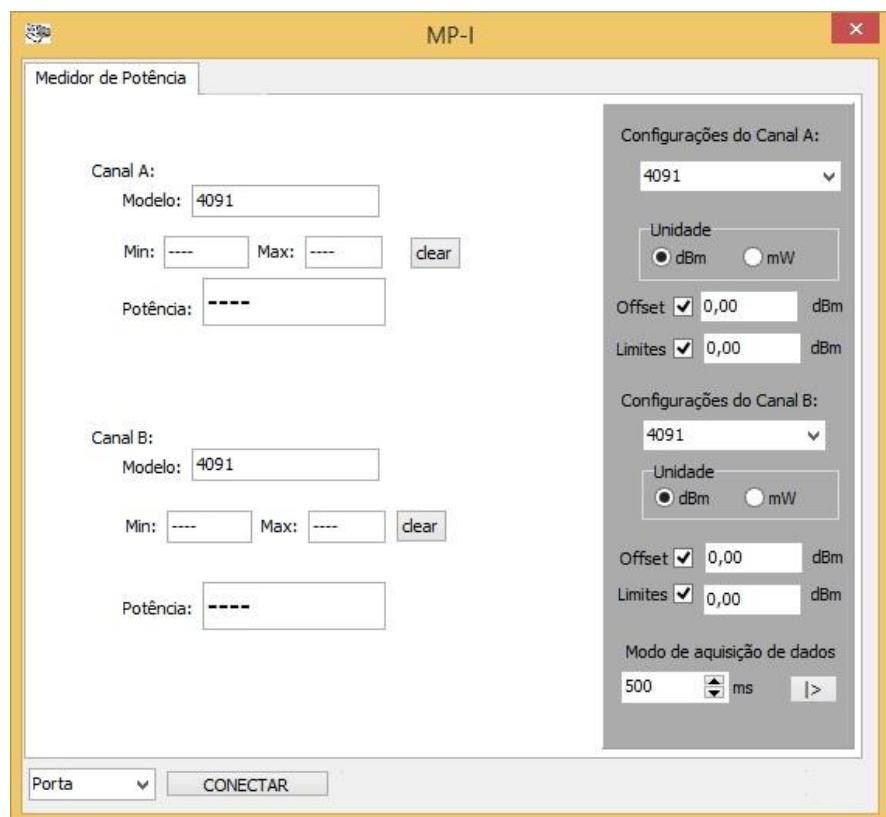


Figura 5 – Tela do microcomputador para leitura de potências.

O primeiro protótipo construído foi montado em gabinete plástico comercial, adaptado para conter um display LCD, três *push buttons*, duas entradas BNC, entrada para fonte de alimentação, saída USB para o microcomputador, placa de circuito impresso e a placa Arduino. As figuras 6 e 7 mostram o primeiro protótipo construído

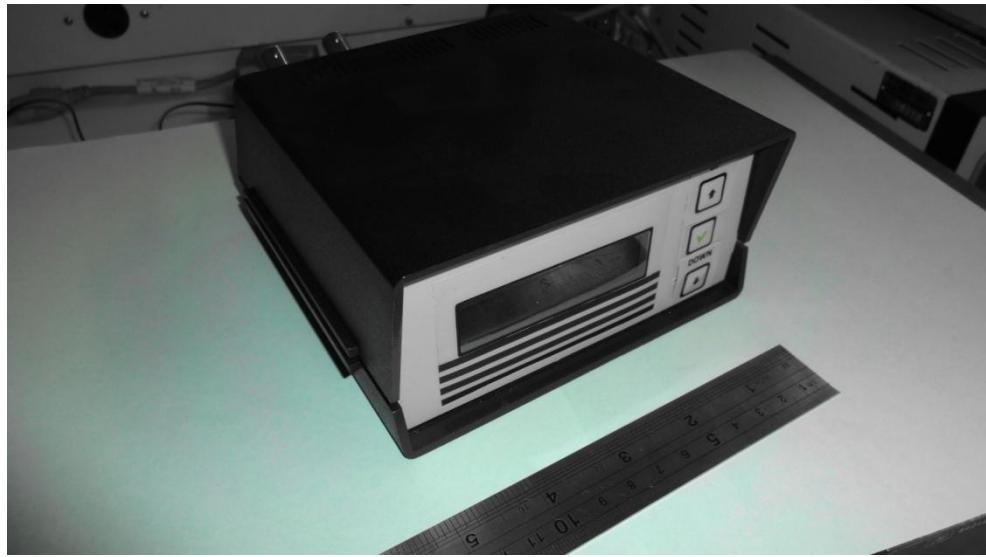


Figura 6 – Vista frontal do protótipo.

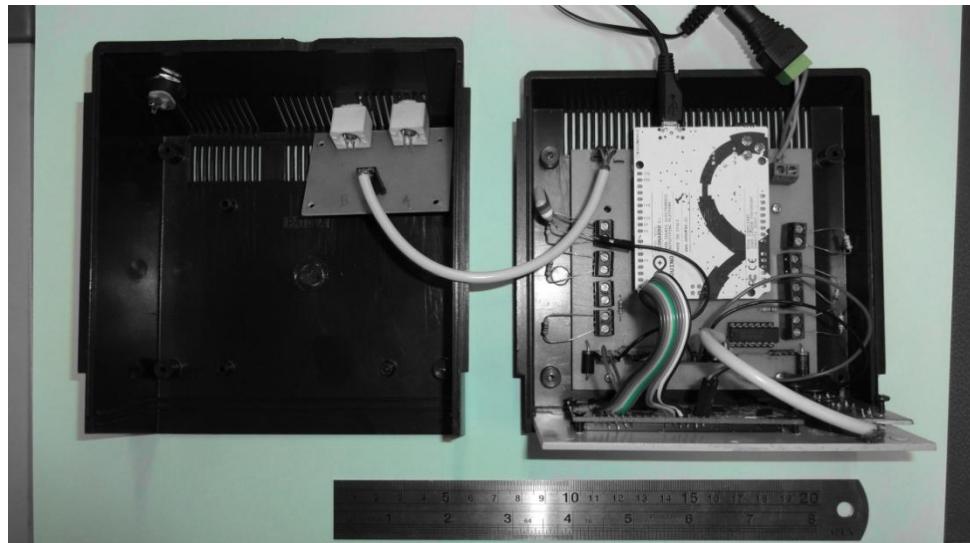


Figura 7 – Vista interna do protótipo.

Os testes foram realizados emulando-se o detector por uma fonte de tensão contínua. A leitura foi realizada adequadamente pelo computador. A seguir foram realizados testes com os detectores de cristal para verificar o funcionamento do primeiro protótipo. A tabela 1 mostra (fragmentos dos) resultados das medidas obtidas com um dos sensores.

Tabela 1 – Resultados de medidas. Detector 8474B, número de série 4091.

Potência do gerador (dBm)	Leitura do Power Meter (dBm)	Tensão de entrada (mV)	Conversor A/D	Cálculo do software	Diferença de potências (dB)
-16,50	-16,75	-12,60	5	-19,42	-2,67
-15,00	-15,21	-16,10	8	-17,17	-1,96
-13,50	-13,68	-21,67	12	-13,50	0,99
-12,00	-12,22	-28,30	17	-13,46	0,18
-10,50	-10,70	-36,48	24	-11,60	-0,90
-9,00	-9,16	-50,00	32	-10,02	-0,86
-7,50	-7,71	-63,30	42	-8,45	-0,74
-6,00	-6,20	-80,86	55	-6,82	-0,62
-4,50	-4,68	-102,40	70	-5,30	-0,62
-3,00	-3,18	-127,00	89	-3,78	-0,60
-1,50	-1,70	-158,00	111	-2,17	-0,47
0,00	-0,19	-195,86	137	-0,64	-0,45
1,50	1,32	-240,00	170	1,00	-0,32
3,00	2,84	-295,00	208	2,65	-0,19
4,50	4,37	-356,00	254	4,27	-0,10
6,00	5,87	-428,00	306	5,89	+0,02
7,50	7,40	-513,00	368	7,55	+0,15
9,00	8,93	-608,00	436	9,15	+0,22
10,50	10,48	-714,00	520	10,87	+0,39
12,00	12,06	-829,00	605	12,40	+0,34
13,50	14,19	-970,00	707	14,03	-0,16
15,00	15,85	-1070,00	780	15,07	-0,78

A primeira coluna da tabela 1 mostra a leitura obtida no display do gerador, resultado do ajuste nominal de sua potência de saída. A segunda coluna mostra a medição da potência feita por um Power Meter acoplado na saída do gerador; esta leitura tem valor confiável dentro da tolerância e do erro do instrumento, considerado sofisticado e alta tecnologia. A terceira coluna indica a tensão de entrada do detector de cristal. A quarta coluna apresenta o resultado (contagem) da conversão analógico-digital de 10 bits. A quinta coluna mostra o valor obtido do software pela aplicação da equação característica da reta. A sexta coluna mostra a diferença entre os valores da potência medida pelo instrumento projetado e a potência medida pelo Power Meter, tomada como referência; a diferença que se acentua nas duas últimas linhas da tabela – e a reversão da tendência – parece ser devida à atuação (não linear) do limitador na entrada do conversor A/D.

A tabela 1 apresenta apenas fragmentos de medidas utilizadas na realização deste trabalho. As medições partem de -16,50 dBm, pois leituras inferiores a este valor não apresentaram resultado significativo, o que é decorrente da baixa relação sinal-ruído,

Conclusões

Os resultados obtidos permitem concluir que a utilização de cristais detectores para a medição de potência não superam o desempenho dos medidores de potência comerciais no

aspecto da faixa dinâmica de potência, conforme constatado pela comparação das leituras efetuadas pelo instrumento e pelo Power Meter,

Os cristais detectores têm, no entanto, a vantagem de, ao serem usados com instrumentos simples – como o desenvolvido neste trabalho – constituírem um equipamento de medição com resultados satisfatórios, Servem como instrumentação de custo baixo e de precisão razoável a ser empregada em testes prévios de reatores/aplicadores de micro-ondas para uso industrial,

O instrumento projetado e montado apresenta facilidade de operação semelhante ao dos instrumentos comerciais disponíveis no mercado,

Projetos futuros, visando o aprimoramento deste instrumento, poderiam contemplar mais amplificadores com ganhos ajustáveis para efetuar leitura de potências mais baixas, A extensão da faixa de frequência utilizada e a inserção de novos detectores de cristais na memória do instrumento também poderiam ser atendidas,

Referências Bibliográficas

Agilent Technologies (Estados Unidos), *Agilent Power Meters and Power Sensors*, Disponível em <www.keysight.com>. Acesso em 30 jul, 2014.

Fenn, A. J. (2009) *Adaptive Phased Array Thermotherapy for Cancer*, Boston: Artech House. 226 p.

Metaxas, A. C.; Meredith, R. J. (1983) *Industrial Microwave Heating*, London: Peter Peregrinus. 357 p.

Roussy, G.; Pearce, J. A. (1995) *Foundations and Industrial Applications of Microwaves and Radio Frequency Fields: Physical and Chemical Processes*, Chichester: John Wiley. 475 p.

Sorrentino, R.; Bianchi, G. (2010) *Microwave and RF Engineering*, Chichester: John Wiley. 892 p.

Teppati, V.; Ferrero. A.; Sayed, M. (Eds.) (2013) *Modern RF and Microwave Measurement Techniques*, Cambridge: Cambridge University Press. 447 p.