

# Estimativa da capacidade de medição de ensaios aplicados a fornos de micro-ondas segundo a IEC 60705

Noara Foiatto<sup>1</sup>, Marcus Vinicius V. Pinto<sup>2</sup>, Gabriel N. Martins<sup>3</sup>, Jefferson R. B. Petersen<sup>4</sup>, Leandro José Weschenfelder<sup>5</sup>

<sup>1</sup> LABELO-PUCRS, Porto Alegre, Brasil, noara@pucrs.br

<sup>2</sup> LABELO-PUCRS, Porto Alegre, Brasil, mviegas@pucrs.br

<sup>3</sup> LABELO-PUCRS, Porto Alegre, Brasil, gabriel.martins@pucrs.br

<sup>4</sup> LABELO-PUCRS, Porto Alegre, Brasil, jefferson.petersen@pucrs.br

<sup>5</sup> LABELO-PUCRS, Porto Alegre, Brasil, leandrow@pucrs.br

**Resumo:** Os resultados de ensaios de conformidade impactam no desempenho de produtos comercializados e consumidos em âmbito global. Este artigo objetiva estimar a capacidade de medição segundo a IEC 60705 aplicada a fornos de micro-ondas com vistas à caracterização de sua eficiência energética. Como resultados destacam-se o equacionamento matemático da incerteza de medição para a qualificação da infraestrutura laboratorial com indicadores de tolerâncias aplicados à sua capacidade de medição.

**Palavras chave:** Micro-ondas, ensaios, conformidade, capacidade, eficiência.

## 1. INTRODUÇÃO

O PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem - tem como objetivo informar os consumidores sobre o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos, dando apoio para selecionar produtos de maior eficiência em relação ao consumo, possibilitando economia nos custos de energia [4]. Uma vez que um produto faz parte do programa, ele deve ser submetido a ensaios específicos periodicamente em laboratório indicado pelo PROCEL, e acreditado ao INMETRO para a manutenção da ENCE.

Os produtos são classificados de acordo com sua eficiência energética, sendo utilizada uma escala alfabética de “A”, mais eficiente, até a letra correspondente ao produto menos eficiente. Outras características técnicas e qualitativas associadas a um produto também podem ser verificadas e consideradas, dependendo das suas categorias.

Os produtos que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro de cada categoria são reconhecidos pelo Selo PROCEL [5]. Desta forma, o Programa incentiva a melhoria contínua do desempenho dos produtos etiquetados, servindo de estímulo produtivo para busca de níveis de desempenho melhores a cada nova avaliação, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico e para a preservação do meio ambiente [4]. Ainda segundo [4] com a adoção do Selo PROCEL para equipamentos eletrodomésticos, espera-se um aumento médio de 10% no índice de seu desempenho energético.

Este artigo objetiva estimar a capacidade de medição de um laboratório, frente aos ensaios prescritos pela norma IEC 60705, em sua versão atual, e frente a um conjunto de equipamentos, para fins comparativos. Com base nas estimativas das incertezas envolvidas nos ensaios aplicados

a fornos de micro-ondas, busca-se a caracterização das faixas de níveis de eficiências energéticas dispostas na ENCE – Etiqueta nacional de conservação de energia – e a infraestrutura laboratorial com indicadores qualificados para esse processo.

### 1.1 Fornos de micro-ondas

Durante as pesquisas e o desenvolvimento dos radares, no período da segunda guerra mundial, muitas características das microondas foram descobertas, e entre elas destacam-se as características referentes à aplicação para aquecer alimentos. Assim surgiram os fornos de micro-ondas. [1]

Os fornos de micro-ondas são compostos basicamente por um transformador, um retificador, uma válvula magnétron - responsável por emitir a radiação das microondas - um guia de ondas e uma câmara de cozimento blindada. [1] A figura 1 representa o sistema de um forno de micro-ondas convencional.

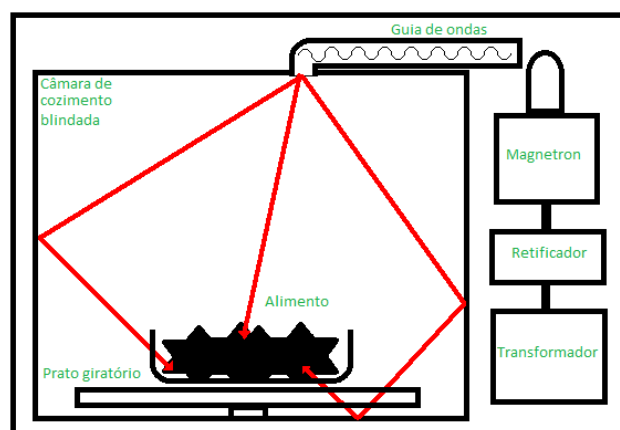


Figura 1 – Elementos básicos de um forno de micro-ondas convencional

Quando a válvula magnétron entra em oscilação, a energia é extraída de suas cavidades ressonantes por meio de um guia de ondas. Reflexões nas paredes internas do forno fazem com que a energia das microondas fique uniformemente distribuída pelo interior do forno. Portanto, as microondas permitem que o processo de cozimento seja rápido e uniforme. [2]

A radiação eletromagnética com frequência de 2,45 GHz, utilizada na maioria dos fornos de micro-ondas, é absorvida pela água, por açúcares e por gorduras. Uma das vantagens

da utilização dos fornos de micro-ondas consiste no fato de que essa radiação não é absorvida pela maioria dos plásticos, vidros e cerâmicas. [1]

No aquecimento por meio de microondas, o interior do material é aquecido primeiro, ao contrário do que acontece em um forno convencional a gás ou elétrico, onde o calor é gerado fora do material, fazendo com que a parte externa do material seja aquecida por convecção, e o interior do material, seja aquecido por condução [3].

O ponto mais crítico no projeto de um forno de micro-ondas é a segurança, uma vez que um transformador de alta tensão é utilizado em seu circuito. Além disso, a válvula magnétron, o guia de onda, e a cavidade do forno devem ser cuidadosamente protegidos, pois os níveis de vazamento devem ser muito pequenos para evitar a exposição dos usuários às radiações nocivas. [3]

A eficiência de um forno de micro-ondas, quando definida como a razão entre a potência convertida em calor e a potência consumida pelo forno, é geralmente maior do que a eficiência de cozimento de um forno convencional [3].

## 2. REQUISITOS DA IEC 60705

A norma internacional IEC 60705 aplica-se a ensaios de fornos de micro-ondas para uso doméstico, incluindo fornos de micro-ondas combinados. Ela define as principais características dos fornos de micro-ondas, em nível de interesses de usuário, frente ao seu desempenho e frente a métodos para medição de suas características operacionais. Este artigo destaca a determinação da eficiência de fornos de micro-ondas, sendo relacionados a seguir os demais ensaios previstos pela norma IEC 60705.

- Dimensões e volume;
- Determinação da potência de saída de micro-ondas;
- Ensaios técnicos para desempenho (uniformidade do aquecimento);
- Desempenho de aquecimento;
- Desempenho de cocção;
- Desempenho de degelo;

Antes de determinar a eficiência de um forno de micro-ondas é necessário determinar a sua potência de saída de microondas. As etapas desse ensaio são descritas no fluxograma da figura 2.

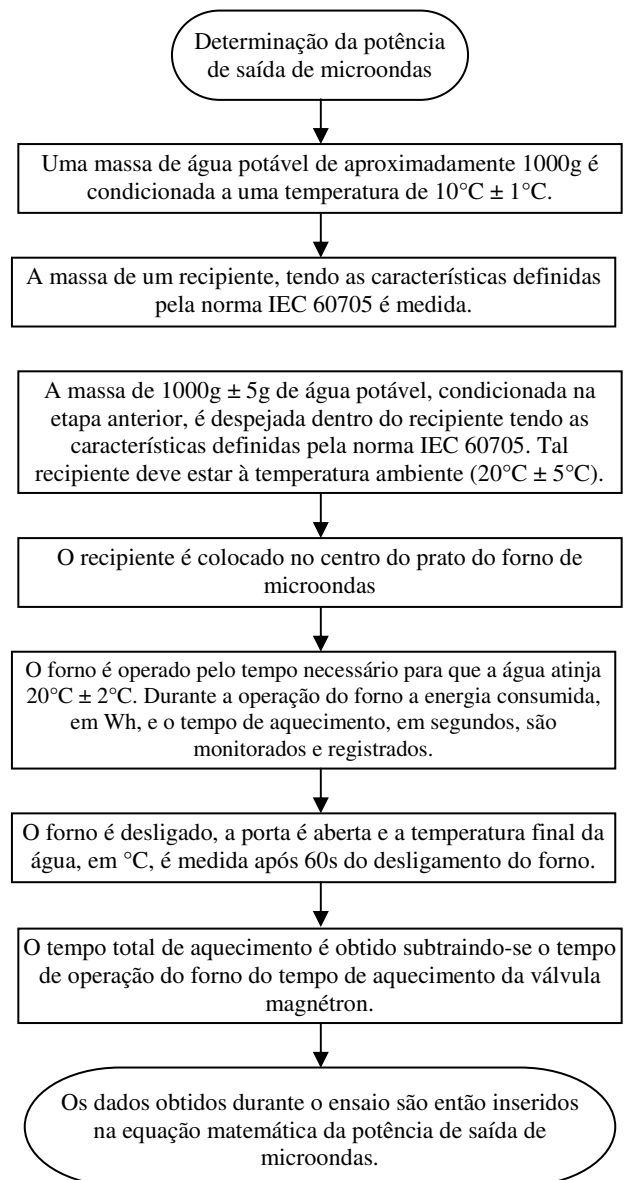


Figura 2. Sistemática básica do ensaio de determinação da potência de saída de microondas [6]

## 3. DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA

Segundo as informações da figura 2 a eficiência do forno de micro-ondas pode ser determinada por meio da equação 1.

$$\eta (\%) = \frac{P_{out} \cdot (t)}{W_{in}} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

- $P_{out}$ : é a potência de saída de microondas calculada, em watts
- $t$ : é o tempo de aquecimento, em segundos, excluindo-se o tempo de aquecimento da válvula magnétron
- $\eta$ : é a eficiência
- $W_{in}$ : é a energia consumida durante o ensaio de determinação da potência de saída de microondas, em Wh, incluindo a energia consumida durante o tempo de aquecimento da válvula magnétron.

## 4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza de medição de um processo compreende componentes provenientes de efeitos sistemáticos [7]. Complementarmente, a aleatoriedade de um processo deve ser estimada com base em seus mensurandos, que são obtidos por meio do equacionamento matemático de sua função operacional.

### 4.1. Equacionamento matemático

De acordo com a norma IEC 60705 [6], a eficiência do forno do micro-ondas é dada pela equação 2, decorrente da equação 1.

$$\eta (\%) = \frac{P_{out} \cdot (t_{total} - t_{aq})}{(3600 \cdot W_{in})} \quad (2)$$

Onde:

- $P_{out}$ : Potência de saída calculada (W)
- $t_{total}$ : tempo total (s)
- $t_{aq}$ : tempo de aquecimento do magnétron (s)
- $W_{in}$ : Energia de entrada medida (Wh).

A norma 60705 também define que a potência de saída calculada é dada pela equação 3.

$$P_{out} = \frac{[4,187 \cdot m_w (T_2 - T_1) + 0,55 \cdot m_c (T_2 - T_0)]}{(t_{total} - t_{aq})} \quad (3)$$

Onde:

- $m_w$ : massa de água (g)
- $m_c$ : massa do recipiente utilizado (g)
- $T_2$ : Temperatura final da água (°C)
- $T_1$ : Temperatura inicial da água (°C)
- $T_0$ : temperatura ambiente (°C)
- $t_{total}$ : tempo total (s)
- $t_{aq}$ : tempo de aquecimento do magnétron (s)

A partir das equações 1 a 3 tem-se então a equação da eficiência ou do rendimento energético, que pode ser reescrita por meio da equação 4.

$$\eta (\%) = \frac{100 \cdot [4,187 \cdot m_w (T_2 - T_1) + 0,55 \cdot m_c (T_2 - T_0)] \cdot (t_{total} - t_{aq})}{(t_{total} - t_{aq}) \cdot (3600 \cdot W_{in})} \quad (4)$$

De onde observa-se que a equação (4), em termos das variáveis medidas no ensaio, se reduz a equação (5).

$$\eta (\%) = \frac{100 \cdot [4,187 \cdot m_w (T_2 - T_1) + 0,55 \cdot m_c (T_2 - T_0)]}{(3600 \cdot W_{in})} \quad (5)$$

E por fim, a equação 5 pode ser reescrita pela equação 6, de forma a permitir o cálculo dos coeficientes de sensibilidade para fins de cálculo de incerteza de medição dos ensaios.

$$\eta (\%) = \frac{4,187 \cdot m_w \cdot T_2 - 4,187 \cdot m_w \cdot T_1 + 0,55 \cdot m_c \cdot T_2 - 0,55 \cdot m_c \cdot T_0}{36 \cdot W_{in}} \quad (6)$$

### 4.2 Coeficientes de sensibilidade

Os coeficientes de sensibilidade calculados em relação a cada uma das variáveis medidas estão representados por meio das equações 7 a 12, descritas a seguir. Com base nessas equações, são estimados os indicadores associados a variabilidade da medição.

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_0} = \frac{-0,55 \cdot m_c}{36 \cdot W_{in}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_1} = \frac{-4,187 \cdot m_w}{36 \cdot W_{in}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_2} = \frac{4,187 \cdot m_w + 0,55 \cdot m_c}{36 \cdot W_{in}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial m_w} = \frac{4,187 \cdot (T_2 - T_1)}{36 \cdot W_{in}} \quad (10)$$

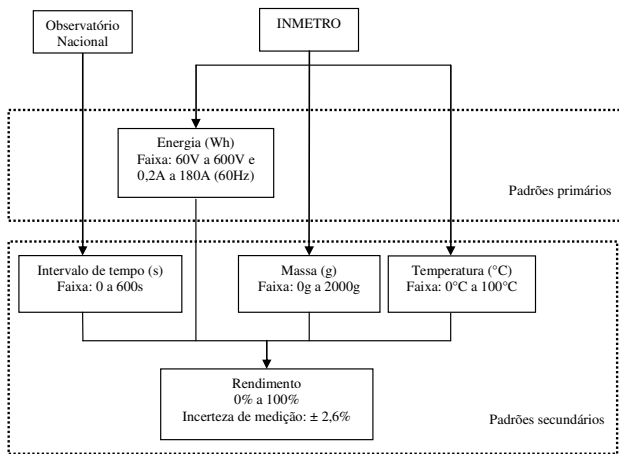
$$\frac{\partial \eta}{\partial m_c} = \frac{0,55 \cdot (T_2 - T_0)}{36 \cdot W_{in}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial W_{in}} = \frac{4,187 \cdot m_w \cdot T_2 - 4,187 \cdot m_w \cdot T_1 + 0,55 \cdot m_c \cdot T_2 - 0,55 \cdot m_c \cdot T_0}{36 \cdot W_{in}^2} \quad (12)$$

Tendo-se em vista o conhecimento das contribuições mais significativas para o processo, a seleção de rastreabilidade e capacidade de medição ficam delimitadas. A carta de rastreabilidade aplicada às referidas medições reflete cada um desses componentes.

## 4 CARTA DE RASTREABILIDADE

De acordo com [10] e [11] rastreabilidade refere-se à propriedade de um resultado de medição ou ao valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, por meio de uma cadeia de comparações, segundo uma hierarquia metrológica. Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia [7] a rastreabilidade relaciona o equipamento de medição aos padrões primários nacionais e internacionais, às propriedades ou constantes físicas básicas, ou materiais de referência, todas tendo incertezas estabelecidas. A figura 3 representa a carta de rastreabilidade aplicada aos ensaios da IEC 60705, com vistas aos resultados deste artigo.



**Figura 3 – Ilustração parcial da carta de rastreabilidade aplicada a IEC 60705**

Na figura 3 os padrões primários referem-se a medições realizadas por laboratórios do INMETRO, como o LAPEN para energia elétrica, bem como a medições realizadas pelo Observatório Nacional, para o mensurando intervalo de tempo. Os padrões secundários, por sua vez, provenientes dos primários citados, decorrem dos laboratórios do LABELO-PUCRS como executores, frente a sua capacidade de medição. Destaca-se que a faixa de medição de energia é estratificada em diferentes faixas de medição de potência, em que se baseiam medições para os valores de potência nominais de fornos de micro-ondas. Tal estratificação é necessária, visto as especificações de medição dos padrões secundários de potência.

## 5 CAPACIDADE DE MEDIÇÃO

A declaração do resultado de uma medição somente é completa se ela contiver tanto o valor atribuído ao mensurando quanto a incerteza de medição associada a este valor [8]. Tendo-se o resultado de uma medição como uma grandeza, a sua incerteza é definida como capacidade de medição. Quanto menor a incerteza de medição associada ao mensurando, melhor é a capacidade de medição [9] que um laboratório pode atingir no escopo da sua acreditação, tanto para ensaios como para calibração.

Quanto à capacidade de medição, as contribuições mais significativas de incerteza de medição associadas ao processo deste trabalho, tanto para a obtenção do valor de potência de saída (equação 3), quanto para o cálculo do rendimento (equação 6), são os parâmetros de temperatura,  $T_1$  e  $T_2$ . Isso é consequência da análise dos coeficientes de sensibilidade, por meio das derivadas parciais associadas aos parâmetros  $T_1$  e  $T_2$ , como foi relatado anteriormente pelas equações 8 e 9. Nota-se nas equações dos coeficientes de sensibilidade, que a energia de entrada está presente nos denominadores das derivadas parciais, o que facilita o entendimento da parcela de  $T_1$  e  $T_2$  que influencia na capacidade de medição.

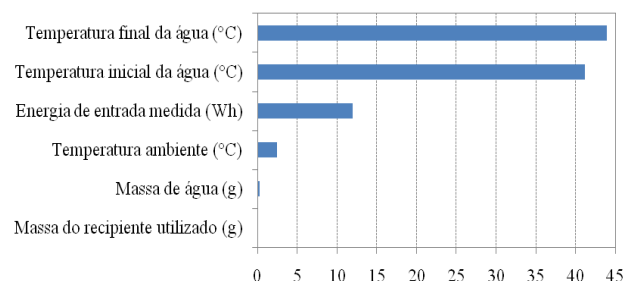
Para fins de simulação, serão utilizados os parâmetros abaixo nas equações 7, 8, 9, 10, 11, 12 para a análise da influência das temperaturas inicial e final da água durante o

ensaio. Alguns dos parâmetros assumidos consistem em recomendações<sup>\*</sup> constantes na norma IEC 60705.

- $m_W = 1000g$
- $m_C = 500g$
- $T_2: 20^\circ C$
- $T_1: 10^\circ C$
- $T_0: 23^\circ C$

Então, para os parâmetros citados, frente aos coeficientes de sensibilidade equacionados, são estimados os indicadores de contribuição que compõem a incerteza dos ensaios de eficiência conforme prescreve a IEC 60705. A figura 4 representa de forma relativizada tais indicadores.

**Contribuição das principais variáveis da incerteza de medição (%)**



**Figura 4. Contribuição de incertezas frente à capacidade de medição.**

A partir das informações da figura 4, constata-se que as contribuições de  $T_1$  e de  $T_2$  no processo de determinação da capacidade de medição da eficiência dos fornos de micro-ondas são as mais expressivas. Esses dois parâmetros representam cerca de 85% da capacidade de medição segundo a IEC 60705. Na tabela 2, encontram-se os valores da capacidade de medição estimados de acordo com a faixa de potência de saída nominal de fornos de micro-ondas.

**Tabela 2 – Capacidade de medição parcial associada à determinação de eficiência dos fornos de micro-ondas**

Faixa de potência de saída Fornos de micro-ondas	Incerteza de medição $\eta$ (%)
650 a 800 W	$\pm 2,5$
800 a 900 W	$\pm 2,6$

## 6 RESULTADOS

As informações apresentadas na tabela 2 são valores absolutos para os parâmetros descritos na seção 4.1 deste artigo. A tabela 3, por sua vez, estratifica as tolerâncias que podem ser utilizadas segundo as recomendações da norma IEC 60705.

**Tabela 3 – Tolerâncias aceitáveis pela norma IEC 60705.**

Mensurandos		Tolerâncias aceitas pela IEC 60705
Massa de água	$m_w$	1000g $\pm$ 5g
Temperatura final da água	$T_2$	20°C $\pm$ 2°C
Temperatura inicial da água	$T_1$	10°C $\pm$ 1°C
Temperatura ambiente	$T_0$	20°C $\pm$ 5°C

Para a análise efetiva de resultados, os parâmetros  $T_1$  e  $T_2$  merecem priorização, visto suas contribuições para a capacidade de medição em relação à medida de eficiência energética. Então, o valor da temperatura inicial da água disposta no recipiente,  $T_1$ , é variado entre os limites das tolerâncias descritas na tabela 3, de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , resultando um acréscimo máximo de 0,4% em relação ao valor de  $T_1$  a  $10^\circ\text{C}$ , como pode ser visto na tabela 4.

**Tabela 4 – Aplicação dos limites das tolerâncias da IEC 60705 para  $T_1$ .**

Faixa nominal de potência de saída de fornos de micro-ondas	Capacidade de medição da eficiência $\eta$ (%)	Capacidade de medição da eficiência $\eta$ (%)
	$T_1$ (9°C)	$T_1$ (11°C)
650 a 800 W	$\pm 2,9$	$\pm 2,8$
800 a 900 W	$\pm 3,0$	$\pm 2,9$

Analisadas as variações toleradas para  $T_1$ , é alterado o valor final de temperatura da água disposta no recipiente,  $T_2$ , nos limites das tolerâncias descritas na tabela 3, de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , resultando um acréscimo máximo de 0,5% em relação ao valor de  $T_2$  a  $20^\circ\text{C}$ , como pode ser visto na tabela 5.

**Tabela 5 – Aplicação dos limites das tolerâncias da IEC 60705 para  $T_2$**

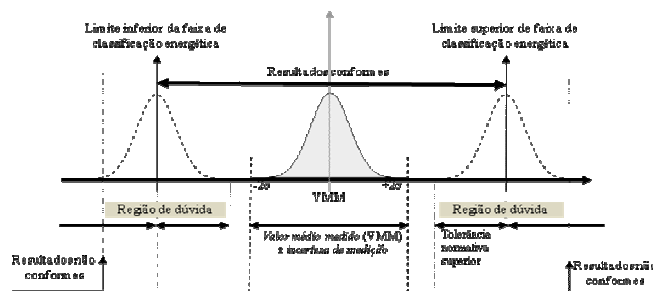
Faixa nominal de potência de saída de fornos de micro-ondas	Capacidade de medição da eficiência $\eta$ (%)	Capacidade de medição da eficiência $\eta$ (%)
	$T_2$ (18°C)	$T_2$ (22°C)
650 a 800 W	$\pm 2,9$	$\pm 3,0$
800 a 900 W	$\pm 3,0$	$\pm 3,1$

Com base nas tabelas 4 e 5, considera-se a alteração para os valores de  $T_1$  e  $T_2$  nos limites máximos e mínimos para as tolerâncias prescritas na norma em questão, como mostra a tabela 6.

**Tabela 6 – Aplicação dos limites das tolerâncias da IEC 60705 para  $T_1$  e  $T_2$**

Faixa de potência de saída Fornos de micro-ondas	Capacidade de medição da eficiência $\eta$ (%)	Capacidade de medição da eficiência $\eta$ (%)
	$T_1$ (9°C) $T_2$ (18°C)	$T_1$ (11°C) $T_2$ (22°C)
650 a 800 W	$\pm 2,8$	$\pm 2,9$
800 a 900 W	$\pm 3,0$	$\pm 3,1$

A tabela 6 descreve finalmente resultados de incerteza de medição considerando-se o tolerado por norma, no entanto, para apenas uma repetição de ensaios. Uma vez que a sistemática de ensaios apresenta características de repetibilidade deve-se também acrescentar às fontes de incertezas a contribuição do desvio padrão (análise tipo A) em relação ao número de ensaios realizados. Com isso aumenta-se a representatividade das medições e a confiabilidade de seus resultados. A figura 4 a seguir representa a região de dúvida atribuída aos resultados obtidos a partir da aplicação da norma e suas tolerâncias para uma escala de classificação energética.



**Figura 4 – Região de dúvida dos ensaios prescritos pela IEC 60705 mediante suas tolerâncias e uma escala de classificação energética**

A classificação energética é realizada em escalas alfabética de “A”, para o produto mais eficiente, até a letra correspondente ao produto menos eficiente. Neste caso, a metodologia de análise da região de dúvida representada pela figura 4 deve ser aplicada para cada escala de classificação energética.

## 5. CONCLUSÃO

Com base nos indicadores obtidos para a capacidade de medição, as conclusões deste trabalho indicam delimitações na infraestrutura mínima requerida para a instrumentação utilizada nos ensaios prescritos na IEC 60705. Neste caso destacam-se delimitações relacionadas aos equipamentos utilizados para medição das temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , que devem apresentar resultados de calibração com erros totais (limites de especificações) inferiores as suas tolerâncias de  $1^\circ\text{C}$  e de  $2^\circ\text{C}$ , respectivamente. Valores acima disso, atribuídos para de aprovação de padrões, comprometem o tolerado por norma, impactando no aumento da região de dúvida associada aos resultados dos ensaios, conforme representado pela figura 4.

Outro fator conclusivo associado a este trabalho refere-se à faixa de classificação energética atribuída aos fornos de micro-ondas, que por sua vez deve considerar a região de dúvida proveniente das recomendações da norma IEC 60705, adequando resultados que possam estar compreendidos nela. Com base nisso, a capacidade de medição deve ser um dos parâmetros de escolha e de qualificação de um laboratório de ensaios, pois melhorias ou adequações de um produto são realizadas com base em seus resultados.

## REFERÊNCIAS

- [1] CARVALHO, R. P. *Microondas*. 1ª edição. Editora livraria da Física, 2005.
- [2] SADIKU, M. N. O. *Elementos de eletromagnetismo*. 3ª edição. Editora Bookman, 2008.
- [3] POZAR, D. M. *Microwave engineering*. 3ª edição. Editora Wiley, 2005.
- [4] <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbeMetodologia.asp>. Acesso em 17 de abril de 2011.
- [5] <http://www.etrobras.com/elb/procel/main.asp?ViewID={974CF275-82FE-4483-8551-855F9A98A370}>. Acesso em 17 de abril de 2011.
- [6] IEC 60705-10. *Household microwave ovens - Methods for measuring performance*. Edition 4.0 2010-04. ISBN 978-2-88910-257-0.
- [7] Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). 1ª Edição Brasileira. Rio de Janeiro, 2009. 78 p. INMETRO. Disponível em [http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/VIM\\_2310.pdf](http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/VIM_2310.pdf). Acesso em 05 de julho de 2011.
- [8] Expressão da incerteza de medição. Norma NIT-DICLA-021, Revisão 04 de fevereiro de 2010. INMETRO. Disponível em [http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/DICLA/NIT/NIT-DICLA-21\\_04.pdf](http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/DICLA/NIT/NIT-DICLA-21_04.pdf). Acesso em 05 de julho de 2011.
- [9] Orientação para a expressão da melhor capacidade de medição nos escopos de acreditação de laboratórios de calibração - DOQ-CGCRE-011. Revisão 04 de fevereiro de 2010. INMETRO. Disponível em [http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-11\\_01.pdf](http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-11_01.pdf)
- [10] COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. *Controle Estatístico de Qualidade*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- [11] MORRIS, A. S. *Measurement and calibration for quality assurance*. New York: Prentice Hall, 1991. 336 p.