

Construção e avaliação de um monitor de combustão industrial

Lutero Carmo de Lima
lutero@uece.br

Antonio Roberto Menescal de Macedo
bobmacedo@unifor.br

Antonio Roberto Lins de Macedo
armtec@armtecbrasil.com

Edglei Marques
edgleimarques@yahoo.com.br

Resumo

Os monitores de combustão industrial disponíveis no mercado brasileiro são relativamente caros, com preços variando de R\$ 5.000,00 a R\$ 50.000,00, isto sem contar com os custos de manutenção periódica necessária. A proposta deste estudo é apresentar um monitor de combustão simples, de baixo custo, que não necessita de manutenção, e baseado na sonda Lambda dos motores dos automóveis. Foi montada uma câmara de combustão com a instalação da sonda Lambda, feitas as medidas da concentração de oxigênio nos gases de combustão e, quando comparadas com um monitor padrão, apresentaram desvios máximos de 10%.

Palavras-chaves: *Eficiência de combustão. Monitor de combustão. Sensor de combustão.*

Abstract

Industrial combustion monitors presently available at the Brazilian market are relatively expensive and their prices vary from R\$ 5.000,00 to R\$ 50.000,00, not mentioning the cost of the necessary periodical maintenance. The proposal of this study is to present a combustion monitor which is simple, of low cost, with no need of periodical maintenance and based on the Lambda sensor, a part of the modern automobile's engine. A combustion chamber was mounted with the installation of a Lambda sensor, measurements of the oxygen percentage at the flue gases were made and when compared to a standard monitor, a maximum deviation of 10% was found.

Keywords: *Combustion efficiency. Combustion monitor. Combustion sensor.*

1 Introdução

O controle da eficiência e emissão de poluentes na combustão industrial de qualquer energético pode ser realizado antes, durante ou depois da combustão propriamente dita (Wawrzinek e Trimis, 2001). No primeiro caso, para se determinar as características do combustível usado e assim pré-ajustar o processo de combustão, geralmente o que se faz é desviar uma pequena parcela do combustível para um calorímetro, e a partir daí, levantar a composição química do energético e com isto estabelecer a relação ar/combustível mais apropriada para a combustão. Este método é muito eficiente, porém muito dispendioso, e só é viável para os grandes complexos industriais, os quais investem pesadamente em tecnologia importada ou desenvolvida em seus centros tecnológicos como, por exemplo, o caso da Petrobrás. Nesta situação, os pequenos consumidores de energéticos convencionais ou alternativos ficam descartados.

O outro método de controle da combustão é aquele em que os parâmetros são monitorados durante a combustão, e as medidas da corrente elétrica de um sensor de ionização correlacionam a temperatura da chama ou a relação ar/combustível com a eficiência da combustão. Neste caso, o sinal de ionização não é dependente somente das características químicas do combustível mas também do calor gerado na combustão, desta forma, limitando a faixa de operação deste tipo de monitor. Esta tecnologia se encontra em fase de amadurecimento e ainda não está disponível para os consumidores em geral.

O controle da eficiência da combustão industrial feita após a combustão é aquele em que a relação ar/combustível pode ser determinada a partir da medida da concentração de oxigênio nos gases de combustão. Este processo, geralmente, é realizado nos automóveis por um sensor de oxigênio também chamado de sonda Lambda. A sonda ou o sensor Lambda usada em automóveis pode ser do tipo paramagnético, eletroquímico ou a base de dióxido de zircônio. Por ser uma tecnologia já bem amadurecida na indústria automobilística, ela se apresenta com potencialidades vantajosas para a sua

adaptação no setor industrial da combustão. No automóvel, o referido sensor trabalha próximo da estequiometria, porém na sua adaptação para a situação industrial este tipo de sonda deverá trabalhar em uma outra faixa de sinal, fora de seu projeto automobilístico, e é justamente aí que alguns laboratórios de pesquisa em combustão industrial na Alemanha, EUA e Suécia, vêm concentrando esforços no sentido de se dominar o conhecimento da sua operação na faixa em que ele será útil para a combustão industrial. A grande vantagem é que este tipo de sensor é disponível em qualquer casa de autopeças, barato e de tecnologia totalmente dominada. Só para se fazer um comparativo, hoje uma sonda Lambda simples é adquirida por 70 reais, com durabilidade de praticamente 7 anos em operação intermitente ou de 1 a 2 anos em operação direta. Os monitores de combustão custam de 5.000 a 50.000 reais, dependendo do tipo, e exigem manutenção anual, com trocas de células, manutenção esta que pode custar de 1000 a 3000 reais, dependendo das células saturadas, que precisam ser trocadas e a posterior recalibração a ser feita. Isto sem contar o tempo que o monitor irá ficar fora de operação devido ao seu envio para o exterior ou para a assistência técnica autorizada dos fabricantes estrangeiros, aqui no Brasil.

O objetivo do presente estudo foi a construção e avaliação de um monitor da combustão industrial visando um instrumento preciso, pouco dispendioso, de fácil calibração, manutenção ou reposição.

2 Revisão da literatura

Os sensores de oxigênio passaram a ganhar importância a partir de 1976, quando o estado da Califórnia, EUA, resolveu adotar medidas austeras para o controle da poluição automotiva. Hoje, trinta anos depois, a produção anual deste tipo de sensor, no mundo, chega a quase 200 milhões, voltados principalmente para o controle da injeção eletrônica nos automóveis modernos (Docquier and Candel, 2002). A Lamtec da Alemanha (Weber, 1998) foi a primeira empresa a apresentar um monitor de combustão com base na sonda Lambda especialmente desenvolvido para aplicações industriais. Unéus *et al.* (1999) usaram a sonda Lambda para medir teor de oxigênio na faixa de 12 até 15% visando aplicação em boilers industriais. Wiesendorf *et al.* (1999) usaram este tipo de sensor para o monitoramento de combustores de leite fluidizado. Pickenacker *et al.* (2000) determinaram experimentalmente o excesso de ar em boilers e fornalhas pela utilização do número de Wobbe o que, por sua vez, era determinado através de uma sonda Lambda. Auckenthaler *et al.* (2002) foram os primeiros pesquisadores a lançar um olhar sobre o comportamento transiente dos sensores Lambda. No Brasil, Pimenta *et al.* (2001, 2002) foram os primeiros pesquisadores a iniciar o estudo do comportamento de sensores Lambda para a determinação da eficiência de queimador industrial no Núcleo Tecnologia da Combustão da Universidade de Fortaleza – CE. Por se tratar de uma tecnologia em que muito ainda tem de se descobrir quanto ao comportamento de sensores eletroquímicos, que é o caso da sonda Lambda, Gibson *et al.* (1999) divisaram uma nova metodologia de se estudar este tipo de sensor, apresentando a possibilidade de uma vez excitado externamente o sensor vir apresentar sinal linear com a concentração de oxigênio. Mais recentemente, Varamban *et al.* (2005) apresentaram uma evolução na metodologia proposta por Gibson e colaboradores.

3 Princípio de operação e procedimento experimental

O sensor de oxigênio à base de óxido de zircônio consiste essencialmente de um par de eletrodos poroso de platina separado por uma camada de óxido de zircônio, conforme se vê na Fig. 1.

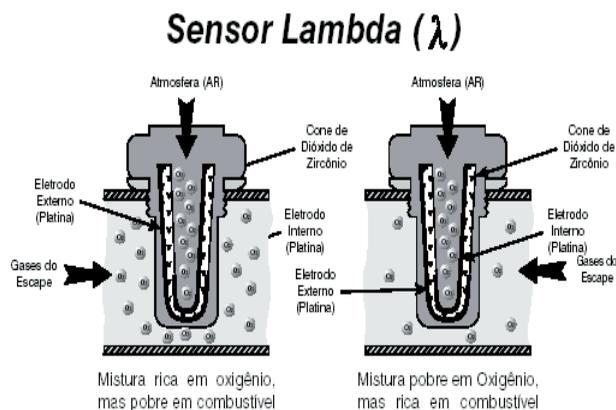


Figura 1: Estrutura esquemática de um sensor de oxigênio à base de óxido de zircônio.

À alta temperatura (acima de 300° C), a cerâmica sólida de zircônio passa a ser condutiva de íons de oxigênio. Quando esta cerâmica é exposta a dois níveis diferentes de oxigênio em ambos os lados da célula (por exemplo, ar ambiente e gases produtos de combustão), uma diferença de potencial é produzida. A diferença de potencial produzida é dependente das duas pressões parciais de oxigênio e da temperatura e pode, portanto, ser usada para se determinar a relação ar/combustível do sistema de combustão de interesse. Uma curva típica da voltagem de saída em função do fator lambda (também chamado de excesso de ar) de uma célula à base de oxido de zircônio é ilustrado na Fig. 2. Esta curva é diferente em cada temperatura entretanto em qualquer temperatura

apresentará o mesmo formato e irá exibir o mesmo tipo de queda brusca na condição de estequiometria. A diferença de potencial externa gerada relaciona-se com o teor de oxigênio do gás de combustão, com o teor de oxigênio do gás de referência e com a temperatura e é dada pela equação de Nernst

$$E = -\frac{RT}{zF} \ln \left[\frac{p(O_2)_{teste}}{p(O_2)_{ref.}} \right] \quad (1)$$

onde E é a diferença de potencial gerada entre os eletrodos da sonda, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura no elemento sensor da sonda, F é a constante de Faraday e z é o número de elétrons migrado de um eletrodo para o outro por cada molécula de oxigênio.

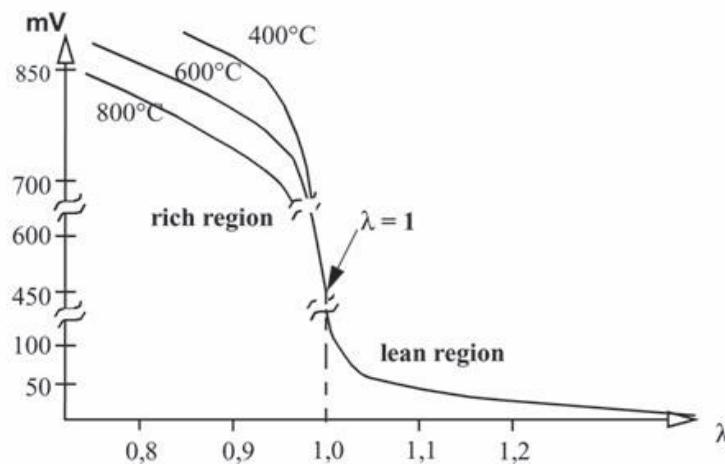


Figura 2: Curva típica de voltagem de uma sonda Lambda

Na condição estequiométrica (relação ar/combustível igual a 1, zero por cento de oxigênio), a queda brusca na voltagem de saída é insensível à temperatura do sensor. Este comportamento é usado nas aplicações automotivas para controlar a relação ar/combustível perto da condição estequiométrica nos motores equipados com conversores catalíticos. Estas sondas podem ser projetadas com aquecedores embutidos, para situações de combustão pobre, ou simples, sem aquecedor. A Fig. 3 apresenta os dois tipos de sonda. Sendo aquecido ou não, estes sensores são usados para medir a concentração relativa de oxigênio dos gases de combustão comparando com a concentração geralmente do ar ambiente. Como ilustrado na Fig. 2, a voltagem de saída quando atinge o valor de 0,8 V, representa que o sensor está em um ambiente em que os gases de combustão estão na condição “rica”, ou seja, deficientes de oxigênio ou com excesso de combustível, correspondendo a $\lambda = 0,6$. Quando $\lambda = 0,95$, a voltagem será de 0,75 V e haverá um joelho seguido de uma queda brusca na voltagem para aproximadamente 0,4 V quando $\lambda = 1$ ou condição estequiométrica. A curva característica é similar, porém os valores de voltagem em ambos os lados do sensor irão mudar dependendo da temperatura do sensor. Quando ocorrerem as condições de combustão “pobre”, ou seja $\lambda = 1,05$, a voltagem será de 0,15 V, a saída novamente irá passar por um joelho e irá nivelar a partir de $\lambda = 1,3$, e a voltagem atingirá 0,1 V. É esta situação de queima pobre da curva característica que é do maior interesse para o caso da combustão industrial. Nos automóveis, os sensores de oxigênio não aquecidos são instalados junto ao coletor e dependem do calor do motor para atingir a temperatura de operação. A temperatura muda com a potencia do motor e o sensor só pode ser usado na região onde o sinal do sensor apresenta a já dita queda brusca e é também onde a combustão se apresenta estequiométrica. Para ser útil na combustão industrial, o sensor deveria ser colocado em uma

região onde a temperatura seja relativamente constante. Em se usando o sensor lambda não aquecido, a sua localização deverá ser o mais próximo ou até mesmo dentro da câmara de combustão onde a faixa de temperatura de 480 até 870° C irá garantir o regime de operação do sensor. Um termopar é necessário para que a temperatura e a voltagem fornecida pela sonda sejam usadas para a determinação da concentração de oxigênio dos gases através da equação de Nernst.



Figura 3: Sondas Lambda

O sensor lambda automotivo aquecido usa um elemento elétrico com coeficiente de temperatura positivo que é projetado para manter o óxido de zircônio em sua faixa de alta condutividade. Uma das vantagens de se usar o sensor aquecido é a redução no tempo de aquecimento. Como no caso dos sensores não aquecidos este sensor (o aquecido) para o caso de aplicação automobilística somente é usado na região próxima da estequiométrica. No caso de aplicação no setor industrial, este tipo de sensor poderá ser instalado na chaminé. A Fig. 4 apresenta a saída teórica em milivoltagem, conforme a equação (1), da sonda Lambda em função da temperatura e do percentual de oxigênio, para as situações de combustão pobre.

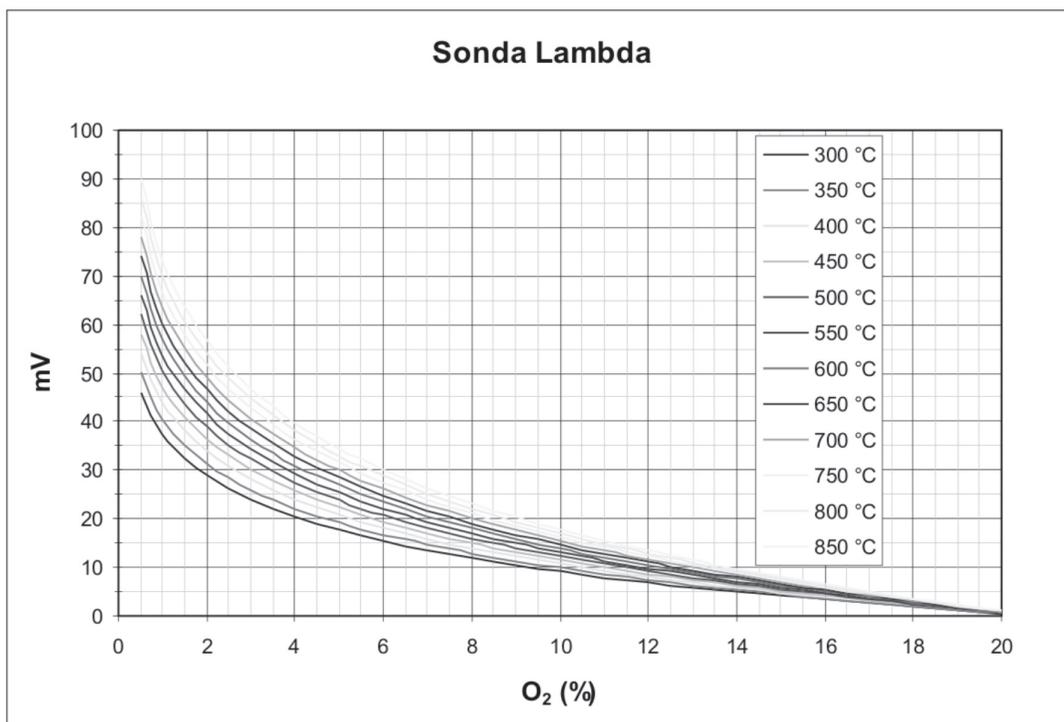


Figura 4: Milivoltagem teórica da sonda Lambda em função da temperatura

A fim de se avaliar a proposta, foi construída uma câmara de combustão de pequeno porte, conforme se vê na Fig. 5, adaptado junto à câmara um queimador de 50 kW da Weishaupt alimentado por uma linha de gás liquefeito de petróleo (GLP). Junto ao queimador, no interior da câmara, próximo à chaminé e na chaminé foram instalados em cada uma das três posições uma conjunto de uma sonda Lambda e um termopar do tipo K. O sinal em voltagem da sonda era adquirido pelo multímetro FLUKE 189, com resolução de 0,01 mV e precisão de $\pm 0,4\%$. Os controladores de temperatura acoplados a cada um dos termopares apresentam resolução de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e precisão de $\pm 0,5\%$. O percentual de oxigênio foi medido com o analisador de gás da Testo 300 XL, apresentando resolução de 0,1 % e precisão de $\pm 0,2\%$.



Figura 5: Montagem experimental e instrumentação da câmara de combustão

4 Resultados e análise

A Fig. 6 apresenta as medidas do percentual de oxigênio para diversas situações de combustão do gás liquefeito de petróleo contra as medidas fornecidas pelo monitor de combustão industrial ora em estudo. Os resultados apresentaram desvio máximo menor do que 10% em relação aos valores apresentados pelo analisador de gás de referência, isto considerando a faixa de interesse para a combustão industrial, ou seja, teores de oxigênio nos produtos de combustão menores do que 7%. O desvio médio de todo o conjunto das medidas esteve em torno de $\pm 4,7\%$. O fator de correlação para as medidas da Fig. 6 apresentou o valor de 0,97, demonstrando, assim, a boa concordância da resposta do monitor com a do analisador de gases usado como referência. Para percentuais de oxigênio acima de 15%, os valores medidos pelo monitor apresentam desvios acentuados (cerca de 10%) em relação aos valores medidos pelo instrumento de referência. A razão disto é demonstrada pela observação da Figura 4, em que a resposta da sonda Lambda, para qualquer temperatura da combustão, tende para valores muito próximos um do outro, em que as curvas tornam-se praticamente planas. Esta é a situação na qual a combustão industrial se torna inviável sob o ponto de vista econômico e poluidor. Portanto, não comprometendo a utilidade deste instrumento para o monitoramento da combustão industrial. Observa-se também na Figura 6 que para a situação em que o percentual de oxigênio medido pelo monitor de referência esteve menor do que 10%, situação esta em que a combustão industrial deveria sempre estar, o monitor de combustão ora em estudo apresentou desvios sempre menores do que 5%, demonstrando, assim, ser um instrumento com um bom nível de precisão. A partir de 10%, é que ocorrem desvios maiores, conforme salientado anteriormente. Se a saída em milivoltagem da sonda lambda fosse linear e não logarítmica, conforme se vê na equação (1), este tipo de anomalia seria minimizada. É justamente aí que a continuidade dos estudos deste instrumento se faz necessária. Os autores do presente artigo estão já estudando formas de estimular a sonda lambda no sentido de ela apresentar sinal em milivoltagem linear com o teor de oxigênio da combustão. A outra pesquisa que se deve fazer neste tipo de instrumento é sobre o seu tempo de aquecimento, normalmente da ordem de 10 a 15 minutos. Seria muito interessante que se divisasse uma maneira de se reduzir o tempo para ordem de segundos para que o sensor pudesse apresentar de maneira precisa um sinal relacionado com o percentual de oxigênio da combustão. Esta também é outra frente de pesquisa que os autores deste trabalho estão tomando.

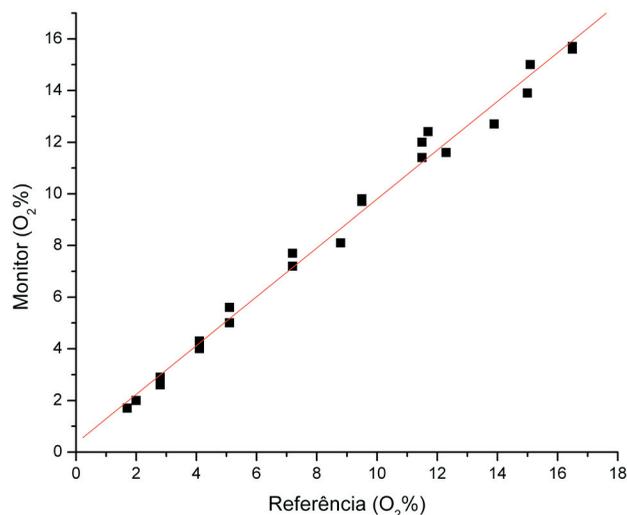


Figura 6: Percentual de oxigênio medido pelo monitor contra analisador de referência

A Fig. 7 apresenta a evolução da saída em milivoltagem do monitor de combustão como uma função do percentual de oxigênio medido pelo analisador de gases de referência, bem como apresenta a curva de ajuste representada pela equação de Nernst. De um modo geral, o ajuste dos pontos experimentais com a equação dada pela equação de Nernst, com exceção de 2 pontos, mostrou-se muito bom. A temperatura para o ajuste dos pontos experimentais com a equação de Nernst foi de 510 °C.

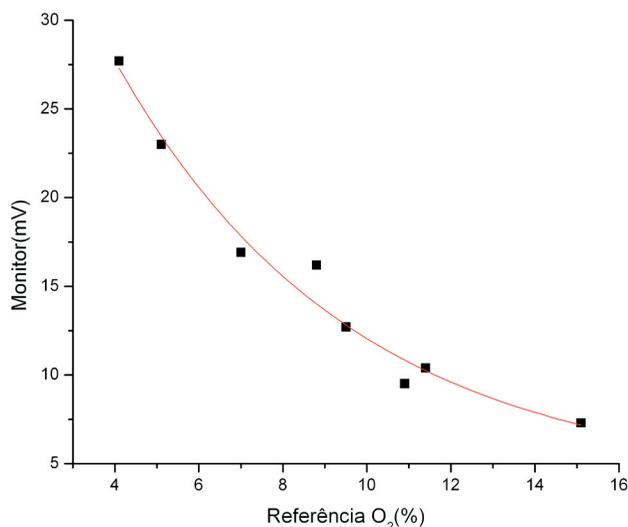


Figura 7: Saída do monitor como função do porcentual de oxigênio para T = 510 °C

5 Conclusões

Neste trabalho, foi apresentada a proposta da construção e avaliação de um monitor da combustão industrial simples, de fácil calibração e pouco dispendioso. Os resultados comprovaram a viabilidade do referido monitor de combustão industrial, apresentando desvio máximo de 10% nos teores de oxigênio para a faixa econômica da combustão industrial.

Apesar dos bons resultados apresentados pelo presente monitor, faz-se necessário o seu aprimoramento, principalmente no que se refere ao tempo de aquecimento (da ordem de 10 minutos) e à linearidade de sua resposta. São estas as propostas para os futuros trabalhos.

6 Agradecimentos

Um dos autores (Lutero Carmo de Lima) agradece ao CNPq por, através do Processo 401.090/2004-3, financiar toda a infra-estrutura, instrumentação e recursos necessários para a execução do presente projeto. O mesmo autor também agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ), através do Processo 304.929/2006-9. Os autores (excetuando Edglei Marques) agradecem à Fundação Edson Queiroz pela deposição do registro de patente do presente monitor.

Referências

- AUCKENTHALER, T. S.; ONDER, C. ; GEERING, H. P. Control-oriented investigation of switch-type air/fuel ratio sensor. In: IFAC WORLD CONGRESS, 15., 2002, Barcelona. *Proceedings...* Barcelona: Elsevier, 2002. p. 1-6. 1 CD-ROM.
- DOCQUIER, N.; CANDEL, S. Combustion control and sensors: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 28, n. 2, p. 107-150, 2002.
- GIBSON, R. W.; KUMAR, R. V.; FRAY, D. J. Novel sensors for monitoring high oxygen concentrations. *Solid State Ionics*, Boston, v. 12, n.1, p. 43-50, 1999.
- PICKENACKER, K.; TRIMIS, D.; WAWRZINEK, K. Excess air controlled operation of boilers and furnaces by means of Wobbe number measurement. EUROPEAN CONFERENCE ON INDUSTRIAL FURNACES AND BOILERS, 5., 2000, Porto. *Proceedings...* Porto: INFUB, 2000. v. 1, p. 1-11.
- PIMENTA, J. M. D. et al. Industrial burner testing and combustion efficiency analysis. CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D, EM PETRÓLEO E GÁS. 1., 2001, Natal. *Anais...*Natal: ANP, 2001. p. 233-238. 1 CD-ROM.
- PIMENTA, J. M. D et al. Industrial burners testing and combustion efficiency analysis. *Engenharia Térmica*, Curitiba, n. 2, p. 3-8, 2002. Edição Especial.
- UNEUS, L. et al. Evaluation of on-line hot flue gas measurements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID-STATE SENSORS AND ACTUATORS, 11., 2001. Munich, *Proceedings...* Munich: IEEE, 2001. p. 1754-1757. 1 CD-ROM.
- VARAMBAN, S. V.; GANESAN, R.; PERIASWAMI, G. Simultaneous measurement of emf and short circuit current for a potentiometric sensor using perturbation technique. *Sensors and Actuators B*, London, v. 104, n.1, p. 94-102, 2005.
- WAWRZINEK, K.; TRIMIS, D. Development of a Wobbe number sensor for controlled combustion of gaseous fuels with varying quality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGIES AND COMBUSTION FOR A CLEAN ENVIRONMENT (CLEAN AIR VI), 6., 2001, Porto. *Proceedings...* Porto: IEEE, 2001. p. 1-7. 1 CD-ROM.
- WEBER, H. Modern measurement, control and regulation technology for low pollutant furnace plants. Disponível em: <www.lamtec.de/Datenblatt/ModerneMess-E.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2007.
- WIESENDORF, V. et al. The CFB boiler in Gardanne: an experimental investigation of its bottom zone. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUIDIZED BED COMBUSTION, 15. Savannah, 1999. *Proceedings...* Savannah, 1999. 1 CD-ROM

SOBRE OS AUTORES

Lutero Carmo de Lima

Graduou-se em Física no ano de 1974 pela Universidade de Santo Amaro, mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1979) e Universidade de São Paulo (1986), respectivamente e pós-doutorado na Universidade de Miami, no Clean Energy Research Institute (1991). Atualmente ocupa o cargo de professor junto ao Curso de Física da Universidade Estadual do Ceará, onde atua em nível de graduação e pós-graduação, trabalhando também com problemas fundamentais das ciências térmicas, instrumentação e energias alternativas. Publicou dezenas de artigos em revistas e congressos nestes assuntos

Antonio Roberto Menescal de Macedo

Engenheiro Químico pela UFC, Especialista em Eng. de Petróleo pela PETROBRAS e Eng. de Segurança pela UNIFOR. Fellowship da UNIDO. Foi gerente de E&P da PETROBRÁS, Chefe do Laboratório de Química e Chefe do Setor de Segurança Industrial da ASFOR/PETROBRAS. Professor, Coordenador do Curso de Especialização em Eng. de Petróleo no CE/RN. Coordenador do Núcleo de Tecnologia da Combustão da UNIFOR. Detentor de dois depósitos de patente. Diretor Presidente e detentor dos prêmios: Petrobrás de Tecnologia, Finep, CNI e Werner von Siemens.

Antonio Roberto Lins de Macedo

Engenheiro Eletrônico pela Universidade de Fortaleza, detentor de 4 depósitos de patentes, Diretor Técnico de Pesquisa e Desenvolvimento e Fundador da ARMTEC Tecnologia em Robótica, detentor dos prêmios: Petrobrás de Tecnologia, Finep, CNI e Werner von Siemens. Coordenador de projetos em robótica submarina, combate a incêndios, recuperação de acidentados e de equipamentos do setor Petróleo – Pavimentação. Palestrante CYTED/IBEROEKA. Coordenador de Projetos FINEP, FUNCAP, APEX e membro da APEGCE/REDEPETROCE/PROMINP.

Edglei Marques

Licenciado em Física pela UECE e Mestrando em Ciências Físicas Aplicadas pela UECE. É professor de eletrônica no SENAI-CE.