

RESPOSTA DINÂMICA DE UM TRANSDUTOR INFRAVERMELHO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Leonardo Moreira Leódido

Universidade de Brasília – UnB. Campus Universitário Darcy Ribeiro Bloco F
lleodido@yahoo.com.br

João Nildo de Souza Vianna

vianna@unb.br

Alessandro Borges de Sousa Oliveira

vianna@unb.br

Resumo Transdutores de CO_2 infravermelhos do tipo NDIR são os mais utilizados na medição da concentração de CO_2 na atmosfera. O método NDIR é considerado padrão para esta aplicação. Entretanto há poucos trabalhos sobre os métodos de calibração e sobre a confiabilidade desses transdutores, pois atualmente só se usa a sua resposta estática. Conseqüentemente, os efeitos transientes do fluxo de CO_2 não são analisados, elevando a incerteza associada ao processo de medição. Diante disso este trabalho tem por objetivo apresentar uma nova metodologia para caracterizar o desempenho dinâmico dos transdutores de dióxido de carbono e determinar experimentalmente a sua função de transferência. Para alcançar este objetivo foi desenvolvido um dispositivo onde as variáveis que influenciam as medidas são controladas e a resposta dinâmica do transdutor pode ser avaliada.

Palavras-chave: Metrologia, Calibração Dinâmica, Transdutores de CO_2 .

1. INTRODUÇÃO

Medições recentes sugerem que a quantidade de CO_2 absorvido na fotossíntese é maior que a liberada pela respiração ou decomposição de matéria orgânica. Entretanto, florestas nativas foram retiradas dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto, sobre o argumento de que, como já estão formados os balanços de carbono seriam iguais a zero. Mas esta afirmação vai contra experimentos realizados que mostram que o saldo da absorção de CO_2 em florestas tropicais maduras é positivo.

Santos (1999) mostra experimentos realizados na região central da Amazônia e em Rondônia, onde as variáveis ambientais foram medidas por meio de uma torre e um balão cativo, e o fluxo de CO_2 foi calculado usando os métodos do Fluxo-Gradiente e da Correlação Turbulenta (Moncrieff e al., 1997). Os resultados indicam que a floresta funcionou como um sumidouro. Outros experimentos realizados na região de cerrado do estado de São Paulo, utilizando o método da Correlação Turbulenta, mostram uma variação de 0.1 a 0.3 toneladas por hectare por ano (Rocha e al., 2002). O Experimento de Grande Escala da Bio-Atmosfera na Amazônia (LBA) divulgou pelo LBA mostram resultados que indicam que a Amazônia absorve 0.8 a 7 toneladas de carbono por hectare por ano (Nobre, 2000).

Estes valores unitários são muito aquém das expectativas e extremamente dispersos. Quando se consideram os 4.000 milhões de hectares de florestas nativas, a quantidade líquida de carbono retida, nas condições mais conservadoras, pode equivaler a 10% de todo CO_2 lançado no planeta anualmente. Para calcular quantidade de carbono que é absorvida utiliza-se, além do fluxo de CO_2 , o cálculo da biomassa da floresta, cuja estimativa também apresenta uma enorme dispersão. Isso é

decorrente dos diferentes métodos de avaliação utilizados e das incertezas associadas aos sistemas de medição. Brown e al. (1995) mostram as dificuldades técnicas e as incertezas associadas ao cálculo da biomassa da floresta amazônica. Por exemplo, a incerteza associada às medições das variáveis de campo envolvidas no processo, pode ser grosseiramente estimada em $\pm 20\%$ sobre a média, para um intervalo de confiança de 95%.

O cálculo do fluxo de CO_2 envolve, basicamente, a medição em campo da concentração do dióxido de carbono e da direção e intensidade do vento, durante longas campanhas de medição. As maiores fontes de incerteza destas medições estão associadas às caracterizações metrológicas dos instrumentos e a efeitos dinâmicos, como flutuações do mensurando.

Analizando a caracterização metrológica dos instrumentos de medição, especificamente, os transdutores de concentração de CO_2 , verifica-se que há poucos trabalhos sobre a calibração. Normalmente avalia-se apenas a resposta estática dos instrumentos, por meio da passagem de um escoamento com concentração conhecida através do caminho ótico do transdutor. Este método é insuficiente para caracterizar o transdutor, uma vez que não fornece informações sobre a incerteza de medição. O método também não avalia as grandezas de influência e muito menos as características dinâmicas do transdutor. Consequentemente, o desenvolvimento de métodos de medição e calibração mais confiáveis e abrangentes torna-se fundamental para dar confiabilidade ao processo de medição. E é neste contexto que se insere esse trabalho que tem como objetivo propor um novo método de calibração que permita caracterizar o desempenho dinâmico de um transdutor de CO_2 , determinando experimentalmente a sua função de transferência.

2. BASE TEÓRICA

2.1 Movimento Mássico do CO_2 – Difusão Mássica

O transporte de CO_2 ocorre por meio de um processo de difusão mássica que é caracterizado pela lei da conservação de massa (equação 1).

$$\dot{M}_e + \dot{M}_g - \dot{M}_s = \frac{dM}{dt} \equiv \dot{M}_{AC} \quad (1)$$

Onde os índices e , g , s e AC representam, respectivamente, a massa que entra, que é gerada, que sai e que é acumulada dentro de um volume de controle. Considerando uma mistura binária da espécie A em B , o fluxo mássico (equação 2) é representado pela soma dos fluxos difusivo e convectivo.

$$\vec{n}_A = \vec{j}_A + \rho_A \cdot \vec{v} \quad (2)$$

Onde $\vec{j}_a$ é o termo difusivo (lei de Fick) e $\vec{v}$ é a velocidade média da mistura. Utilizando a equação 1 e considerando que não há acúmulo e geração de massa, e que o movimento mássico ocorre somente em uma direção, tem-se:

$$D_{AB} \cdot \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} - v \frac{\partial \rho_A}{\partial x} = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (3)$$

Onde D_{AB} é o coeficiente de difusividade binária e ρ_A é a concentração mássica da espécie A . Considerando que a velocidade mássica da mistura é suficientemente grande, de maneira que o termo difusivo possa ser desprezado (processo de convecção pura), a solução da equação 3 é:

$$\rho_{\text{CO}_2} = \rho_0 \cdot H \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (4)$$

Onde a função H representa um degrau de Heaviside. A partir da equação 4 foi construída a curva da variação de concentração para um ponto localizado a uma distância x da fonte de CO_2 , com uma concentração igual a 1% (figura 1).

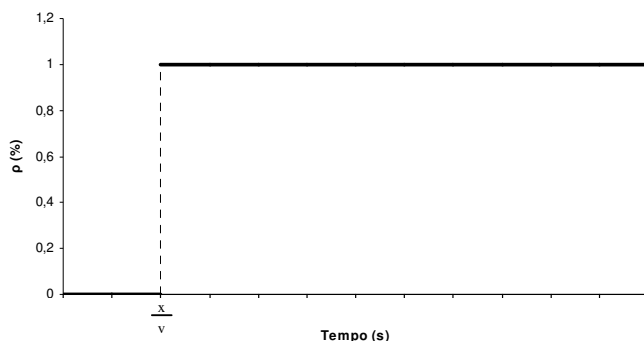


Figura 1 – Curva para a convecção pura.

Com base na solução analítica de um processo de convecção pura (equação 4 e figura 1), pode-se concluir que é possível gerar um degrau de concentração, para ser usado como padrão na calibração dinâmica de transdutores.

2.2. Caracterização do Transdutor

Nas medições ambientais da concentração de CO_2 o método mais utilizado é a espectroscopia molecular que utiliza interação entre a luz e as moléculas (Bennett, 1999). No caso do CO_2 a técnica padrão é a NDIR (Non-Dispersive InfraRed), que utiliza uma luz infravermelha (IR) para excitar as moléculas de CO_2 . Basicamente um transdutor do tipo NDIR é composto de uma fonte IR, filtro e fotodetector. Como é utilizada uma faixa de comprimentos de onda, os transdutores usam dois fotodetectores, um para detectar a intensidade do comprimento de onda específico do CO_2 (sinal ativo) e o outro para detectar a presença de outros gases (sinal de referência). Com isso a concentração é dada pela relação entre as respostas dos fotodetectores.

O transdutor utilizado no trabalho possui além dos fotodetectores e seus respectivos filtros, um termistor, a fonte IR e o tratamento eletrônico da resposta. Todos os componentes, com exceção da eletrônica, ficam dentro de uma cavidade ótica, que possui uma alta refletividade à radiação IR. O termistor tem a função de monitorar a temperatura no interior da cavidade ótica, e com isso corrigir o valor medido. A faixa de utilização do transdutor é de 0% a 5% de CO_2 .

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A calibração dinâmica consiste em determinar experimentalmente a função de transferência de um transdutor, através do estímulo com uma entrada conhecida, geralmente um degrau, além das características dinâmicas, como: constante de tempo, tempo de subida e tempo resposta. Inicialmente, os ensaios foram realizados com os dispositivos clássicos da metrologia dinâmica.

3.1 Ensaios com o Dispositivo de Abertura Rápida

O Dispositivo de Abertura Rápida (DAR) é um dos dispositivos clássicos, utilizado na de calibração dinâmica de transdutores de pressão de baixa frequência. O DAR é composto por duas câmaras, com razão entre os volumes da ordem de 1000, e um sistema de abertura rápida, que faz a comunicação entre as câmaras. Devido à razão entre os volumes das câmaras, o degrau gerado tem duração infinita (Fritsche, 2002; Oliveira, 2004).

Os ensaios com o DAR foram feitos em associação com o Laboratoire de Metrologie Dynamique da ENSAM-Paris (LMD). Para a execução dos ensaios foi necessária a realização de mudanças estruturais no DAR, para possibilitar a geração um degrau de concentração. As mudanças envolveram: a construção de uma nova câmara menor, a instalação de componentes para manter a mistura homogênea e controle da pressão.

Para determinar a função de transferência foram feitas montagens experimentais para gerar uma resposta do transdutor submetido ao processo de convecção pura, pois como observado na seção 2 a solução analítica desse processo é um degrau. Com isso foi instalado um ventilador que insuflava mistura dentro da câmara menor. Entretanto, os resultados mostraram que o tempo subida foi da ordem de 200 s, o que não caracteriza um degrau de concentração.

Analisando os resultados verificou-se que as características estruturais e geométricas do DAR foram os principais responsáveis pelo longo tempo de estabilização. A posição relativa das câmaras e a maior densidade do CO₂ em relação ao ar, dificultaram o processo de difusão do dióxido de carbono. Além disso, há estrangulamento na comunicação entre as câmaras, oferecendo uma resistência adicional ao processo de difusão.

Dessa forma, foi necessário o desenvolvimento de um novo dispositivo (figura 2) específico para a calibração de transdutores de concentração, que superasse as dificuldades encontradas no DAR e incorporasse as suas vantagens. O Novo Dispositivo é composto por uma câmara maior, uma menor e um sistema de abertura rápida capaz de gerar uma função degrau de concentração, sem interferência das diferenças de densidade e sem os efeitos negativos do estrangulamento entre a comunicação das câmaras. Este novo meio de calibração foi chamado de Dispositivo de Exposição Rápida às Emissões (DERE).

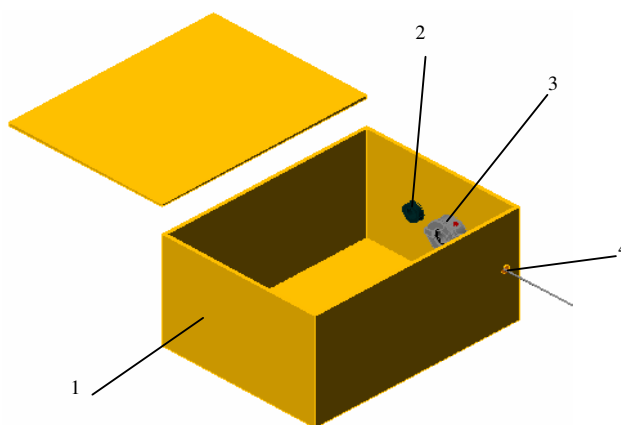


Figura 2. DERE: 1 – Câmara Maior; 2 – Transdutor da Câmara Maior; 3 – Câmara Menor e 4 – Sistema de Abertura.

3.2 DERE

3.2.1 Característica Estruturais

A câmara maior é um reservatório retangular construído em acrílico. Com isso pode-se o controlar a luminosidade, que é um dos parâmetros que pode influenciar na performance do transdutor. A pressão de trabalho do DERE é de ± 200 mbar, intervalo que abrange as pressões de utilização para a maioria das aplicações dos transdutores. A câmara menor (figura 3) é fixada ao DERE por uma peça cilíndrica de alumínio, onde foi fixado o sistema de abertura. A razão de volume entre as duas câmaras é cerca de 2000.

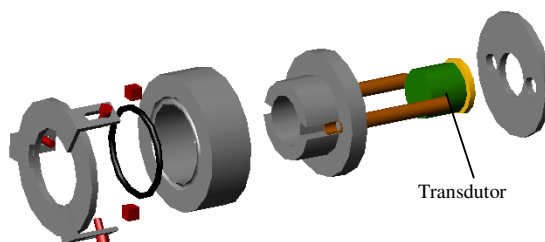


Figura 3 – Desenho esquemático da montagem da câmara menor.

O sistema de abertura consiste de uma haste com um êmbolo no meio, que é presa a um pistão pneumático e na ponta há um componente que fecha a câmara menor. O êmbolo da haste fica dentro de um cilindro fixado a parede da câmara maior, dessa forma o sistema pode ser acionado sem prejudicar o vedamento do DERE (figura 4).

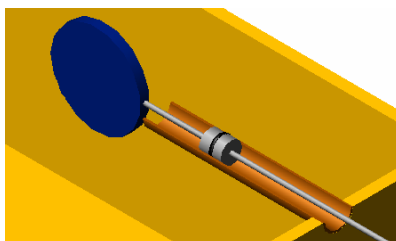


Figura 4 – Sistema de Abertura.

O pistão pneumático é controlado por uma válvula de três vias e a velocidade de abertura pode ser controlada, modificando a pressão que atua sobre o pistão (*1 a 6 bar*). O tempo de abertura da válvula para uma pressão de *4 bar* é de *70 ms*. O ventilador, no DERE, pode ser colocado em diferentes posições, com isso foi possível avaliar a influência do escoamento induzido, sobre a performance do transdutor.

Todos os dispositivos de controle do DERE foram instalados em uma bancada, onde é possível acionar o sistema de abertura, controlar a pressão, concentração, luminosidade, temperatura e velocidade do ventilador. A aquisição do sinal de resposta foi feita utilizando a saída analógica com o auxílio de um osciloscópio. A figura 5 mostra uma visão geral da bancada, com alguns destaques.

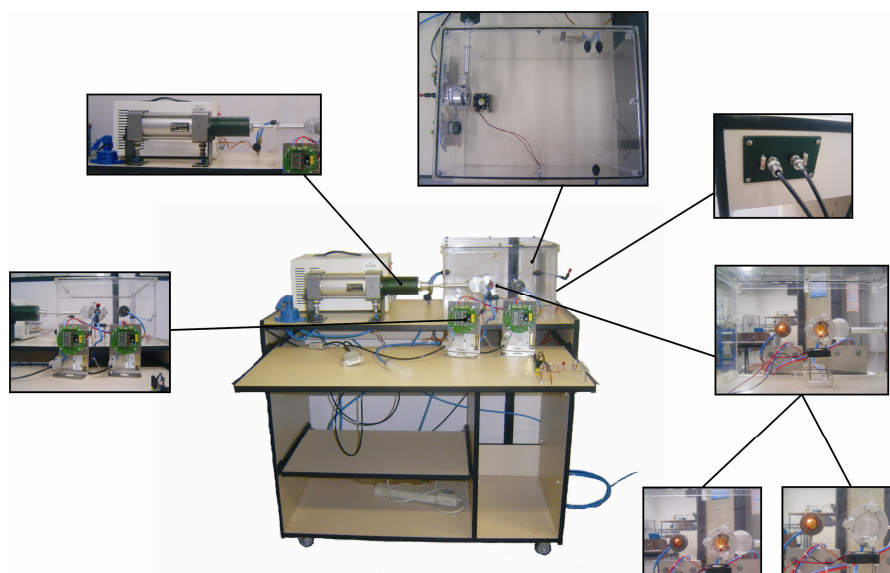


Figura 5 - DERE e bancada.

4. RESULTADOS COM O DERE

Como objetivo de caracterizar o degrau de concentração gerado e garantir a qualidade metrológica necessária para o uso em uma calibração, foram realizados 144 ensaios. Foram feitos testes com o ventilador em diferentes posições na câmara maior, variando-se concomitantemente a velocidade. Buscou-se assim estabelecer a melhor posição para que a desempenho do transdutor não fosse prejudicado.

Pela equação 4 verifica-se que para submeter o transdutor a um degrau de concentração é necessário aumentar a velocidade mássica da mistura, de forma que o termo difusivo possa ser desprezado. Para realizar esse processo o ventilador foi aproximado da câmara menor e a velocidade foi aumentada

Para aumentar a velocidade sem o bloqueamento eletrônico do transdutor, foi feito vácuo na câmara menor, antes que o sistema de abertura fosse acionado. Dessa forma utilizando o ventilador e vácuo considerou-se para o cálculo da função de transferência, que o transdutor foi submetido a um degrau perfeito. A figura 6 mostra a média de quatro ensaios realizados com a melhor montagem de posição, ventilador e vácuo.

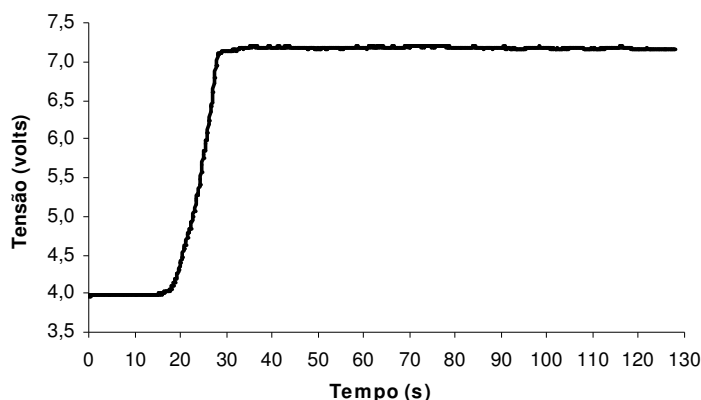


Figura 6 – Resposta dinâmica do transdutor de CO₂.

O tempo de subida para a resposta mostrada na figura 7 é de 8 s, representando uma significativa melhora em relação aos ensaios realizados no DAR. Os valores das outras características dinâmicas são: constante de tempo é de 9 s e o tempo de resposta é de 10 s.

A função de transferência do transdutor foi calculada utilizando o programa RFreq, desenvolvido pelo Laboratório de Metrologia Dinâmica da Universidade de Brasília – LMD/UnB (Villa, 2000). O método utilizado pelo programa é o da derivação. Foi considerado que a combinação de vácuo e ventilador foi suficiente para garantir que, a consideração feita para uma convecção pura foi satisfeita. A figura 7 mostra a função de transferência (magnitude e fase).

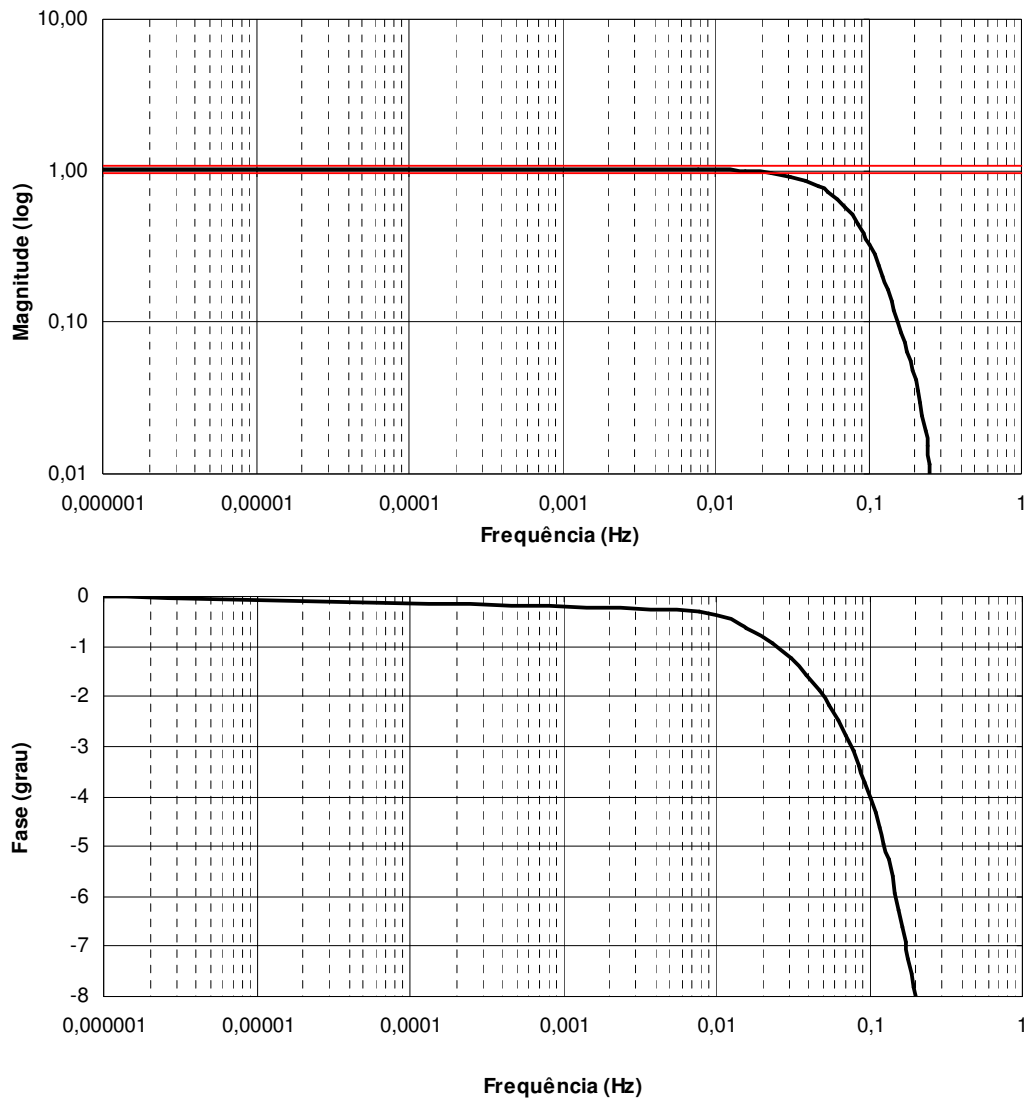


Figura 7 – Função de transferência e fase.

Analisando a figura 7 observa-se que para uma banda passante de $\pm 5\%$, o transdutor terá um comportamento linear até a frequência de $0,02 \text{ Hz}$, isso significa que em situações onde a taxa de amostragem do mensurando seja maior que $0,02 \text{ Hz}$, o transdutor apresentará uma resposta amortecida e defasada.

5. CONCLUSÕES

Embora os aspectos metodológicos estejam em processo em desenvolvimento sujeito, portanto a discussões e reflexões que conduzam a seu aperfeiçoamento, pode-se concluir que:

- O modelo teórico de difusão é adequado para representar o processo físico que ocorre no interior do DERE;
- O movimento mássico no DERE, para um processo de convecção pura pode ser modelado pela equação 4, permitindo calcular a função de transferência tendo como entrada solução analítica. Entretanto utilizar um estudo numérico do processo de convecção pura como entrada para o cálculo da função de transferência, pode tornar o resultado melhor, uma vez que reduzirá a incerteza associada às considerações feitas;

- c) Os resultados experimentais mostram que o dispositivo desenvolvido é adequado para caracterizar o desempenho dinâmico do transdutor de CO₂, fornecendo informações características para análise no domínio temporal e frequência.

6. REFERÊNCIAS

- Bennett, M., 1999 “Air Pollution Measurement”, Measurement Instrumentation Sensors Handbook, Chapitre 73.2, CRC Press.
- Brown, F.; Matinelli, L.A.; Thomas, W.W.; Moreira, M.Z.; Ferreira, C.A.C. and Victoria, R.A., 1995 “Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: An example from Rondônia, Brazil”, Forest Ecology and Management 75, pp. 175-189.
- Fritsche, E. Q., 2002 “Influência do Gas de Trabalho na Resposta em Frequência do Dispositivo de Abertura Rápida para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão”, Tese de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Incopera, F.P. and Witt, D.P., 1998 “Fundamentos de Transferência de Calor e Massa”- LCT, Rio de Janeiro.
- Moncrieff, J.B.; Massheder, J.M.; Bruin, H. De; Elbers, J.; Friborg, T.; Heusinkveld, B.; Kabat, P.; Scott, S.; Soegaard, H. e Verhoef, A., 1997 “A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide”, Journal of Hydrology, 188-189, pp. 589-611.
- Nobre, C.A., 2000 “Amazonian Tropical Forests: Carbon Source or Sink?”, Understanding and Capturing the Multiple values of Tropical Forests, Tropenbos International, pp. 43-48.
- Oliveira, A.B.S., 2004 “Contribution à l'étalonnage dynamique des capteur de pression Modélisation de l'estimation de l'incertitude associée”, Thèse de Doctorale - Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métier, Paris, France.
- Rocha, H.R. da; Freitas, H.C.; Rosolem, R.; Juárez, R.I.N.; Tannus, R.N.; Ligo, M.A.; Cabral, O.M.R. and Dias, M.A.F.S., 2002 “Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensus stricto) in southeast Brasil”, Biota Neotropica, vol. 2 (n1), pp. 1-11.
- Santos, E.O. dos, 1999 “Contribuição ao Estudo do Fluxo de Dióxido de Carbono dentro da Floresta Amazônica”, Tese de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.
- Villa, C., 2000 “RFreq”, Tese de Mestrado, UnB.

DYNAMIC RESPONSE OF AN INFRARED CO₂ TRANSDUCER

Leonardo Moreira Leódido

Universidade de Brasília – UnB. Campus Universitário Darcy Ribeiro Bloco F
lleodido@yahoo.com.br

João Nildo de Souza Vianna

vianna@unb.br

Alessandro Borges de Sousa Oliveira

abso@unb.br

Abstract: *The infrared CO₂ transducers are used in the measurement of the atmospheric CO₂ concentration. The method NDIR is considered standard for this application. However, it has few works on the calibration methods and the reliability of these transducers, currently the static response is used. In consequence the transient effects of the CO₂ flux are not analyzed, raising the uncertainty associated with the measurement process. This work aims at presenting a new methodology to characterize the dynamic performance of carbon dioxide transducers, and to experimentally determine its transference function. To achieve this goal, a device has been developed in which the variables influencing the measures are controlled, allowing the transducer's dynamic response to be assessed.*

Key-words: *Metrology, Dynamic Metrology, CO₂ Transducers.*