

# Estudo do potencial de aplicação de um sensor de baixo custo para medição de metano em áreas urbanas

## Ensaio Preliminares

(1) Leonardo Campestrini Furst  
Escola Superior de Agrária  
Instituto Politécnico de Bragança  
Bragança, Portugal  
leonardofurst@gmail.com

(3) Laercio Mantovani Frare  
Departamento de Ciências Biológicas e Ambientais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Medianeira, Brasil  
laercio@utfpr.edu.br

(2) Manuel Feliciano  
Centro de Investigação de Montanha (CIMO), ESA,  
Instituto Politécnico de Bragança  
Bragança, Portugal  
msabenca@ipb.pt

(4) Getúlio Igrejas  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Instituto Politécnico de Bragança  
Bragança, Portugal  
igrejas@ipb.pt

**Abstract**— *Methane is one of the most important greenhouse gases present in the atmosphere. Its concentration in the atmosphere has grown rapidly in the last centuries, mainly due to anthropogenic activities. It is also the largest constituent of natural gas and its transport in the urban environment is performed by an extensive pipeline network, which may have leakages due to hydraulic fittings and the material that are constituted. In this work the TGS2600 sensor was used to analyze the potential application of a low cost sensor for measurement of methane at low concentrations in the urban environment. The sensor showed a high dependence on temperature and humidity and compared to other sensors used in the study, the TGS2600 showed a good response to the presence of methane.*

**Keywords**—*Methane; Gas sensor; Low Cost; Greenhouse Gases.*

**Resumo**— *O metano é um dos principais gases de efeito de estufa presente na atmosfera. A sua concentração na atmosfera cresceu rapidamente nos últimos séculos decorrente principalmente de atividades antropogénicas. Também é o maior constituinte do gás natural, cujo transporte em ambiente urbano é realizado por uma extensa rede de tubulações, que podem apresentar fugas em virtude dos acessórios hidráulicos e do material que os constituem. Neste trabalho fez-se uso do sensor TGS2600 para analisar o potencial de aplicação de um sensor de baixo custo para medição de metano a baixas concentrações no ambiente urbano. O sensor demonstrou ter uma elevada dependência da temperatura e humidade e comparativamente a outros sensores utilizados no estudo o TGS2600 apresentou uma boa resposta à presença de metano.*

**Palavras-chave**—*Metano; sensor de gás; baixo custo; gases de efeito de estufa.*

### I. INTRODUÇÃO

Grande parte do aumento da temperatura média do ar, ocorrida nos últimos duzentos anos, teve como causa atividades humanas e, conseqüentemente, a elevação das concentrações na atmosfera dos denominados gases de efeito de estufa, dos quais

se destacam o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Tais gases possuem a característica de absorverem a radiação reemitida pela superfície terrestre, localizada na gama dos infravermelhos, reduzindo a percentagem de radiação que é devolvida para o espaço e amplificando o efeito de estufa [1].

Dos gases de efeito de estufa, o  $\text{CH}_4$  é o terceiro gás mais importante [2-3]. Possui um tempo de vida de 12 anos com um Potencial de Aquecimento Global (PAG) 86 vezes maior que o  $\text{CO}_2$  para um horizonte de 20 anos e de 34 vezes para um horizonte de 100 anos [4]. Adicionalmente o  $\text{CH}_4$  é um dos percursores da formação de ozono troposférico ou superficial, que atua como um forte oxidante prejudicando a saúde humana e o ambiente [5-6].

Entre os anos de 1750 a 2011 ocorreu um aumento da concentração global de metano num fator de 2,5 vezes, devido principalmente a atividades antropogénicas, como a criação de gado; a expansão das culturas de arroz; as emissões gasosas de aterros sanitários e a extração, produção e utilização de combustíveis fósseis. Estima-se ainda que 30% das emissões totais – antropogénicas e naturais – são provenientes de fugas geológicas e perdas na cadeia de produção de gás natural [4].

Em Portugal a utilização de gás natural iniciou-se no ano de 1997 com vista à produção de energia e utilização industrial. Posteriormente teve-se a expansão do serviço para o setor comercial, agrícola e doméstico. Todo o gás utilizado no país é importado da Argélia, transportado por navios metaneiros, não existindo qualquer estação de extração e produção. Neste contexto, a cadeia de produção de gás natural Portuguesa envolve apenas os estágios de transporte, armazenamento e distribuição. Anualmente, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), em respeito ao Protocolo de Quioto e à Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, publica um inventário nacional dos gases de efeito de estufa contendo a quantificação das emissões antropogénicas e remoções de gases de efeito de estufa em Portugal, incluindo as

emissões de metano do setor de gás natural [7]. Na Figura 1 encontram-se representadas as emissões de metano para Portugal referentes ao período de 1997 a 2015. Nela é possível observar que as maiores emissões envolvem a etapa de distribuição, que consiste basicamente na rede de tubulações e equipamentos hidráulicos que realizam o transporte entre as empresas distribuidoras e o consumidor final [8].

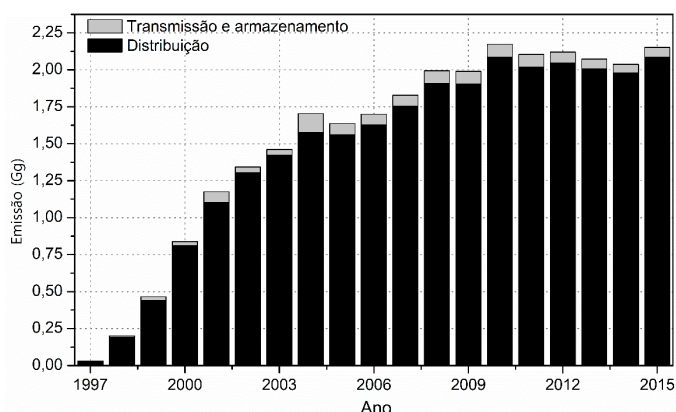


Figura 1 - Emissões de metano na cadeia de produção de gás natural de Portugal, contabilizadas desde 1997, ano em que se iniciou a utilização de gás natural [7].

A elevada quantidade e variedade de acessórios hidráulicos presente nos gasodutos, como ligações, flanges e válvulas possuem uma elevada probabilidade de apresentar perdas de gás, devido principalmente a uniões entre os acessórios e vedações que muitas vezes não garantem o isolamento total do sistema, constituindo pontos frágeis do mesmo [9-10].

Vazamentos e rompimentos na rede urbana de distribuição de gás natural podem gerar graves acidentes, que podem ir desde graves explosões a sérias lesões em pessoas ou danos nas estruturas públicas e particulares. Neste sentido, a análise de risco sobre esse sistema e a quantificação de vazamentos é de extrema importância para evitar que estes acidentes ocorram [11].

Estudos realizados nas ruas das cidades de Washington e Boston nos Estados Unidos [12-13], identificaram um elevado número de vazamentos de metano na rede de distribuição urbana de gás natural, associados principalmente à presença de tubulações antigas fabricadas com ferro fundido. Adicionalmente, vazamentos geram grandes perdas económicas e contribuem consequentemente para o aumento dos custos de utilização de gás natural pelos consumidores finais, para além dos custos ambientais e do risco para as pessoas [12-13].

Várias tecnologias são utilizadas na detecção de poluentes atmosféricos. Os mais tradicionais envolvem métodos óticos, colorimétricos e cromatográficos (e.g. espectrometria de massa, a espectrometria de absorção atómica e a cromatografia gasosa). Normalmente, estes métodos necessitam de equipamentos dedicados de grandes dimensões, de elevado custo, operação complexa e, geralmente, uma preparação da amostra para análise, mas que garantem resultados de elevada fiabilidade. Além destes, utiliza-se frequentemente sensores NDIR (*nondispersive infrared*), TDLAS (*tunable diode laser absorption spectroscopy*), catalíticos e semicondutores para a medição de gases, nomeadamente o CH<sub>4</sub> [14-16]. Nenhuma destas tecnologias garante a resolução pretendida para o estudo,

visto que a maioria dos sensores disponíveis comercialmente não possuem gama de medição específica para baixas concentrações. Existem, no entanto referências na literatura científica sobre a possibilidade de utilização de sensores semicondutores na medição de concentrações muito baixas de metano [2,17]. Este facto aliado ao custo reduzido, às suas pequenas dimensões e à sensibilidade indicadas na literatura contribuíram para a seleção do sensor no âmbito deste trabalho. É, no entanto, importante realçar que estes sensores apresentam algumas limitações de funcionamento que requerem cuidados especiais na fase de projeto. Desde logo, observa-se normalmente uma baixa reprodutibilidade das medições e uma instabilidade no sinal, causada principalmente por alterações na estrutura do sensor em virtude do envelhecimento, aquecimento e/ou decorrente de reações químicas com compostos diferentes das substâncias alvo do sensor. Em alguns casos apresentam ainda uma dependência da temperatura e da humidade relativa [15-16].

Neste trabalho estudou-se o potencial de aplicação de um sensor de baixo custo para medição das concentrações de gás metano na cidade de Bragança, avaliando a sua sensibilidade na presença de metano e analisando o seu comportamento com a variação da temperatura e humidade ao longo do tempo. Também são apresentados os resultados de alguns testes preliminares qualitativos realizados.

## II. METODOLOGIA

### A. Descrição e caracterização do sistema

O sistema desenvolvido (Figura 2) é baseado na plataforma Arduino (Arduino Mega) e integra: um sensor de metano de baixo custo (TGS2600), um sensor de temperatura, um sensor de humidade relativa, um sensor barométrico, um módulo GPS e um módulo de comunicações GSM/GPRS. Além disso foram incorporados outros dois sensores de metano (TGS2611 e TGS6811) para efeitos de comparação e da possibilidade da sua utilização como sensores alternativos/complementares. Apesar de os sensores serem passivos, instalou-se um ventilador para forçar o ar ambiente a circular sobre os mesmos.

A plataforma Arduino Mega trata-se de uma plataforma de código aberto (*open source*) permitindo o desenvolvimento de diversas aplicações de *software* e *hardware*. Em relação a outras plataformas de prototipagem rápida do mesmo fabricante, o Arduino Mega possui a vantagem de conter maior número de portas de entrada/saída - 54 entradas digitais, 16 analógicas - permitindo consequentemente a conexão com um maior número de periféricos. A placa é baseada no microcontrolador Atmega2560 de 8bits e 256 KB de memória flash para armazenamento do código. As entradas analógicas estão conectadas a um conversor Analógico/Digital (A/D) com uma resolução de 10bits, podendo operar a diversas tensões de referência, internas ou externas [18-19].

A escolha recaiu no TGS2600 porque apresenta uma gama de detecção para o metano abaixo dos 100 ppm, considerada ideal para o estudo proposto e confirmada pelos resultados obtidos nos estudos realizados em Washington [13] e Boston [12], os quais apresentaram valores de concentração de metano no ambiente urbano na gama de 2,5 a 90 ppm.

Complementarmente Eugster e Kling [17], utilizaram este mesmo sensor em medições das concentrações de metano no lago Toolik, no Alasca, verificando que o sensor foi capaz de identificar concentrações de metano atmosférico abaixo dos 2 ppm.

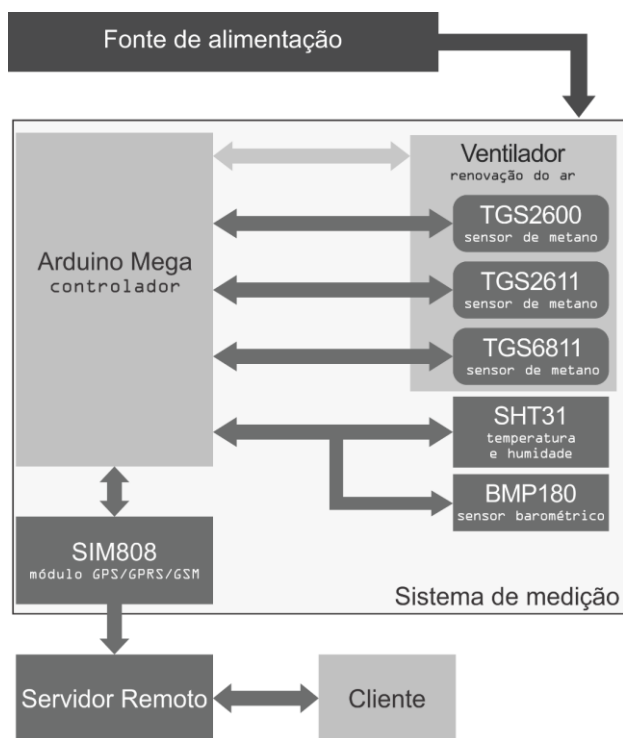


Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de medição apresentando o sistema completo e as relações entre as partes.

O TGS2600 é um sensor de baixo consumo e alta sensibilidade para os gases metano, monóxido de carbono, iso-butano, etano e hidrogénio. O sensor é um dispositivo semiconductor baseado em óxidos metálicos, possuindo como material de detecção o dióxido de estanho ( $\text{SnO}_2$ ) e uma resistência de aquecimento fabricada a partir do dióxido de ruténio ( $\text{RnO}_2$ ) [20]. Esta resistência é responsável pelo aquecimento do sistema a uma temperatura elevada à qual a detecção do gás é possível de ser realizada, em resultado das alterações de resistência provocadas no detector. A temperatura ideal para a detecção do metano encontra-se nos  $400^\circ\text{C}$  e para o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) nos  $90^\circ\text{C}$ . A medição simultânea dos dois gases requer ciclos termostáticos de aquecimento e arrefecimento do sensor para atingir a temperatura ideal [21].

A detecção de gases por este sensor baseia-se em variações no valor da resistência originadas por reações químicas – adsorção, oxidação, difusão - que ocorrem entre a superfície do eléctrodo e o ar ambiente. Com o aumento da temperatura, ocorre a adsorção do oxigénio atmosférico sobre a superfície cristalina do eléctrodo na forma de íões  $\text{O}_2^-$ , formando uma espécie de barreira que impede a circulação de electrões, aumentando a resistência do sistema. Conforme o sensor é exposto ao gás de interesse, ocorre uma reacção de oxidação envolvendo o gás e o ião  $\text{O}_2^-$  de modo a libertar o ião óxido que estava ligado à superfície, aumentando o fluxo de electrões e diminuindo a resistência do sensor [22-23]. Na Figura 3 é apresentado o circuito utilizado para o estudo.

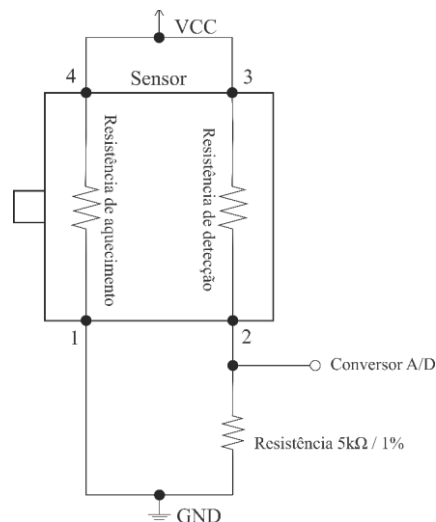


Figura 3 – Circuito utilizado no estudo. Utilizou-se uma resistência de precisão de  $5\text{k}\Omega$  como referência para conversão do sinal de tensão em resistência.

Com o intuito de verificar o comportamento do sensor e analisar a possibilidade de utilização como elemento sensorial foram testados dois outros sensores de baixo custo que apesar da indicação do fabricante como potencialmente inadequados na gama de concentração de interesse deste trabalho, também se encontram indicados em alguns trabalhos como tendo sido capazes de realizar medições de baixas concentrações de metano. Foram eles o TGS2611-C00 e o TGS6810. O TGS2611-C00 é um sensor semiconductor sensível ao etanol, hidrogénio, iso-butano e metano, enquanto que o TGS6811 é um sensor catalítico sensível ao metano, iso-butano e propano.

Para a mensuração da temperatura e humidade do ar utilizou-se o sensor Sensirion SHT31-D de elevada precisão e sinal de baixo ruído. O sensor é capaz de realizar medições de temperatura na gama de  $-40^\circ\text{C}$  a  $125^\circ\text{C}$  com uma resolução de  $0,015^\circ\text{C}$  num tempo de resposta mínimo de 2s. Em relação à humidade a gama de medição encontra-se entre 0 e 100% com uma resolução de 0,01% e um tempo de resposta de 8s. Apesar da gama de temperatura e humidade apresentadas, o fabricante recomenda para aquisição de resultados com maior precisão a operação do sensor em temperaturas entre 5 a  $60^\circ\text{C}$  e humidade entre 20 a 80% [24]. A utilização deste sensor justifica-se pela necessidade de compensação do sensor de metano TGS2600 com a variação da temperatura e humidade indicadas pelo fabricante na sua ficha de especificações técnicas.

A pressão atmosférica foi medida por meio do sensor barométrico BMP180 de baixo consumo e pré-calibrado. O sensor opera a temperaturas entre  $-40$  e  $85^\circ\text{C}$ , com precisão elevada na gama de 0 a  $65^\circ\text{C}$ . Possui uma resolução de 0.01 hPa e precisão de  $\pm 0.12$  hPa com tempo de resposta que varia entre 3 a 17 ms em função da resolução desejada [25].

Para aquisição da posição geográfica e para a comunicação do dispositivo com o servidor remoto, recorreu-se a o módulo SIM808 GPS/GPRS/GSM, o qual integra um sistema GPS e tecnologia de comunicações móveis GPRS/GSM que permite, com a utilização de um cartão SIM, o envio de dados por meio da rede móvel para um servidor remoto. O módulo GSM pode funcionar nas bandas de frequência de 850/900/1800/1900 MHz e o GPS possui 66 canais de aquisição e 22 de rastreamento

proporcionando uma precisão horizontal menor que 2,5 m - erro circular provável [26].

**B. Testes preliminares**

As leituras dos sensores de metano foram realizadas através do conversor A/D integrado na plataforma usando uma tensão de referência de 5V e uma taxa de amostragem de 2s. Os dados dos sensores foram recolhidos com igual período de amostragem recorrendo à porta de comunicação digital SPI do dispositivo.

Os testes realizados visaram avaliar a capacidade de o sensor medir metano em ambientes de concentrações reduzidas, bem como a sua dependência em relação à temperatura e humidade referidas pelo fabricante. Neste sentido, foram realizados ensaios de calibração com concentrações conhecidas de metano e no estábulo de ovinos da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança. A seleção do estábulo é justificada por se considerar a presença de metano nestes locais, resultante da acumulação de dejetos sobre a superfície. Os resultados obtidos por Vac *et al* [27] referem um fluxo médio de metano para dejetos de ovinos de 3.782 g.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> com a utilização de uma câmara estática.

O ensaio de calibração foi realizado, por meio da utilização de um padrão de metano de 744 ppm e de ar de diluição 21% de oxigénio e 79% de azoto. Para a mistura dos gases nas diferentes concentrações utilizou-se o sistema de calibração MCZ-MK5. Com esses dados foi possível a construção da curva de calibração, apresentada na Figura 5, a qual foi usada posteriormente para a conversão dos valores de resistência em concentração de metano (ppm).

No estábulo foram conduzidos ensaios no dia 20 de abril de 2017 com duração de 35 minutos e início às 15:55, usando apenas o sensor TGS2600, e no dia 21 entre as 13:45 e 14:45 utilizando todos os sensores de metano disponíveis. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6 e 7. Para estes testes optou-se por apresentar os resultados normalizados relativamente ao valor máximo obtido durante o período de ensaio. Isto deve-se a, há data dos ensaios, não existir informação que permitisse a calibração do sensor, pelo que qualquer indicação de valor da concentração seria afetado de erro. Atendendo a que nesta fase, o objetivo era aferir a sensibilidade ao metano, a representação dos dados nesta forma permite cumprir com este objetivo.

**III. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O ensaio completo de calibração encontra-se na Figura 4, na qual se pode observar a variação da resistência do sensor com as mudanças da concentração do metano. É possível perceber que o valor da resistência sofreu alterações mesmo quando a humidade e temperatura se mantiveram constantes, indicando uma resposta do sensor ao metano. Com o ensaio de calibração, foi possível construir uma curva de calibração relacionando o valor médio da resistência do sensor para o período da medição a cada concentração. Os resultados dos valores médios da resistência em função da concentração de metano e a equação de ajuste são apresentados na Figura 5.

Como o sensor não responde linearmente a alterações na concentração de metano, aplicou-se um ajuste logarítmico,

obtendo-se um elevado coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), indicador que a equação resultante possui elevada representatividade para o fenómeno.

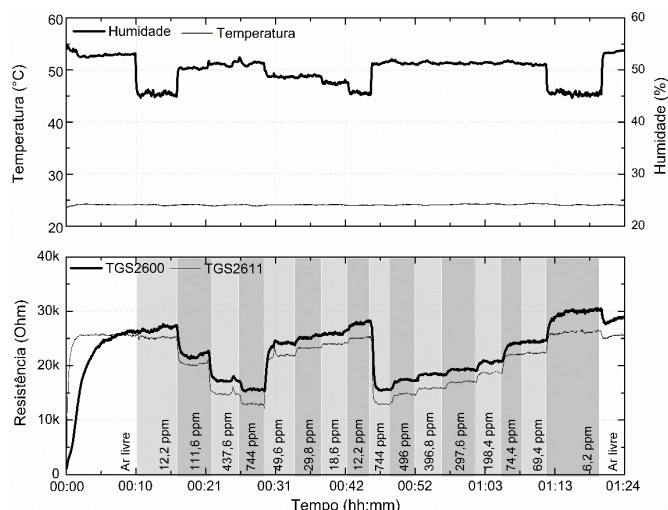


Figura 4 – Ensaio completo de calibração com a evolução da temperatura e humidade ao longo do tempo para cada concentração usada.

As amostragens no estábulo são apresentadas nas Figuras 6 e 7. Na Figura 6 apresentam-se os resultados obtidos pelo TGS2600. Após a fase de arranque, necessária para promover o aquecimento do sensor, o sistema foi colocado ao ar livre durante um período de 5 minutos. Após este período aproximou-se o sensor da fonte de metano resultando numa elevação do sinal. O sensor foi mantido durante alguns minutos no interior do estábulo e aos 16 minutos foi novamente posicionado ao ar livre por um período de cerca de 10 minutos. Durante este período o sensor voltou aos valores inicialmente apresentados para o mesmo local. Nos testes realizados, identificou-se um tempo de regeneração do sensor que variou entre 3 e 8 minutos. Após a recuperação do dispositivo, repetiu-se o ciclo de amostragem no estábulo., verificando-se novamente a elevação do sinal, desta vez com níveis superiores aos observados na primeira medição. Acredita-se que a variação do sinal observada entre os dois ciclos foi causada pela instabilidade da atmosfera dentro do estábulo, uma vez que a produção de metano não é uniforme sobre a superfície e as instalações possuem aberturas que promovem a circulação do ar de maneira não homogénea.

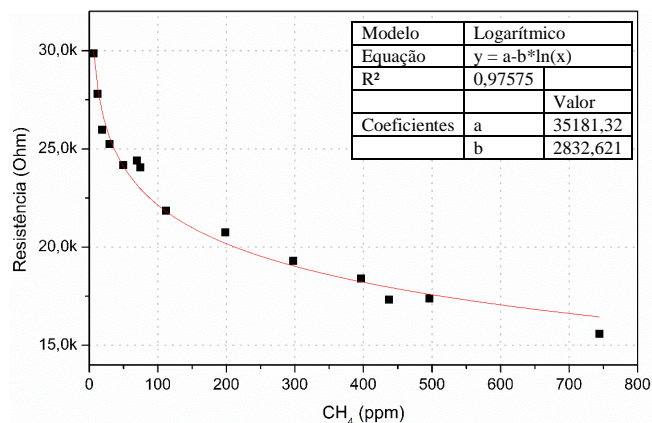


Figura 5 – Curva de calibração da reta baseada no modelo logarítmico para o sensor TGS2600.

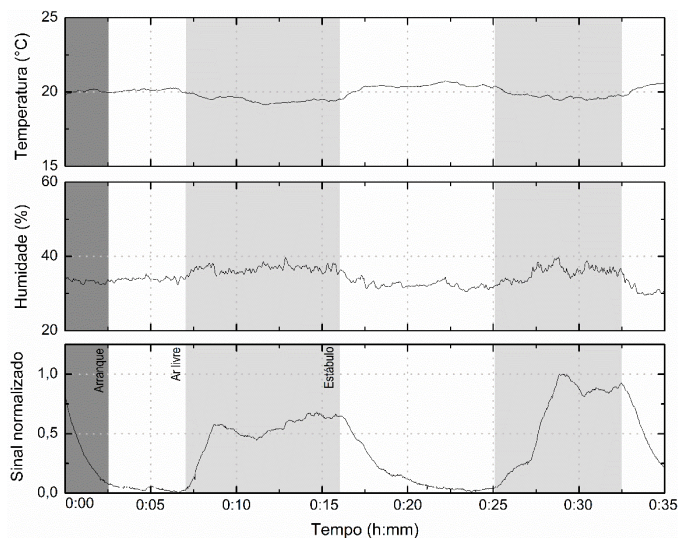


Figura 6 – Ensaio realizado com o TGS2600 no dia 20 de abril, com a identificação dos intervalos de amostragem no estábulo e ao ar livre e as variações de temperatura e humidade relativa do ar.

No ensaio com todos os sensores no estábulo (Figura 7), a aquisição de dados foi realizada em ciclos de exposição ao ar livre e exposição a atmosfera do estábulo. Percebe-se que os três sensores de metano apresentaram comportamento semelhante com elevação do sinal ao aproximar o sistema do estábulo.

Sendo o foco no trabalho sobre o sensor TGS2600 os dados obtidos com os ensaios durante o teste de calibração foram convertidos para concentração (ppm) utilizando a equação de ajuste obtida durante o ensaio de calibração. Na Figura 8 foram organizados os dados de concentração reais e medidos.

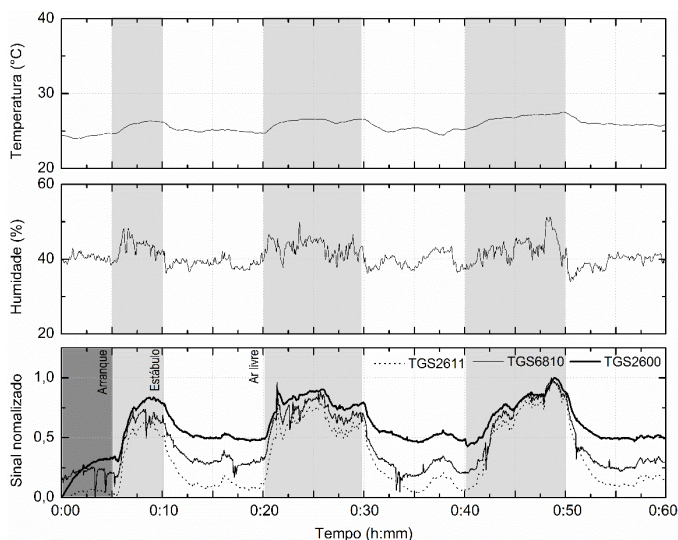


Figura 7 – Ensaio realizado no estábulo utilizando os sensores TGS2600/2611/6810 durante o período de uma hora em conjunto com a humidade relativa e temperatura medidas no local.

Para concentrações mais elevadas – acima dos 400 ppm - o sensor possui uma resposta divergente do valor real com erro médio percentual de 28%, enquanto que para concentrações baixas encontrou-se valores mais próximos do real, obtendo-se um erro médio percentual de 19,5%. Ressalta-se que esses valores não possuem qualquer compensação, de modo que a

discrepância entre os valores reais e medidos pode ser reduzida com a aplicação de um algoritmo de compensação para a temperatura e humidade. Essa etapa é essencial para a aplicação final do sensor.

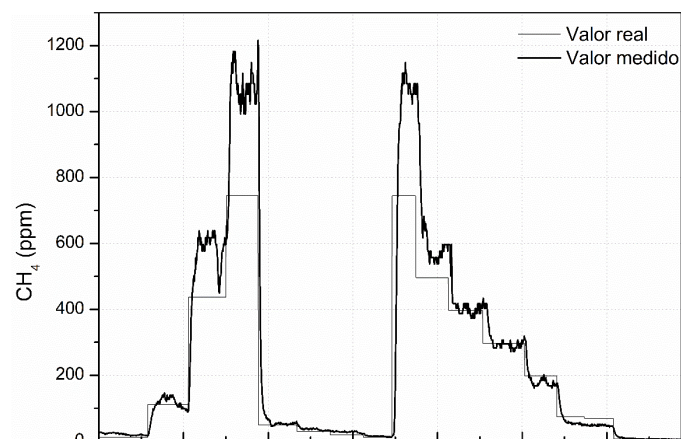


Figura 8 – Comparação entre os valores reais e os valores medidos pelo sensor.

Como o sensor possui uma resposta logarítmica, para concentrações inferiores a 400 ppm a curva de calibração possui maior coeficiente angular de modo que pequenas variações na concentração para essa gama, geram uma diferença maior no valor da resistência, aumentando a resolução do sensor. Nessa gama, percebeu-se uma resolução média do sensor de 5,42 ppm, sendo ainda possível melhorar a resposta do sensor com a redução da tensão de referência e com a utilização de um conversor A/D com maior resolução.

Acima dos 400 ppm, pequenas variações na concentração conduzem a baixas variações na resistência e, conseqüentemente, à redução da resolução do sensor. Assim, nesta gama, observou-se uma resolução do sensor de 11,60 ppm de metano. Esse comportamento vem a favor do especificado pelo fabricante, que indica o uso do TGS2600 para baixas concentrações.

Esse ponto torna-se também uma vantagem para a aplicação do sensor, visto que no trabalho de Jackson et al [13], foi constatado uma concentração máxima de metano no ambiente urbano de 88,6 ppm, dentro da gama na qual o sensor possui menor erro e maior resolução.

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentou-se um sistema de baixo custo para a medição de metano em áreas urbanas com vista à sua aplicação no estudo das perdas associadas à rede de armazenamento e distribuição de gás natural na região de Bragança. O sistema incorpora tecnologia de geolocalização e transmissão de dados que permitem registrar e visualizar em tempo real as leituras efetuadas e, deste modo, realizar o mapeamento das perdas.

Para a medição do metano foram realizados ensaios com recurso a três sensores de baixo custo, habitualmente usados em sistemas de alarmes baseados em *thresholds* pré-definidos. Seguindo a indicação de outros autores quanto à possível utilização destes sensores para medições a baixas concentrações, foram realizados ensaios ao ar livre e ensaios em local com

metano – estábulo de ovinos. Os ensaios realizados permitiram confirmar a sua sensibilidade ao metano e confirmar uma possível utilização no âmbito do estudo deste trabalho. Permitiram ainda avaliar a dependência da temperatura e humidade para posterior introdução de uma compensação do resultado em relação a estas variáveis e assim minimizar os erros de medida.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da empresa Envienergy que disponibilizou o equipamento necessário para o ensaio de calibração do sensor; ao Professor José António Correia Silva e a Adriano Henrique pela assistência durante os ensaios em laboratório.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. C. Serreze and J. A. Francis, “The Arctic Amplification Debate,” *Clim. Change*, vol. 76, no. 3, pp. 241–264, 2006.
- [2] M. van den Bossche, N. T. Rose, and S. F. J. De Wekker, “Potential of a low-cost gas sensor for atmospheric methane monitoring,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 238, pp. 501–509, 2017.
- [3] D. J. Wuebbles and K. Hayhoe, “Atmospheric methane and global change,” *Earth-Science Rev.*, vol. 57, no. 3, pp. 177–210, 2002.
- [4] IPCC, *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [5] EMEP, “Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe in 2003,” Norway, 2005.
- [6] J. J. West, A. M. Fiore, L. W. Horowitz, and D. L. Mauzerall, “Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 103, no. 11, pp. 3988–93, Mar. 2006.
- [7] APA-Agência Portuguesa do Ambiente, “Portuguese National Inventory Report, 1990 - 2015,” Amadora, 2017.
- [8] M. Hamed, R. Zanjirani Farahani, M. M. Husseini, and G. R. Esmailian, “A distribution planning model for natural gas supply chain: A case study,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 3, pp. 799–812, 2009.
- [9] U. S. E. P. Agency, *Equipment Leaks of VOC in Natural Gas Production Industry: Background Information for Proposed Standards*. 1983.
- [10] X. Gao *et al.*, “Natural gas pipeline leak detector based on NIR diode laser absorption spectroscopy,” *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 65, no. 1, pp. 133–138, 2006.
- [11] Z. Y. Han and W. G. Weng, “Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 189, no. 1, pp. 509–518, 2011.
- [12] N. G. Phillips *et al.*, “Mapping urban pipeline leaks: Methane leaks across Boston,” 2013.
- [13] R. B. Jackson *et al.*, “Natural Gas Pipeline Leaks Across Washington, DC,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 3, pp. 2051–2058, Feb. 2014.
- [14] Z. Yunusa, M. N. Hamidon, A. Kaiser, and Z. Awang, “Gas sensors: A review,” *Sensors and Transducers*, vol. 168, no. 4, pp. 61–75, 2014.
- [15] X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, and H. Ning, “A survey on gas sensing technology,” *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 7, pp. 9635–65, 2012.
- [16] S. Capone *et al.*, “Solid State Gas Sensors: State of the Art and Future Activities,” *ChemInform*, vol. 35, no. 29, Jul. 2004.
- [17] W. Eugster and G. W. Kling, “Performance of a low-cost methane sensor for ambient concentration measurements in preliminary studies,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 5, no. 8, pp. 1925–1934, Aug. 2012.
- [18] Arduino, “Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560,” 2017. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>. [Accessed: 25-Mar-2017].
- [19] Arduino, “What is Arduino?,” 2017. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>. [Accessed: 25-Mar-2017].
- [20] Figaro, “Technical information for TGS2600,” 2012. [Online]. Available: <http://www.figarosensor.com/products/2600Dtl.pdf>. [Accessed: 25-May-2017].
- [21] E. Cordos *et al.*, “Methane and Carbon Monoxide Gas Detection system based on semiconductor sensor,” in *2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 2006, vol. 2, pp. 208–211.
- [22] E. Comini, G. Faglia, and G. Sberveglieri, “Electrical-Based Gas Sensing,” in *Solid State Gas Sensing*, E. Comini, G. Faglia, and G. Sberveglieri, Eds. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 1–61.
- [23] D. Richter and H. Fritze, “High-Temperature Gas Sensors,” in *Gas Sensing Fundamentals*, C.-D. Kohl and T. Wagner, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 1–46.
- [24] Sensirion, “Datasheet SHT3x-DIS,” 2017. [Online]. Available: [https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/2\\_Humidity\\_Sensors/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHT3x\\_Datasheet\\_digital.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital.pdf). [Accessed: 26-Apr-2017].
- [25] BOSCH, “BMP180 Digital pressure sensor,” 2015. [Online]. Available: [https://ae-bst.resource.bosch.com/media/\\_tech/media/datasheets/BST-BMP180-DS000-121.pdf](https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMP180-DS000-121.pdf). [Accessed: 29-Apr-2017].
- [26] SIMCom, “SIM808 Hardware Design,” 2015. [Online]. Available: [http://simcom.ee/documents/SIM808/SIM808\\_Hardware\\_Design\\_V1.02.pdf](http://simcom.ee/documents/SIM808/SIM808_Hardware_Design_V1.02.pdf). [Accessed: 10-May-2017].
- [27] S. C. Vac, G. E. Popita, N. Frunzeti, and A. Popovici, “Evaluation of Greenhouse Gas Emission from Animal Manure Using the Closed Chamber Method for Gas Fluxes,” *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca*, vol. 41, no. 2, pp. 576–581, 2013.