

# Componentes Inovadores para Sistemas Embarcados



Autor:

Vinícius Esperança Mantovani

Componente estudado: PASCO2V01 - XENSIV™ PAS CO2 sensor (Desenvolvedor: Infineon)

## Motivação:

É sabido por muitos, quase que por senso comum, que a poluição do ar, no geral, representa uma ameaça à saúde humana. No entanto, o que se discute com menos frequência e que foge do senso comum, é quais são possíveis gases poluentes e como eles afetam diretamente a saúde das pessoas. Nesse sentido, para se entender a proposta apresentada neste projeto, é necessário compreender, em especial, as consequências que as altas concentrações de CO2 (dióxido de carbono/gás carbônico) podem causar aos seres humanos, o que são altas concentrações e, finalmente, como evitá-las.

No contexto apresentado, conforme discutido no artigo 6 das referências, pode-se notar uma consequência muito relevante durante os anos de pandemia relacionada à alta concentração de gás carbônico: o aumento do risco de contaminação pelo vírus da COVID-19. Considerando-se, no entanto, esse risco como um entre muitos e como, portanto, um exemplo ilustrativo do problema do CO2 em concentrações exageradas, pode-se expandir a discussão em questão para problemas mais gerais e corriqueiros.

Conforme referência do site do Departamento de Serviços de Saúde de Wisconsin (Wisconsin Department of Health Services, 7 nas referências), alguns dos sintomas observados em pessoas expostas a concentrações altas de dióxido de carbono no ar são (acompanhados das concentrações em que ocorrem):

- 1,000–2,000 ppm: nível comumente associado a reclamações de sonolência e baixa qualidade do ar;
- 2,000–5,000 ppm: nível associado a dores de cabeça, cansaço (sono) e ao ar estagnante. Supressão de capacidades de concentração e atenção, aumento da frequência dos batimentos e náusea também podem acontecer.
- 5,000 ppm: nível que pode significar condições extremas do ar, indicando possível presença de outros gases em alta concentração. Esse é o limite máximo para condições de trabalho (já muito precárias), podendo apresentar grau alto de toxicidade a seres humanos.

Dadas as informações acima, pode-se perceber superficialmente que o problema do gás carbônico em excesso em ambientes fechados é diretamente observável. Ainda assim, como forma de embasamento de parte do que citado anteriormente quanto às capacidades perdidas por conta da exposição à altas concentrações do gás em questão, apresenta-se abaixo um esquema, retirado do

artigo 2 nas referências, que mostra o desempenho de pessoas expostas a diferentes concentrações de dióxido de carbono na execução de diversas tarefas.

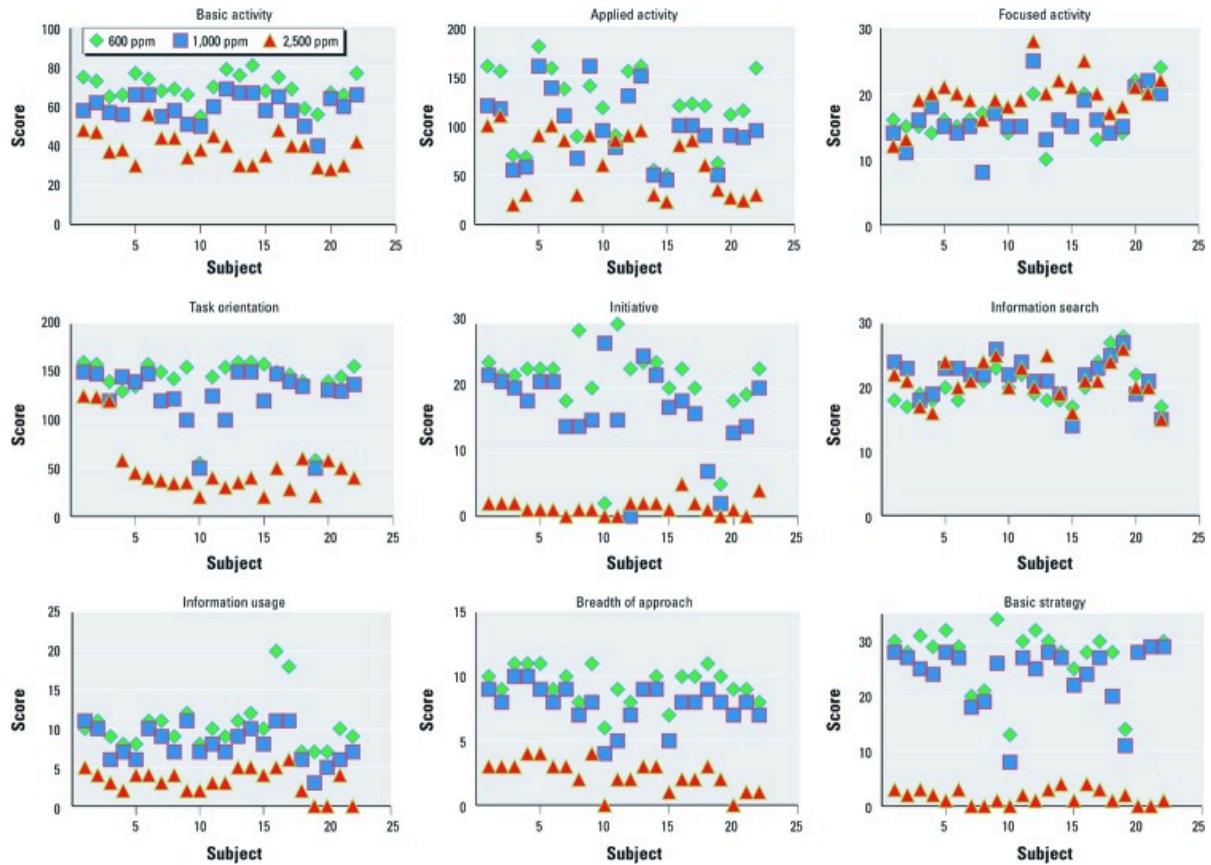


Figura 1: Plot de pontuações individuais com condição de concentração de CO<sub>2</sub> para cada medida de performance em tomada de decisão (22 sujeitos).

Na Figura 1 acima, nota-se claramente a queda de rendimento das pessoas quanto maior a concentração de CO<sub>2</sub> nos ambientes pelos quais passaram durante o período do experimento. Por motivos como esse, para além da descarbonização da atmosfera que deve ser promovida pelos mais diversos agentes no mundo, é necessário, também, o controle da concentração de gás carbônico nos mais diferentes ambientes internos possíveis, principalmente naqueles em que pessoas passam muito tempo (ambientes de trabalho e casa, por exemplo).

Em meio ao contexto apresentado, reconhecendo os malefícios de concentrações altas de CO<sub>2</sub> para os humanos, este projeto visa a criar uma ferramenta de controle dessas concentrações em ambientes internos, como forma de melhorar as condições de saúde do maior número de pessoas possível. Para tanto, conforme se disserta em detalhes adiante, é proposto um sistema embarcado que acompanhará dispositivos de rotatividade de ar (um ar condicionado, por exemplo) emitindo sinais de alerta de altas concentrações de CO<sub>2</sub> e controlando os dispositivos aos quais são embarcados para que corrijam o problema, aumentando o fluxo de ar no local.

### Componente Inovador utilizado no projeto:

Como uma maneira de permitir o sensoriamento de concentrações de CO<sub>2</sub> pelo sistema embarcado proposto neste relatório, o componente inovador a ser utilizado é o sensor “XENSIV™ PAS CO<sub>2</sub>” da Infineon. Esse sensor apresenta características inovadoras entre os sensores disponíveis no mercado. A mais inovadora delas é o fato de ter dimensões sem precedentes, extremamente

pequenas, o que permite sua aplicação em sistemas bastante reduzidos. Além disso, como um complemento muito desejado, é um componente que traz confiabilidade e dados de alta qualidade de medição para ambientes fechados (como os que o projeto se propõe a tratar).

O sensor em questão tem seu funcionamento baseado em espectroscopia acústica, por isso, pode ter seu tamanho extremamente reduzido, com dimensões de  $14 \times 13.8 \times 7.5 \text{ mm}^3$ . Em adição a isso, possui ainda uma acurácia “ $\pm 30 \text{ ppm} \pm 3\%$  da leitura”, de modo que se destaca entre outros sensores também por esse motivo. Além disso, apresenta algoritmos de auto-calibração para facilitar o uso do produto e, contém interfaces muito importantes para uso por microcontroladores, entre as quais: UART, I2C e PWM. O componente tem ainda, conforme se pode esperar de um sensor como esse, possibilidade de configuração de frequência de coleta de dados (taxa de amostragem) e de outros parâmetros importantes para seu funcionamento.

Abaixo, é apresentado o diagrama de blocos do sensor, como forma de ilustrar suas conexões e componentes.

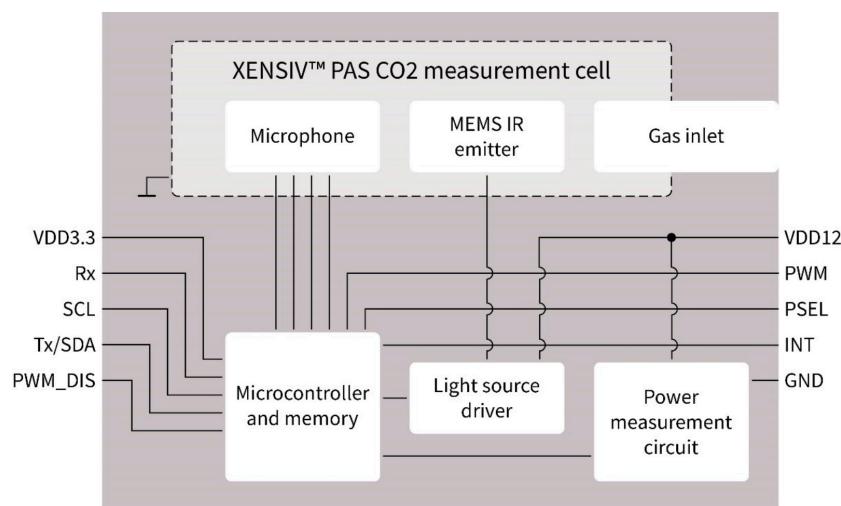


Figura 2: Diagrama de blocos do sensor.

Em seguida, apresenta-se ainda um diagrama de pinos e a tabela de conexões do sistema, elementos muito importantes para compreensão do uso do componente no que diz respeito, principalmente, à comunicação.

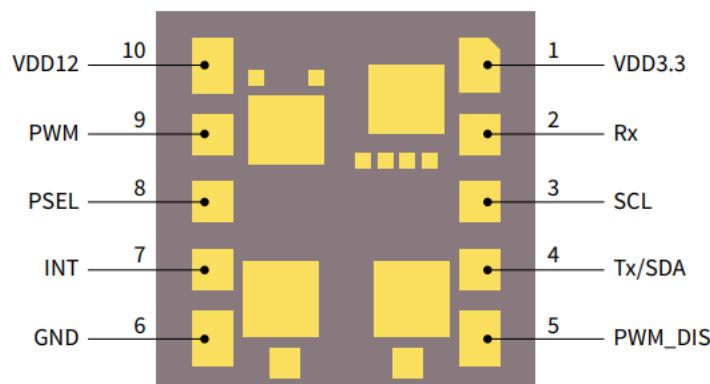


Figura 3: Diagrama de pinos do sensor.

Pin	Symbol	Type	Description
1	VDD3.3	Power supply (3.3 V)	3.3 V digital power supply
2	Rx	Input	UART receiver pin
3	SCL	Input/Output	I <sup>2</sup> C clock pin (3.3 V domain)
4	Tx/SDA	Input/Output	UART transmitter pin (3.3 V domain)/ I <sup>2</sup> C data pin (3.3 V domain)
5	PWM_DIS	Input	PWM disable input pin (3.3 V domain)
6	GND	Ground	Ground
7	INT	Output	Interrupt output pin (3.3 V domain)
8	PSEL	Input	Communication interface select input pin (3.3 V domain)
9	PWM	Output	PWM output pin (3.3 V domain)
10	VDD12	Power supply (12 V)	12 V power supply for the IR emitter

Figura 4: Tabela de pinos do sensor.

Seguindo, vale destacar algumas das funcionalidades das quais o sensor dispõe (retiradas do “Product Brief”). São elas:

- Autocalibração de offset automática (ABOC);
- Compensação de pressão;
- Alarme por sinal;
- Taxa de amostragem (como já indicado);
- Notificações antecipadas de medição.

Finalmente, apenas a critério de ilustração, cabe observar uma imagem do sensor, que se apresenta abaixo:

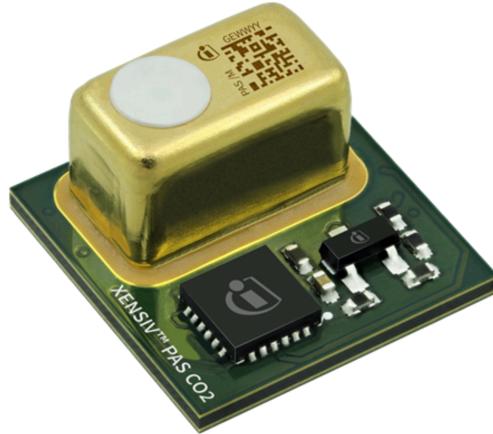


Figura 5: Imagem do sensor.

### Definição da arquitetura do sistema embarcado:

Previamente à definição concreta da arquitetura, devem ser estudadas as restrições a serem consideradas no desenvolvimento do produto. Para tanto, vale observar a *Figura 6* retirada do primeiro capítulo da primeira unidade do curso Embarcatech.



Figura 6: Restrições no desenvolvimento de embarcados.

Levando o esquema de restrições apresentado como um guia, pode-se estabelecer limites de design a serem considerados:

1. O SE a ser desenvolvido deve apresentar um *custo baixo*, de modo a tornar viável o uso doméstico e empresarial (em escritórios ou fábricas, por exemplo).
2. Por facilidade de “encaixe” e anexação a equipamentos de circulação de ar que o receberão de auxiliar, o SE deverá apresentar *dimensões reduzidas* (do mesmo modo como o sensor).
3. *Disponibilidade* e *estabilidade* são fatores importantes também, uma vez que não seria muito bom que os usuários de alto-nível do produto (pessoas e empresas) tivessem de entender a respeito do SE ou de chamar um técnico várias vezes para arrumar um produto que parasse de funcionar muitas vezes e não voltasse por conta própria.

Apesar desses limitantes, vale ressaltar que os fatores de energia, baixa potência (a depender do quão baixa), robustez, segurança, interface simples e tempo de resposta não são tão problemáticos para o sistema. Isso porque, como a ideia é criar um dispositivo alimentado diretamente pela energia do estabelecimento, junto de um equipamento de circulação de ar (ar condicionado, no geral), ele não precisa ser muito robusto contra problemas físicos, pois não sofrerá perturbações físicas relevantes a menos da variação de temperatura, porém esta não será tão abrupta nem tão grande. Além disso, a questão da segurança não é muito relevante, já que não há uma tarefa crítica sendo desempenhada pelo SE, de modo que um problema de segurança não põe pessoas nem objetos em risco considerável. Já quanto à interface, basta que ela seja comprehensível para os técnicos que desenvolverão equipamentos que conterão o SE, não precisando ser tão simples quanto precisaria caso fosse usada por todos os usuários da tecnologia. Finalmente, as questões de energia, potência e tempo de resposta estão todas associadas, de modo que, como não é necessário um tempo de resposta muito bom, por causa da inexistência de criticidade da operação, não é também necessária uma potência muito alta e, para além da presença da alimentação do local, por consequência, não é necessária uma quantia alta de energia para operação do SE.

Logo, considerando tudo o que se explica acima, o microcontrolador escolhido foi o *RP2040* da *Raspberry Pi*, contido na placa *Raspberry Pi Pico*, facilmente encontrada para vender no Brasil e que atende às requisições impostas anteriormente. Essa placa contém pinos para comunicação usando interfaces I2C e UART (além de outras), ou seja, é capaz de se comunicar com o sensor usado de

todas as formas que ele possibilita. Abaixo, encontram-se algumas especificações relevantes da placa e do processador e, uma imagem dela (todas informações retiradas do datasheet, referência 7).

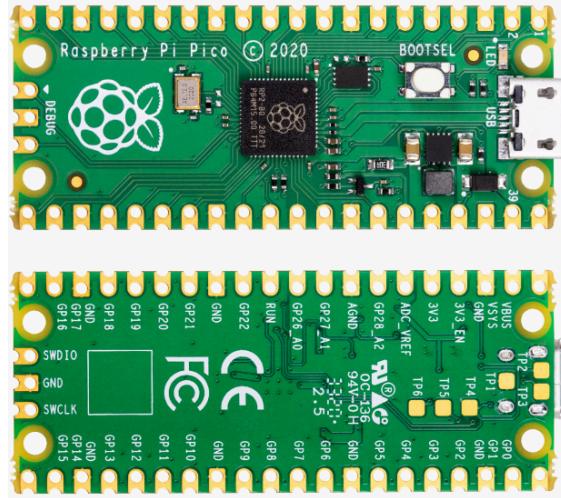


Figura 7: Imagem da Placa Raspberry Pi Pico.

### Especificações da placa e do microcontrolador:

- RP2040 microcontroller with 2MB Flash;
  - Micro-USB B port for power and data (and for reprogramming the Flash);
  - Dual-core cortex M0+ at up to 133MHz;
  - $2 \times$  UART,  $2 \times$  I2C,  $2 \times$  SPI,  $16 \times$  PWM channels;
  - $1 \times$  Timer with 4 alarms,  $1 \times$  Real Time Counter;
  - 1.8-3.3V IO Voltage (correspondente com a alimentação de 3 a 3.6 volts do sensor);
  - Mais especificações podem ser encontradas no datasheet do produto ou na página de documentação do site da *Raspberry Pi* (referências 10 e 12).

Conforme se percebe pelas especificações apresentadas acima, a placa em questão e seu microcontrolador incorporado representam uma boa opção para o design a ser desenvolvido. Ainda assim, para que se note também as dimensões do produto, exibe-se abaixo um diagrama da *Pi Pico* com suas dimensões (retirado também do datasheet).

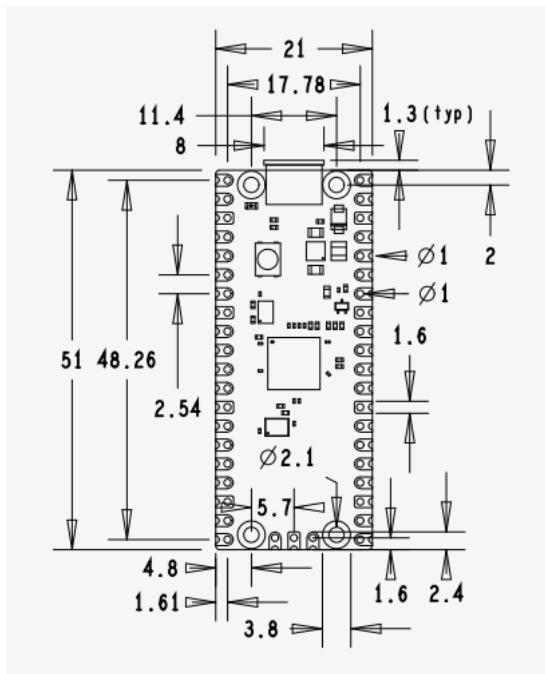


Figura 8: Dimensões da placa.

Cabe, para finalizar a descrição dos dispositivos de hardware usados, observar ainda a *Figura 9*, que apresenta o diagrama de blocos do microcontrolador RP2040 (retirado da página de venda do produto no site da *Raspberry Pi*).



Figura 9: Diagrama de blocos do microcontrolador (RP2040).

Apresentadas as especificações da placa, tem-se todo o componente de hardware da arquitetura e, pode-se iniciar a descrição de software do SE a ser desenvolvido. Nesse sentido, o primeiro ponto a ser destacado é que o desenvolvimento de toda a aplicação será feito em c++, pois as opções dado o controlador seriam c ou c++ e, pela maior amplitude do c++ e maior facilidade da linguagem, considerando que isso não causará problemas para o SE, optou-se pelo c++. Decidida,

portanto, a linguagem de programação, cabe destacar o que será feito em software na arquitetura do dispositivo.

O microcontrolador será programado para se comunicar com o sensor usando sua interface UART, de modo a permitir uma velocidade satisfatória de comunicação sem muitas complicações. Desse modo, o microcontrolador deverá configurar o sensor para:

- Operar em modo contínuo (Continuous mode operation), com a alteração do valor do campo *OP\_MODE* do registrador *MEAS\_CFG.OP\_MODE* → assim, o sensor faz medidas periodicamente, guardando-as em *CO2PPM\_H* e *CO2PPM\_L*;
- Conter threshold para o alarme, por meio dos registradores *ALARM\_TH\_H* e *ALARM\_TH\_L* → assim, o sensor dispara um alarme sempre que uma medição extrapolar o threshold, sentando o bit *MEAS\_STS.ALARM*. Caso um alarme seja disparado, o microcontrolador deve ler o registrador *MEAS\_STS.ALARM\_CLR*, para limpar o bit citado;
- Verificar se o sensor está corretamente inicializado de fato e se a comunicação serial está funcionando, por meio do bit *SENS\_STS.SEN\_RDY* e do registrador *SCRATCH\_PAD*, respectivamente;

Após as configurações iniciais do microcontrolador e do sensor, é necessário que o software imponha ao microcontrolador que ele verifique periodicamente os valores dos registradores *CO2PPM\_H* e *CO2PPM\_L*, para compor com os bytes mais e menos significantes, respectivamente, o valor da última medida de concentração de CO2 no ambiente em *ppm*. Além disso, deve haver uma verificação periódica por alarme *setado* no registrador *MEAS\_STS.ALARM*.

Ademais, aplicadas as configurações mencionadas acima, é necessário que o software implemente também uma política de comunicação como *I2C*, *SPI* ou o próprio *UART* com dispositivos externos. Essa comunicação se dará com o equipamento de circulação de ar ao qual o SE estará acoplado, de modo que ele enviará informações de controle para o equipamento, indicando ações a serem tomadas por ele. Tais ações compreendem não somente o aumento da velocidade de ventilação, mas também o quanto esta velocidade deve ser aumentada. Para tanto, haverá uma série de thresholds no software do SE a partir dos quais os dispositivos receberão dados de controle para aumentar progressivamente a circulação do ambiente. Tais thresholds podem ser vistos no “chart” abaixo, retirado do site da EMPRESA CO2Meter (referência 14) e, são eles:

- 1000ppm → Aumento leve na velocidade de operação do ar condicionado ou sistema de ventilação;
- 2000ppm → Aumento médio na velocidade, variando para mais a cada 1000ppm de incremento até 4000ppm;
- 5000ppm → Aumento extremo na velocidade para o máximo possível do dispositivo ou sistema.

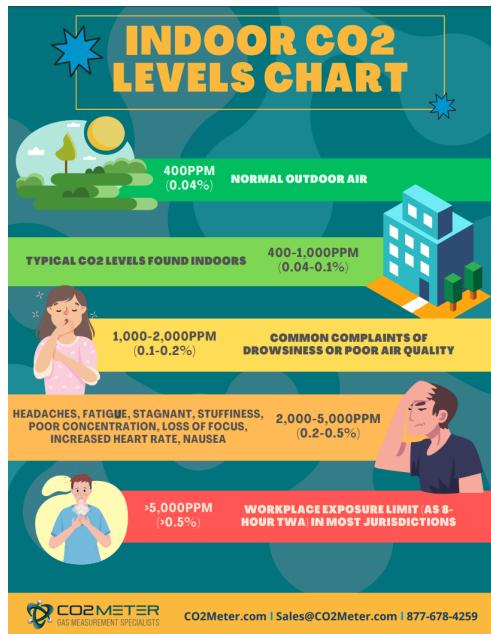


Figura 10: Chart de sintomas devidos à concentrações distintas de CO2 no ar.

Finalmente, em caso de o alarme do sensor disparar (será definido para 7000ppm), por causa de o ambiente estar com uma concentração absurda de CO2, será emitido um alarme pelo SE para o equipamento ao qual está acoplado, de forma que este possa emitir um alarme sonoro ou de qualquer tipo que seja para as pessoas no local.

Apresentados os componentes de hardware e software e as formas como eles operarão, pode-se apresentar ainda um diagrama de blocos representando imageticamente o SE:

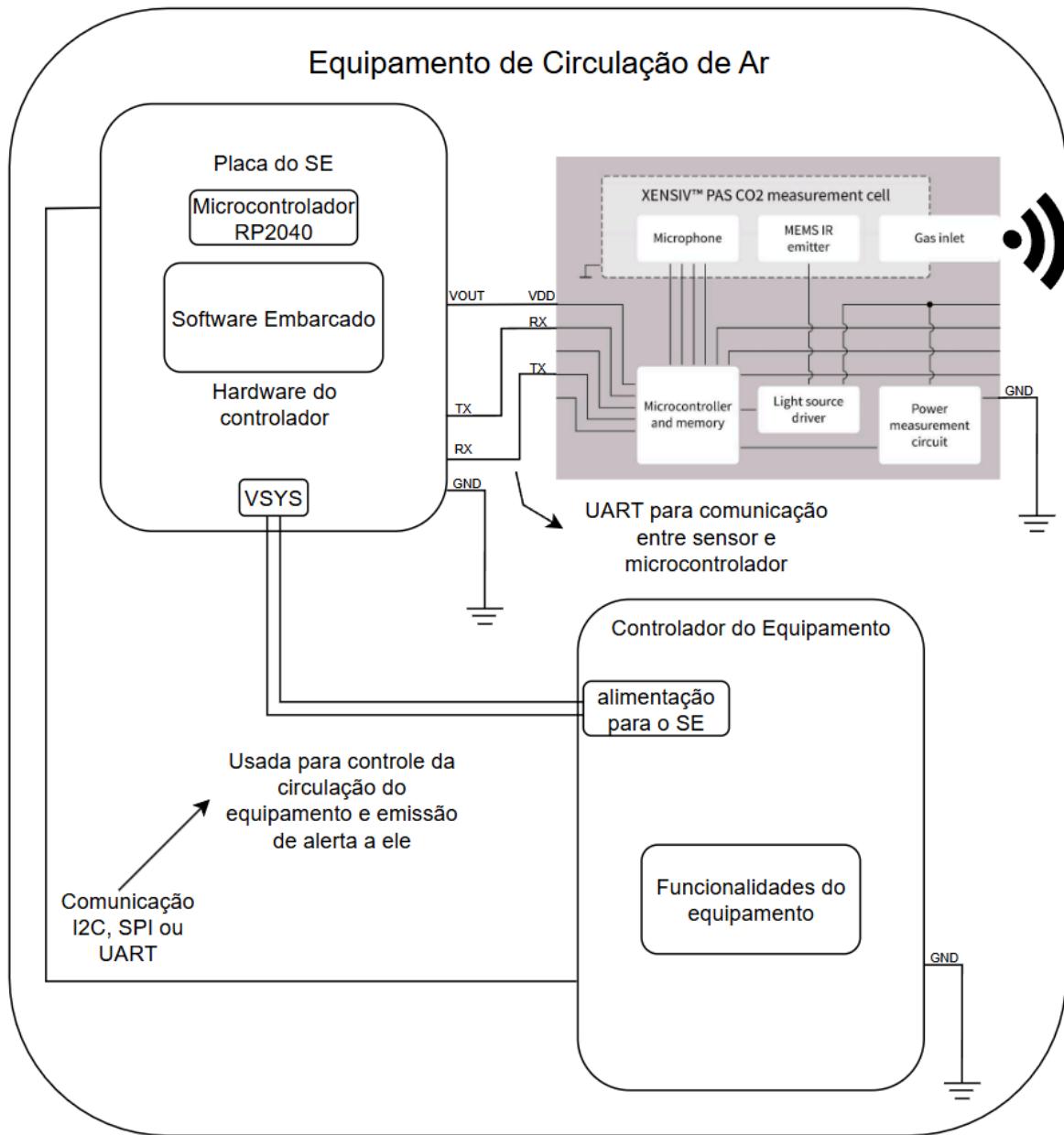


Figura 11: Diagrama de blocos do Sistema Embarcado desenvolvido (inclui um suposto controlador do sistema ao qual o SE estaria acoplado).

### Funcionalidades:

Conforme se pode concluir no decorrer do projeto, o sistema embarcado desenvolvido deve ser integrado a um equipamento de circulação de ar, seja ele um sistema de ventilação eletronicamente controlado de um ambiente interno ou mesmo um simples ar condicionado. Nesse sentido, suas funcionalidades são, como já mencionado:

- Medir a concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente;
- Controlar o fluxo de ar (velocidade de ventilação) do equipamento ao qual é acoplado;
- Emitir alertas ao equipamento em caso de concentrações exorbitantes de dióxido de carbono no ambiente (7000 ppm).

## **Justificativa:**

O sistema embarcado proposto seria uma opção muito boa para controlar as concentrações de CO<sub>2</sub> em ambientes fechados nos quais pessoas passam muito tempo inseridas de forma simples, consistente, confiável e “abstrata” para usuários finais (que possuem um ar condicionado, por exemplo). Isso porque, o aparelho deve ser embutido a um sistema de ventilação, qualquer que seja desde que seja eletronicamente controlado, de modo que não haja interações diretas entre o SE e o usuário. Assim, como mencionado no tópico de motivação, a ideia do projeto é que o equipamento seja usado em casas, escritórios e outros estabelecimentos para impedir que pessoas sofram dos sintomas do excesso de gás carbônico em concentração no ar, melhorando a saúde coletiva em ambientes domésticos e em ambientes de trabalho e, por consequência, aumentando o desempenho dos trabalhadores com um ar de melhor qualidade para respirarem.

## **Referências:**

1. Página do sensor PASCO2V01 XENSIV™ PAS CO<sub>2</sub> no site do desenvolvedor:  
<https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/gas-sensors/co2-sensors/pasco2v01/>
2. SATISH, Usha e colab. Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, v. 120, n. 12, p. 1671–1677, 19 Nov 2012b. <<https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>>.
3. Embarcados.com.br - XENSIV™ PAS CO<sub>2</sub> - Sensor de CO<sub>2</sub> de Alta Precisão para aplicações Industriais e de IoT:  
<https://embarcados.com.br/xensiv-pas-co2-sensor-de-co2-de-alta-precisao-para-aplicacoes-industriais-e-de-iot/>
4. Página informativa Infineon:  
[https://www.infineon.com/cms/media/eLearning/PSS/PSS\\_eLearning\\_1594\\_XENSIV\\_PAS\\_CO2\\_measure\\_what\\_matters\\_english\\_update\\_june2022/](https://www.infineon.com/cms/media/eLearning/PSS/PSS_eLearning_1594_XENSIV_PAS_CO2_measure_what_matters_english_update_june2022/)
5. Datasheet PASCO2V01 XENSIV™ PAS CO<sub>2</sub>:  
[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PASCO2V01-DataSheet-v01\\_60-EN.pdf?fileId=8ac78c8c80027ecd01809278f1af1ba2](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PASCO2V01-DataSheet-v01_60-EN.pdf?fileId=8ac78c8c80027ecd01809278f1af1ba2)
6. Haddrell, A., Oswin, H., Otero-Fernandez, M. et al. Ambient carbon dioxide concentration correlates with SARS-CoV-2 aerostability and infection risk. *Nat Commun* 15, 3487 (2024).  
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-47777-5>
7. Wisconsin Department of Health (sintomas do gás carbônico em altas concentrações no ar):  
<https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbon dioxide.htm#:~:text=These%20may%20include%20headaches%2C%20dizziness,coma%2C%20asphyxia%2C%20and%20convulsions.>
8. Product Brief of PASCO2V01 XENSIV™ PAS CO<sub>2</sub>:  
[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-XENSIV\\_CO2\\_sensor-ProductBrief-v03\\_01-EN.pdf?fileId=5546d4626b2d8e69016b69ba27c958c1](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-XENSIV_CO2_sensor-ProductBrief-v03_01-EN.pdf?fileId=5546d4626b2d8e69016b69ba27c958c1)

9. Página Família Raspberry Pi Pico:  
<https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/pico-series.html>
10. Datasheet do microcontrolador RP2040:  
<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>
11. Página Raspberry Pi Pico RP2040 em Loja:  
<https://www.casadarobotica.com/placas-embarcadas/raspberry-pi/placas/raspberry-pi-pico-rp2040>
12. Datasheet do Pi Pico: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>
13. Getting Started Pi Pico: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/getting-started-with-pico.pdf>
14. High CO2 Levels Indoors Will Surprise You:  
<https://www.co2meter.com/blogs/news/high-carbon-dioxide-co2-levels-indoors>