



Tecnologias Avançadas para Reciclagem de Resíduos Industriais: Processos Inovadores e Sustentabilidade Ambiental

Roberta Viana da Silva Fernandes , Andre Luis de Oliveira

¹ Faculdade de Computação e Informática
Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM) – São Paulo, SP – Brazil
10407897@mackenzista.com.br

Abstract. *Advanced recycling technologies are essential for improving industrial sustainability and reducing environmental impact. This paper explores innovative methods for recycling industrial waste, focusing on techniques such as image-based sorting, chemical recycling, and thermo-chemical processes. These technologies enhance material recovery, minimize waste, and support environmental conservation. The paper discusses the benefits, including resource conservation and reduced carbon emissions, while addressing implementation challenges such as high costs and infrastructure needs. Recommendations for overcoming these barriers are provided to promote the adoption of advanced recycling practices in the industrial sector.*

Resumo. *Este meta-artigo investiga tecnologias avançadas de reciclagem para resíduos industriais, destacando inovações como separação por imagem, reciclagem química e processos termoquímicos. Essas tecnologias visam melhorar a eficiência na recuperação de materiais valiosos e reduzir o impacto ambiental dos resíduos. O estudo analisa os benefícios associados, como a conservação de recursos e a diminuição das emissões de carbono, além de abordar desafios como custos elevados e necessidades de infraestrutura. Recomendações são apresentadas para superar esses desafios e promover a adoção de práticas de reciclagem mais eficazes na indústria.*

1. Introdução

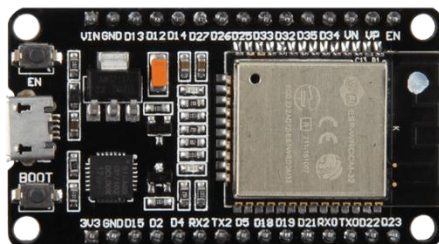
A gestão de resíduos industriais tem se tornado uma questão crucial no contexto global, à medida que a produção industrial cresce e os recursos naturais se tornam cada vez mais escassos. A reciclagem de resíduos não apenas reduz a quantidade de resíduos destinados a aterros, mas também contribui para a conservação de recursos e a redução da poluição ambiental. Nos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias avançadas de reciclagem, como a separação por imagem e inteligência artificial, bem como os processos químicos e termoquímicos, têm demonstrado um potencial significativo para transformar a maneira como os resíduos são tratados e reciclados. Essas inovações

oferecem uma solução promissora para enfrentar os desafios ambientais impostos pela gestão inadequada de resíduos industriais.

Historicamente, a reciclagem industrial evoluiu de métodos manuais e simples para processos cada vez mais sofisticados, impulsionados pelo avanço tecnológico e pela crescente conscientização ambiental. Estudos pioneiros, como os de Jean-Pierre Sauvage e Fraser Stoddart, que exploraram a química supramolecular para a recuperação de materiais, e os desenvolvimentos recentes em tecnologias de separação e reciclagem química, ilustram essa progressão. Trabalhos correlatos, como os de J. B. G. K. N. Singh e colegas sobre técnicas avançadas de reciclagem de plásticos, demonstram a evolução contínua e a inovação no campo. Este projeto pretende expandir essa base de conhecimento, focando na aplicação de tecnologias avançadas para a reciclagem de resíduos industriais e na superação dos desafios associados a essa área crucial.

2. Materiais e métodos

Imagem 1 - Placa ESP 32. Fonte: Clube do Maker



A ESP32 é uma placa de desenvolvimento de hardware aberto que é baseada em um processador dual-core de 32 bits e possui 520 KB de memória flash. Possui Wi-Fi e Bluetooth integrados, o que elimina a necessidade de comprar módulos separados. Outra característica é que a placa possui 34 pinos GPIO, dos quais 22 são pinos digitais e 12 são pinos analógicos. Os pinos digitais podem ser configurados como input ou output. Já os pinos analógicos podem ser usados para ler sinais analógicos, como temperatura, tensão elétrica, e pressão. As possibilidades de programação também são uma característica notável, já que é compatível com C, C++, Python, Lua, MicroPython, além de JavaScript.

Tensão de operação: 3,0 à 3,6 VDC

Corrente de operação: até 500 mA

Frequência do clock: até 240 MHz

Memória RAM: 520 KB

Memória Flash: até 16 MB (dependendo do modelo)

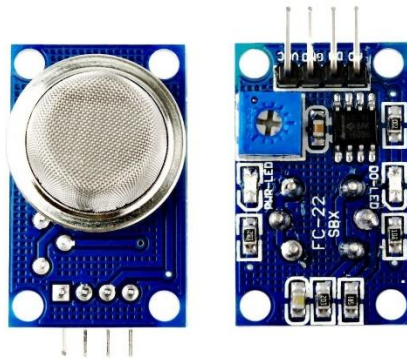
Conectividade: Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2

Temperatura de operação: -40 a +85 °C

Material: PCB

Dimensões: aproximadamente 25,5 x 18 mm (varia conforme o modelo)

Imagem 2 – Sensor de Gás MQ-2. Fonte: Robótica Educacional Arducore



O sensor MQ-2 é um dispositivo amplamente utilizado para detecção de gases combustíveis e fumaça em projetos eletrônicos, como em sistemas de segurança, automação e monitoramento ambiental. Ele é particularmente eficaz para identificar gases como propano, metano, butano, hidrogênio, monóxido de carbono e outros gases inflamáveis, bem como detectar fumaça. O funcionamento do sensor MQ-2 baseia-se na mudança da resistência elétrica do dióxido de estanho (SnO_2) quando exposto a diferentes concentrações de gases combustíveis. O dióxido de estanho é um semicondutor que, na presença de ar limpo (sem gases), apresenta uma alta resistência elétrica. Quando gases combustíveis entram em contato com a superfície sensível, eles são oxidados na presença de oxigênio, o que resulta em uma diminuição da resistência do material. Essa mudança na resistência é proporcional à quantidade de gás presente no ambiente. O sensor pode, então, fornecer uma leitura elétrica correspondente à concentração do gás detectado.

Tensão de operação: 5 VDC

Corrente de operação: 300 mA (máx.)

Intervalo de detecção: 300 a 10.000 ppm (para gás LPG, metano e fumaça)

Tempo de resposta: < 10 s

Tempo de recuperação: < 30 s

Temperatura de operação: -20 a +50 °C

Umidade de operação: 95% RH (máx.)

Material: Cerâmica e metal

Dimensões: aproximadamente 20 x 20 x 25 mm

Imagem 3 –Módulo de Led. Fonte: Makerhero

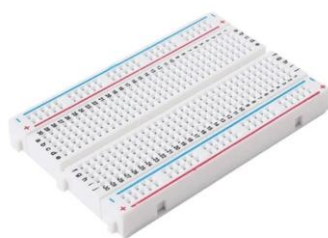


Led Alto Brilho 5mm Vermelho para utilização em circuitos eletrônicos. O LED (Light Emitting Diodo, ou Diodo Emissor de Luz) é formado por um material semicondutor que

emite luz quando uma tensão é aplicada nos terminais. O LED possui polaridade, ou seja, deve ser ligado de forma correta com o anodo (terminal maior) ligado ao positivo, e o catodo (terminal menor) ligado ao negativo. Verifique nas imagens do anúncio a forma correta de ligar o led.

- Cor: Vermelho
- Diâmetro: 5mm
- Corrente de operação: 20mA
- Tensão de operação: 1.9V – 2.1V
- Luminosidade: 2500-3000 mCD
- Comprimento de onda: 600-635

Imagem 4 – Protoboard. Fonte: RoboCore



Uma **protoboard**, também chamada de **placa de ensaio**, é uma ferramenta usada para construir circuitos eletrônicos temporários, sem a necessidade de soldar os componentes. Ela permite que você conecte diferentes componentes (resistores, LEDs, capacitores, transistores, microcontroladores, etc.) de forma simples e rápida.

- **Linhas de Alimentação:** As protoboards geralmente têm duas fileiras de furos nas extremidades, uma superior e outra inferior, chamadas de **barras de energia**. São usadas para distribuir a alimentação (VCC e GND) pelo circuito. Os furos de cada fileira são conectados entre si horizontalmente.
- **Área de Conexão:** No centro da protoboard há uma matriz de furos dividida em duas partes, que é onde você insere os componentes do circuito. Cada coluna de furos em um dos lados da fenda central está conectada verticalmente (5 furos por coluna). Isso permite que os pinos dos componentes inseridos na mesma coluna fiquem eletricamente conectados.
- **Fenda Central:** Essa separação central permite conectar componentes com múltiplos terminais, como circuitos integrados (CIs). Cada lado da fenda está isolado do outro, facilitando a conexão de diferentes partes do circuito.

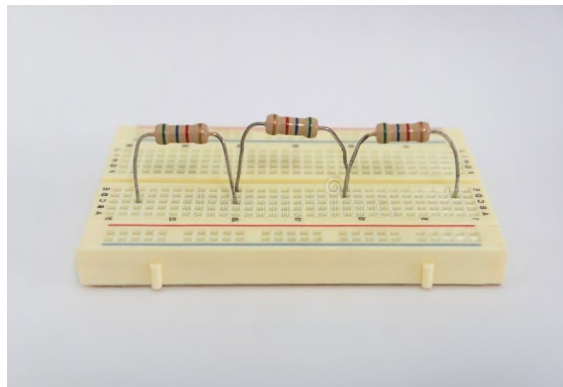
A protoboard é muito usada para testes, prototipagem e aprendizado em projetos eletrônicos, principalmente para iniciantes e desenvolvedores que desejam experimentar novos circuitos antes de montar uma versão final.

Imagem 5 – Jumpers macho. Fonte: Datasheet Datasheet Atmega328P



Os jumpers são responsáveis pelas ligações entre os componentes sem a necessidade de realizar soldas.

Imagem 6 – Resistências. Fonte: DreamStime



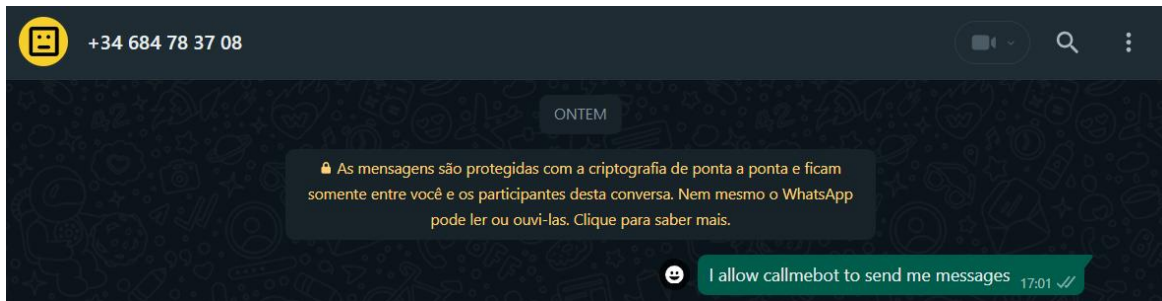
As resistências fixas limitam a corrente que passa por um componente, como LEDs, transistores ou outros dispositivos sensíveis, evitando que sejam danificados.

Imagem 7 – Cabo USB. Fonte: Datasheet Datasheet Atmega328P



O cabo USB tem a função de alimentar energeticamente os componentes.

Imagem 8 – Protocolo MQTT. Fonte: CallMeBot



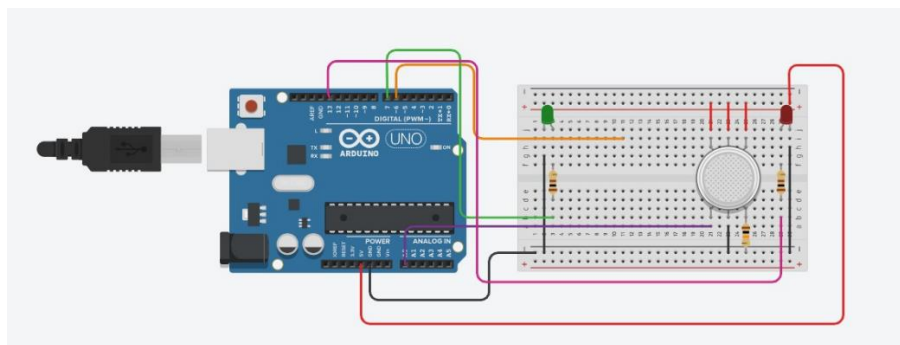
A **CallMeBot** é uma API (Interface de Programação de Aplicações) que permite enviar mensagens de texto ou chamadas automatizadas para dispositivos móveis e outros canais, como WhatsApp, Telegram e até chamadas telefônicas. É usada para integração de notificações em sistemas, IoT (Internet das Coisas), automação residencial ou alertas personalizados.

A integração do projeto utilizando a API CallMeBot começa pela configuração do serviço de mensagens desejado (por exemplo, WhatsApp ou Telegram). Primeiro, é necessário ativar o CallMeBot criando uma configuração inicial. Para WhatsApp, envie uma mensagem ao número oficial do CallMeBot para obter sua API Key.

No código do ESP32, são adicionadas bibliotecas necessárias para realizar requisições HTTP e para a conexão Wi-Fi. Após a conexão à rede Wi-Fi, o ESP32 será programado para enviar mensagens automaticamente à API CallMeBot, utilizando requisições HTTP que incluem o número do destinatário, a mensagem e a API Key.

A comunicação é estabelecida de forma direta, onde o ESP32 envia os dados (como leituras de sensores) formatados em URLs para o endpoint da CallMeBot. A mensagem será então entregue ao canal configurado, permitindo alertas e notificações em tempo real.

Imagem 9 – Modelo do protótipo . Fonte: Thinkercad



O projeto utilizará a placa ESP32, que será responsável pela gestão e controle do sistema. O sensor de fumaça MQ-2 será integrado ao circuito e, O atuador de led verde permanecerá ligado, e ao detectar a presença de substâncias tóxicas no ambiente, o atuador led vermelho acenderá, indicando visualmente a presença de fumaça ou gases nocivos.

Conexões:

Sensor de Gás MQ-2: O sensor MQ-2 está conectado à ESP-32 através de 3 jumpers macho-fêmea. O pino de alimentação do sensor está conectado ao pino VIN da ESP-32 (jumper marrom), O pino de leitura analógica do sensor está conectado na saída 2 (GPIO2) da ESP-32, já o pino de leitura digital está ligado na saída 13 (GPIO13).

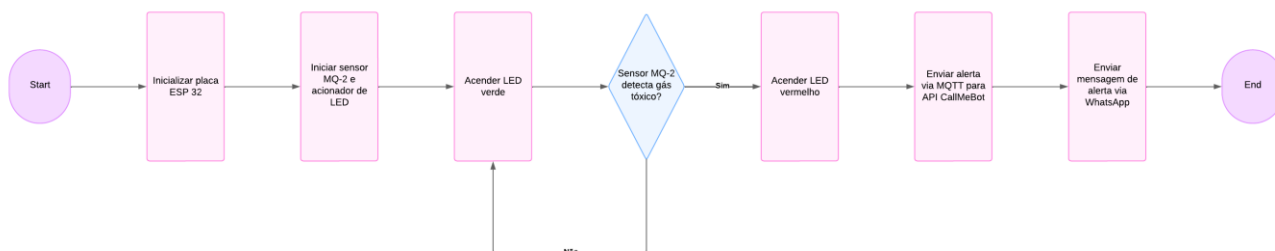
Led 5mm: O Led está conectado de forma que seu terminal positivo (anodo) está ligado a um pino digital da ESP-32 (conforme indicado pelo jumper vermelho), e o terminal negativo (catodo) está conectado ao GND (jumper preto). O Led que apresenta a falta de gás está ligado na porta 14 (GPIO14) da ESP-32, já o Led que apresenta a presença de gás, está ligado na porta 12 da ESP-32 (GPIO12)

Deteção de Gás pelo MQ-2: O sensor MQ-2 irá monitorar a concentração de gases inflamáveis no ambiente. Ele funciona aquecendo internamente um material sensível a gases. Conforme a concentração de gás aumenta, a resistência do material interno diminui, alterando a saída analógica do sensor. O pino analógico do sensor MQ-2 está conectado ao pino 2 (GPIO2) da ESP-32, que lerá essa variação de tensão e poderá processá-la, analisando se a concentração de gás está acima de um limiar pré-determinado.

MQTT: A placa Esp32 será programada e irá enviar os dados coletados pelo sensor (via Wi-Fi) para uma API (CallMeBot), registrando as leituras, e emitindo um alerta.

4. Fluxograma de Funcionamento

Imagem 9 – Fluxograma de funcionamento. Fonte: LucidChart



5. Resultados

Tabela 1 – Testes de resultados dos atuadores e sensores.

Núm. medida	Sensor/atuator	Tempo de resposta
1	Sensor MQ-2	5s
2	Sensor MQ-2	5s
3	Sensor MQ-2	5s
4	Sensor MQ-2	5s
5	Atuador Led Vermelho	5s
6	Atuador Led Vermelho	5s
7	Atuador Led Vermelho	5s
8	Atuador Led Vermelho	5s

5.1 Projeto em funcionamento

Imagem 10 – Protótipo do projeto. Fonte: Tinkercad

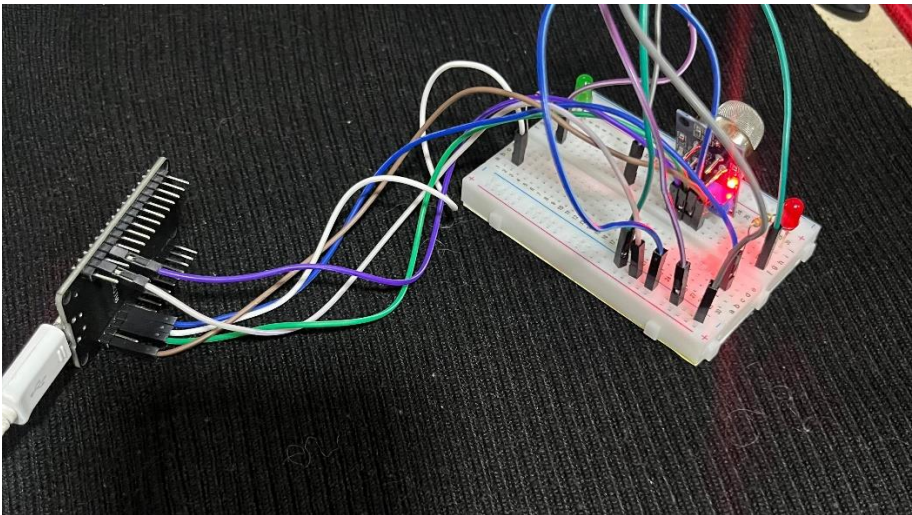
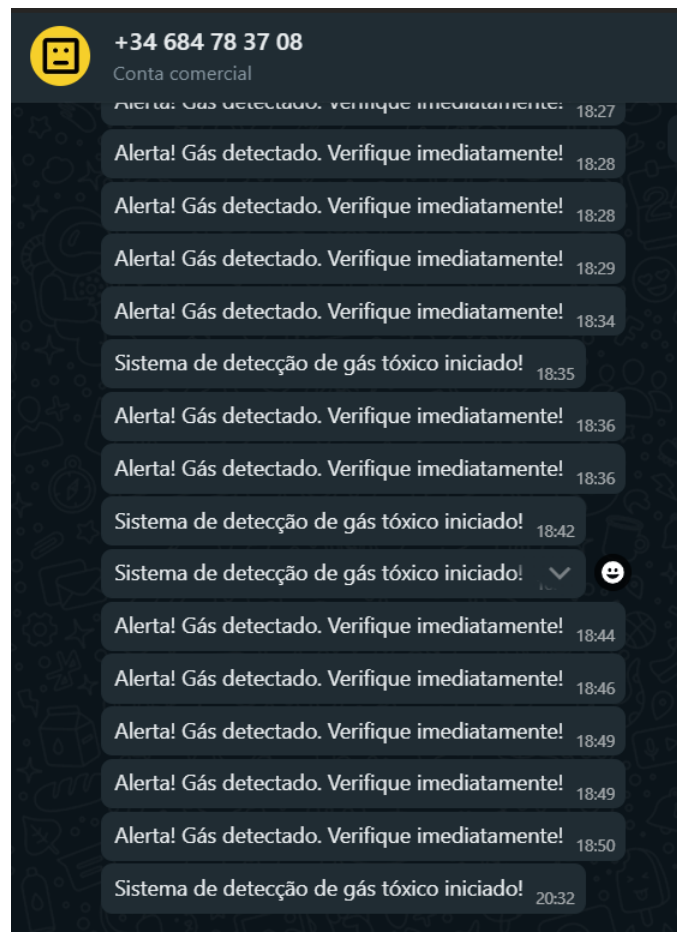


Imagem 11 – Comunicação Via MQTT. Fonte: CallMeBot



5.2 Repositório

Para o desenvolvimento do projeto, foi criado um repositório no GitHub para centralizar a documentação. O repositório inclui detalhes técnicos, como instruções de uso, código-fonte, e a lista de componentes de hardware necessários para a montagem.

O acesso pode ser feito pelo link: https://github.com/RobertaVianaF/Projeto_IOT/
O vídeo explicativo pode ser acessado pelo link: <https://youtu.be/qZK4po9SEk0>

6. Conclusões

i) Os objetivos propostos foram alcançados?

R: O objetivo do projeto foi plenamente alcançado, pois o sensor de baixo custo desenvolvido mostrou-se eficaz no monitoramento da emissão de gases tóxicos em ambientes industriais, cumprindo com o propósito. O dispositivo demonstrou capacidade de detectar concentrações de partículas e gases tóxicos em níveis críticos, fornecendo alertas em tempo hábil sobre condições que podem representar riscos à saúde e à segurança.

Os testes realizados confirmaram a eficiência do sensor em identificar os principais poluentes presentes no ar, possibilitando ações preventivas e corretivas de forma precisa. Além disso, sua facilidade de instalação e integração com sistemas de monitoramento remoto via MQTT reforça sua funcionalidade, permitindo acesso às informações em tempo real por meio do Chat Bot CallMeBot.

ii) Quais são os principais problemas enfrentados e como foram resolvidos?

R: Uma das dificuldades encontradas foi identificar uma plataforma MQTT que fosse acessível e prática para todos os envolvidos. Para superar essa barreira, optei por utilizar o CallMeBot, uma solução que permite o envio de notificações de alerta diretamente para os celulares dos participantes. Isso simplificou a comunicação, eliminando a necessidade de qualquer ação ou comando por parte dos destinatários.

iii) Quais são as vantagens e desvantagens do projeto?

R: Uma das principais vantagens do projeto é seu custo acessível e a montagem simplificada. A placa, os sensores e os atuadores utilizados se enquadram no orçamento de empresas e indústrias, tornando-o economicamente viável. Além disso, o sistema oferece fácil comunicação, seja por meio da visualização do atuador LED, seja via protocolo MQTT, garantindo eficiência e praticidade na interação com o dispositivo. As desvantagens estão relacionadas ao nível limitado de detecção, uma vez que o sistema foi desenvolvido com um custo reduzido. Isso implica na necessidade de avaliar as exigências específicas de cada empresa para determinar se o projeto atende adequadamente às suas necessidades.

iv) O que deveria/poderia ser feito para melhorar o projeto?

R: Seriam possíveis melhorias no projeto, como a adição de sensores extras, como câmeras capazes de detectar e capturar gases tóxicos invisíveis a olho nu. Além disso, o custo do sistema poderia ser melhorado, através do aperfeiçoamento do projeto, tornando-o ainda mais eficiente sem comprometer sua viabilidade econômica.

7. Referências

SAUVAGE, J.-P.; STODDART, J. F. Molecular Machines and Motors. In: Science. 316(5828), 421-422. 2007. doi:10.1126/science.1147818

SINGH, J. B. G. K. N.; ZHANG, M. Advances in Plastic Waste Recycling Technologies. In: Journal of Cleaner Production. 276, 123307. 2020. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123307

THOMPSON, R. C.; SWAN, S. H.; MOORE, C. J. Our Plastic Age. In: Nature. 462(7274), 338-339. 2009. doi:10.1038/462338a

RAHUL, B.; SINGH, V.; PANDEY, R. Detection of Harmful Gases Using MQ-2 Gas Sensor in Smart Home Systems. In: International Journal of Computer Applications. 175(3), 25-29. 2017. doi:10.5120/ijca2017915637.

ZHANG, X.; WANG, L.; LI, Y. Sound Generation Using Piezoelectric Buzzer in Microcontroller-Based Applications. In: Journal of Electronic Devices. 13(2), 76-80. 2020. doi:10.2352/jed20200027.