

Artificial Intelligence Challenges (AIC): Proposta de Solução para Otimização do Consumo de Energia Residencial

Integrantes

- Jose Antonio Correa Junior (RM 559800)
- Gabriel de Oliveira Soares Ribeiro (RM 560173)
- Marcos de Souza Trazzini (RM 559926)
- Jonas Felipe dos Santos Lima (RM 560461)
- Edimilson Ribeiro da Silva (RM 559645)

Glossário

Introdução	2
Resultados Esperados	4
Detalhes da Solução (desenvolvimento)	5
Artificial Intelligence with Computer Systems and Sensors (AICSS)	5
Sobre a simulação	6
Statistical Computing with R (SCR)	7
Insights Práticos	10
Conclusão	10
Próximos Passos	10
Cognitive Data Science (CDS)	11
Computational Thinking with Python (CTWP)	11
Recursos da Aplicação	12
Tecnologias utilizadas	12
Utilizando a aplicação	12
Conclusão	16

Introdução

O aumento da demanda global por energia e a transição para fontes renováveis exigem uma gestão inteligente da energia residencial. A otimização do consumo residencial requer soluções que combinem eficiência energética, conforto do usuário e sustentabilidade ambiental.

Desafios:

- **Eficiência energética:** À medida que a eficiência energética dos dispositivos aumenta, a tecnologia cria novos dispositivos que consomem energia, e a população investe cada vez mais em itens de conforto.
- **Integração de tecnologias:** A implementação de soluções inteligentes para a gestão de eficiência energética residencial enfrenta desafios como integração de tecnologias, custo inicial elevado e barreiras relacionadas à adaptação dos usuários.
- **Custos de Implementação:** A adoção de tecnologias como IoT e IA pode ser cara para muitos proprietários, especialmente em residências mais antigas que podem exigir atualizações de infraestrutura.
- **Privacidade e Segurança:** A coleta de dados detalhados sobre o consumo de energia e os padrões de comportamento dos moradores levanta preocupações sobre privacidade e segurança cibernética.
- **Interoperabilidade:** A variedade de dispositivos e protocolos de comunicação pode dificultar a integração perfeita de diferentes componentes do sistema.
- **Usabilidade:** Interfaces complexas e a necessidade de configurações técnicas podem ser barreiras para a adoção generalizada, especialmente entre usuários menos familiarizados com tecnologia.
- **Manutenção e Atualização:** A necessidade de manutenção regular e atualizações de software para garantir o desempenho ideal pode representar um desafio adicional.
- **Confiabilidade da Rede:** A dependência de uma conexão de internet estável para alguns recursos pode ser problemática em áreas com conectividade limitada.

Solução proposta:

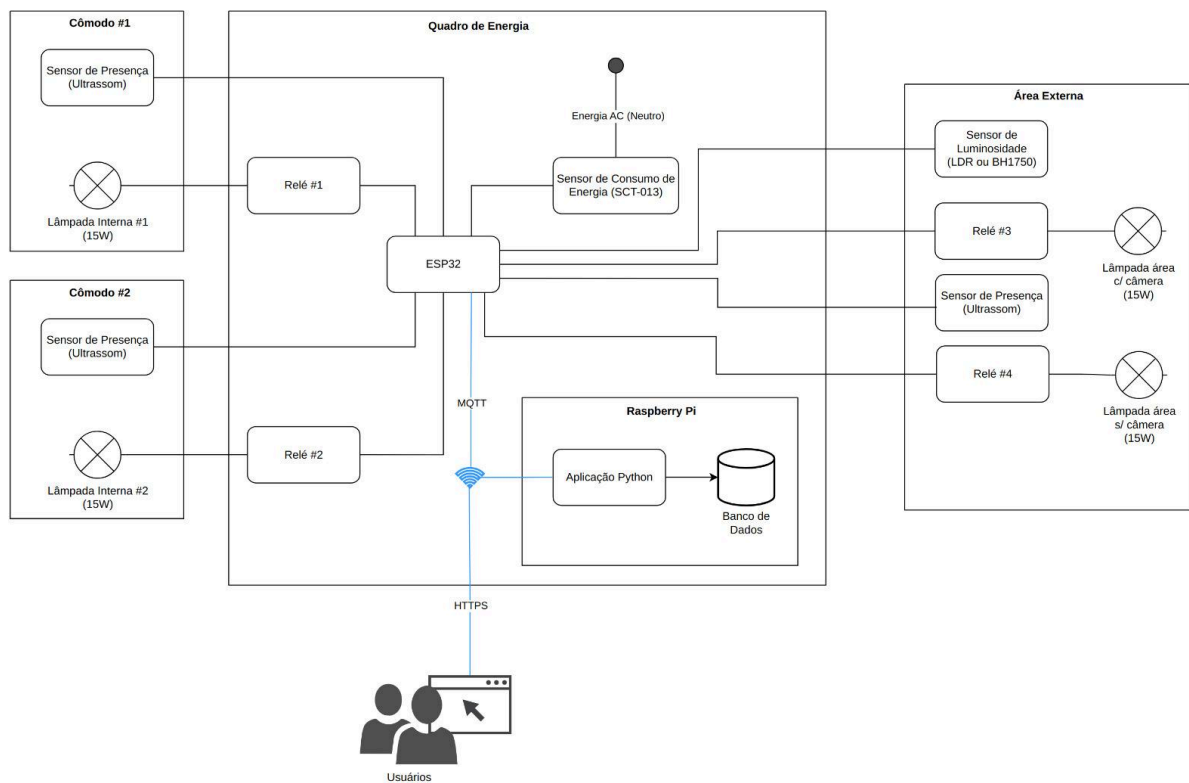
Conforme detalhado na seções a seguir neste documento, estamos propondo uma abordagem que combina tecnologias de Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT) e Big Data para criar um sistema acessível e funcional de gerenciamento de energia residencial, que possa ser replicado em escala, com baixo custo, e entregue os seguintes benefícios:

- **Redução do consumo de energia:** O sistema pode ajudar os usuários a reduzir o consumo de energia em até 20%.
- **Melhoria do conforto:** O sistema pode ajudar os usuários a melhorar o conforto em casa, ajustando automaticamente a temperatura, a iluminação e outros dispositivos.
- **Sustentabilidade ambiental:** O sistema pode ajudar os usuários a reduzir sua pegada de carbono, utilizando energia de forma mais eficiente.
- **Acessibilidade:** O sistema é acessível a todos os usuários, independentemente de sua renda ou nível de educação.

- **Replicação em escala:** O sistema pode ser replicado em escala, para ajudar milhões de pessoas a reduzir o consumo de energia e melhorar o conforto em casa.

Dado o fato que cada residência é única, é imperativo que a solução seja flexível para se adaptar a realidade de cada casa. Porém, em contexto acadêmico, e dado o prazo que tivemos para montar a solução, optamos por apresentar um protótipo, que apresenta os principais componentes, mas estarei declarando os pontos possíveis de melhorias no decorrer do texto, a fim de demonstrar de maneira mais ampla nossa ideia de solução.

A arquitetura a seguir é apenas um exemplo de implantação dessa solução em uma residência com dois cômodos internos independentes controlados, além de uma área externa, com duas lâmpadas, representando uma lâmpada dentro da área de cobertura de câmeras, e outra que não esteja na área de cobertura de câmeras.



Resultados Esperados

1. Economia de Energia:

- **Redução Significativa no Consumo:** A implementação da solução proposta é projetada para alcançar uma redução substancial, estimada entre 25% a 30%, no consumo de energia elétrica associado à iluminação e aos equipamentos automatizados. Essa projeção baseia-se em simulações abrangentes de cenários residenciais típicos, levando em consideração padrões de uso e comportamentos de consumo comuns.
- **Exemplo Prático de Economia:** Para ilustrar o potencial de economia, consideremos um ambiente residencial equipado com lâmpadas LED de 15W. Se essas lâmpadas permanecerem acesas desnecessariamente por um período de 8 horas diárias, a solução proposta pode gerar uma economia mensal de aproximadamente 30 kWh. Essa economia se traduz diretamente em redução na conta de luz e em um uso mais eficiente dos recursos energéticos.

2. Conforto e Conveniência para os Usuários:

- **Ambientes Iluminados e Confortáveis:** A automação inteligente proporcionada pela solução garante que os ambientes residenciais estejam sempre iluminados de forma adequada e mantenham níveis de conforto ideais, sem a necessidade de intervenção manual constante por parte dos moradores.
- **Minimização de Interrupções:** Ao otimizar o consumo de energia e promover um gerenciamento mais eficiente dos recursos, a solução contribui para a redução de interrupções no fornecimento de energia, evitando falhas e custos imprevistos que possam impactar o conforto e a rotina dos usuários.

3. Preservação e Durabilidade dos Equipamentos:

- A automação inteligente da solução não apenas reduz o consumo de energia, mas também otimiza o uso de lâmpadas e eletrodomésticos. Ao evitar o funcionamento desnecessário desses equipamentos, a solução contribui para prolongar sua vida útil e, conseqüentemente, reduzir a necessidade de manutenções e substituições precoces. Essa otimização gera economia financeira a longo prazo e minimiza o impacto ambiental associado à produção e descarte de equipamentos.

Em suma, os resultados esperados da implementação da solução proposta abrangem uma combinação de benefícios significativos, incluindo economia de energia, aumento do conforto e conveniência para os usuários, e maior durabilidade dos equipamentos. Esses resultados se traduzem em impactos positivos tanto para o bolso dos moradores quanto para o meio ambiente.

Detalhes da Solução (desenvolvimento)

Nas seções a seguir, exploraremos como cada componente da solução foi desenvolvido, e como eles integram entre si, seguindo a estrutura apresentada no enunciado. Para facilitar o entendimento e composição da nota final, optamos por nomear cada seção de acordo com a disciplina.

Artificial Intelligence with Computer Systems and Sensors (AICSS)

No coração da solução temos um dispositivo ESP32 e um Raspberry Pi instalados no quadro central de energia, que trabalham em conjunto. Ambos estão conectados à rede Wifi da residência, mas existe a possibilidade de que os dois dispositivos se comuniquem diretamente via pinos de IO ou via protocolos sem fio, como BLE.

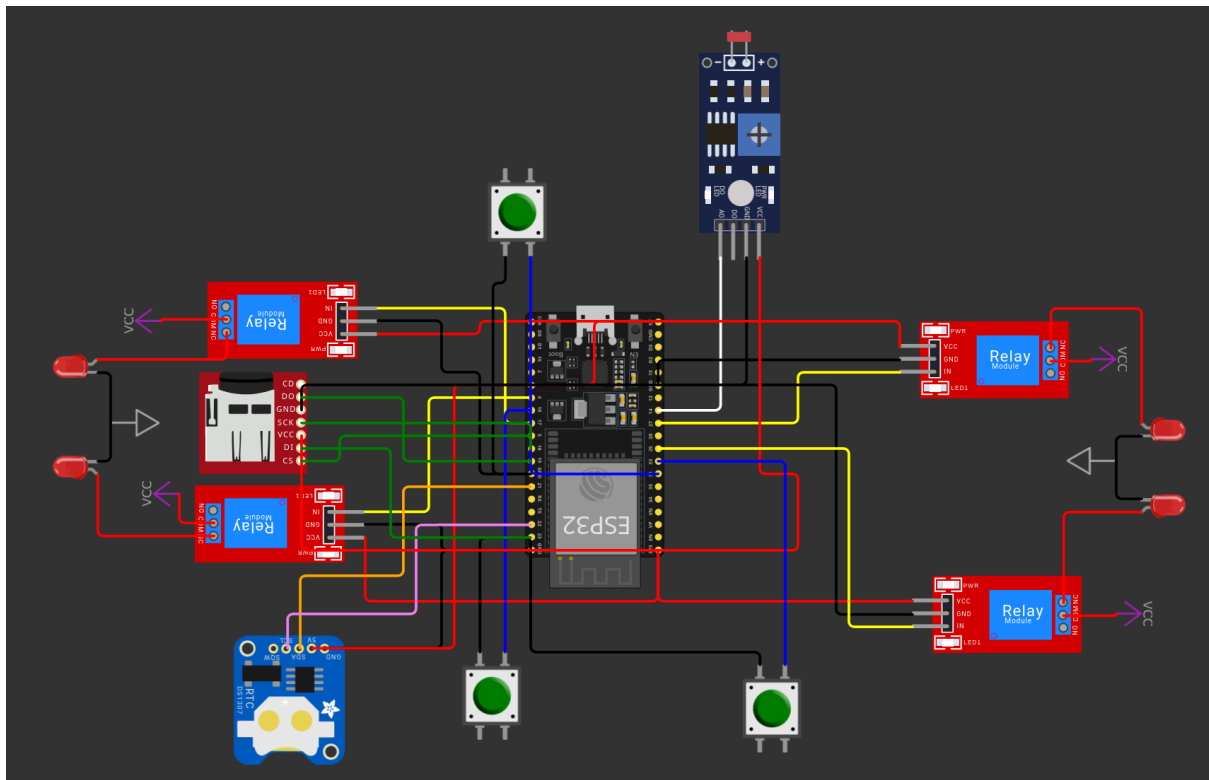
Em estruturas residenciais onde o acesso cabeado individual entre o ESP32 e cada circuito controlado não seja possível, é possível utilizar dispositivos ESP32 periféricos em cada cômodo ou zona ("andar de cima", "quintal", etc), se comunicando sem fio (via rede Wifi, Zigbee ou LoRaWan, por exemplo) com o módulo ESP32 central.

O ESP32 conecta sensores de presença e luminosidade em cada cômodo da área interna e a área externa da residência para controlar a ativação e desativação das lâmpadas, com base em ocupação e disponibilidade de luz natural, gerando eventos na plataforma conforme alterações no estado dos dispositivos (Ex: "acender lâmpada #1") ou leitura dos sensores (Ex: "movimento detectado no cômodo X") ocorrem.

O mesmo conceito poderia ser aplicado a dispositivos conectados às tomadas, como televisores, aparelhos de som, etc, tendo em vista que estes dispositivos continuam consumindo energia mesmo quando estão "desligados", no estado chamado de "standby". De acordo com o [artigo](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666546822000544)¹, **a automação de controle inteligente de acionamento de luzes e dispositivos pode trazer uma economia de até 30% na conta de energia elétrica de uma residência convencional.**

¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666546822000544>

Sobre a simulação



Uma demonstração completa da solução pode ser acessada em https://www.youtube.com/watch?v=S_Mf1gLiIYA. O projeto no Wokwi, com todos os fontes, pode ser acessado em: <https://wokwi.com/projects/414702202497227777>

O diagrama acima representa uma solução alinhada com o escopo da arquitetura apresentada anteriormente, com duas zonas internas (cada uma representando um cômodo), cada uma com duas lâmpadas (representadas pelos leds à esquerda, na simulação) controladas por relés individuais e dois botões representando sensores de presença MMWAVE (botão pressionado = presença detectada), além de uma zona externa com duas lâmpadas (leds à direita) e um sensor de luminosidade (LDR).

Observe que optamos por utilizar sensores MMWAVE ao invés de sensores PIR para detecção de movimentos, apesar de estarem simulados via botões no Wokwi. Isso garante que a detecção de movimentos seja mais precisa e evite o famoso efeito "do banheiro com sensor de presença", que acaba apagando a luz enquanto o usuário ainda está presente.

É possível também observar dois componentes adicionais na arquitetura: Um leitor de cartão SD e um módulo RTC:

- O leitor de cartão é utilizado na simulação para armazenar os eventos gerados em um arquivo events.txt, simplificando a simulação sem criar dependência direta com a aplicação Python. Na solução definitiva, ele poderia ser mantido para armazenar parâmetros de configuração offline, e permitir que as regras de automação mais recentes sigam funcionando mesmo após a impossibilidade de comunicação com a aplicação principal.

- O módulo RTC é utilizado para fornecer data/hora para o microcontrolador, permitindo que os eventos gerados contenham informações precisas de data e horário.

O código foi totalmente otimizado para utilizar os menores tipos de dados possíveis, garantindo uma execução limpa e sem riscos de atingir os limites de memória do ESP32.

Para efeitos de demonstração, as lâmpadas internas foram configuradas para acenderem apenas quando a luminosidade externa seja insuficiente (indicando que é noite, ou que não haja luz natural suficiente) e é detectado movimento no cômodo. Porém, é esperado que em alguns cenários o usuário possa utilizar o interruptor convencional da parede para acender a luz, mas para evitar adicionar muita complexidade à solução, optamos por simplificar e seguir com uma abordagem totalmente automatizada. Alternativamente, seria também possível incluir sensores de luminosidade nos cômodos internos, adicionando mais um grau de informação para que a inteligência da automação decida se as lâmpadas acendem ou não.

Para as lâmpadas externas, estamos considerando que quaisquer leitura abaixo de 500lux no sensor LDR indica que não há luminosidade suficiente, o que normalmente indica que é noite. A primeira lâmpada acende automaticamente sempre que o LDR indique menos de 500lux, desligando quando o LDR indica mais de 500lux. Isso garante que a área coberta pelas câmeras (que por algum motivo maior não possuem infravermelho) esteja sempre iluminada, seja por luz natural ou artificial. A segunda lâmpada simula um espaço externo que não está coberto por câmeras e, sendo assim, desliga automaticamente após alguns segundos após nenhum movimento detectado.

Statistical Computing with R (SCR)

Neste tema, optamos por criar uma série de análises baseadas nos projetos de Eficiência Energética da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), disponibilizados publicamente em <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/projetos-de-eficiencia-energetica>.

A aplicação principal, detalhada na seção [Computational Thinking with Python \(CTWP\)](#), já integra a execução do script R e o disparo de todas as análises. Porém, o código fonte do script completo (escrito em R) pode ser encontrado em: <https://github.com/FIAP-IA2024/global-solution/blob/main/scr/analysis.r>

O script obtém os dados em formato CSV, efetua a limpeza e preparação das análises, e gera os gráficos.

Nossa primeira análise é exploratória, com medidas de tendência central e dispersão para o custo total de projetos:

Resultados obtidos:

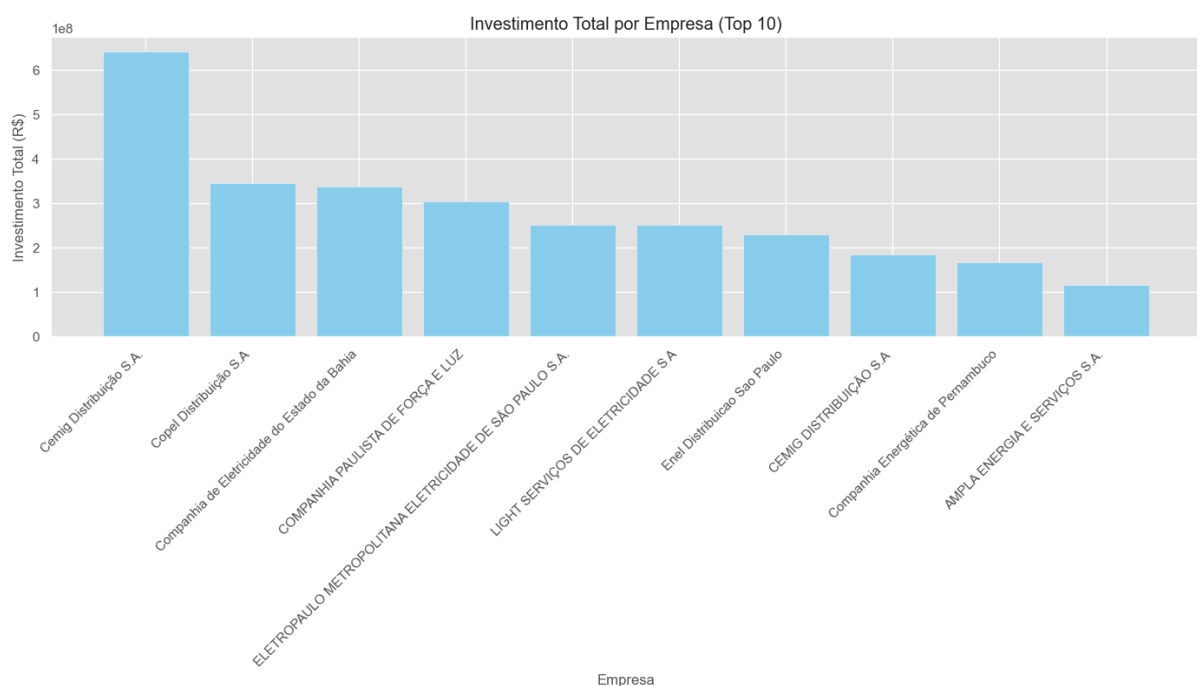
- Média do Custo Total dos Projetos: R\$ 1.338.075,90
- Mediana do Custo Total dos Projetos: R\$ 322.908,36
- Variância do Custo Total dos Projetos: R\$ 2.352.563,12
- Desvio Padrão do Custo Total dos Projetos: R\$ 4.850.322,84

Nossa próxima análise mostra uma visualização de investimentos das empresas de energia e o valor economizado:

	NomAgente	Total Custo (em milhões de R\$)	Energia Economizada (kWh)	Total de Projetos
0	Cemig Distribuição S.A.	R\$ 641.87 milhões	450,336.05 kWh	93
1	Copel Distribuição S.A	R\$ 344.91 milhões	171,940.33 kWh	255
2	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia	R\$ 337.68 milhões	314,712.64 kWh	144
3	COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ	R\$ 304.29 milhões	572,191.55 kWh	107
4	ELETROPAULO METROPOLITANA ELETRICIDADE DE SÃO PAULO S.A.	R\$ 251.98 milhões	611,177.68 kWh	166

Aqui podemos observar que existe uma correlação positiva entre o investimento e a economia obtida em cada, mas a relação não estabelece tendência entre as empresas.

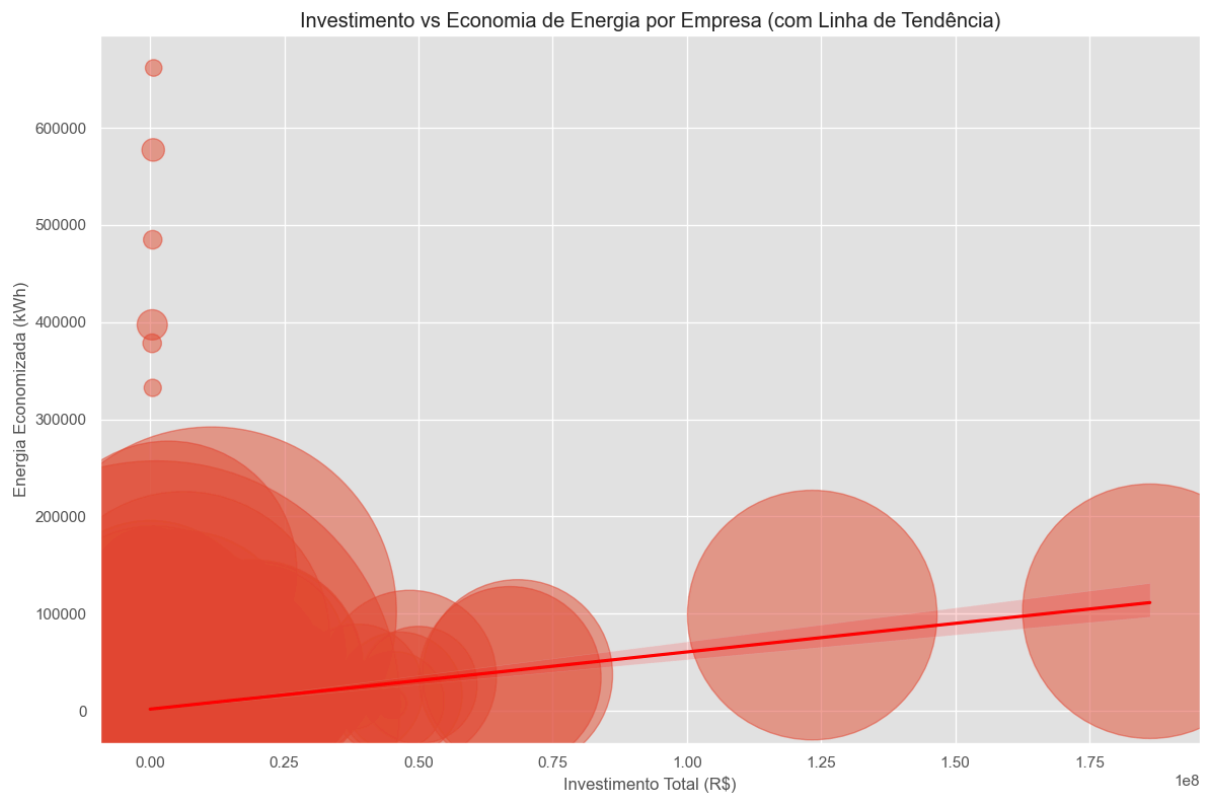
Em seguida, plotamos a distribuição dos investimentos por empresa em um gráfico de barras.



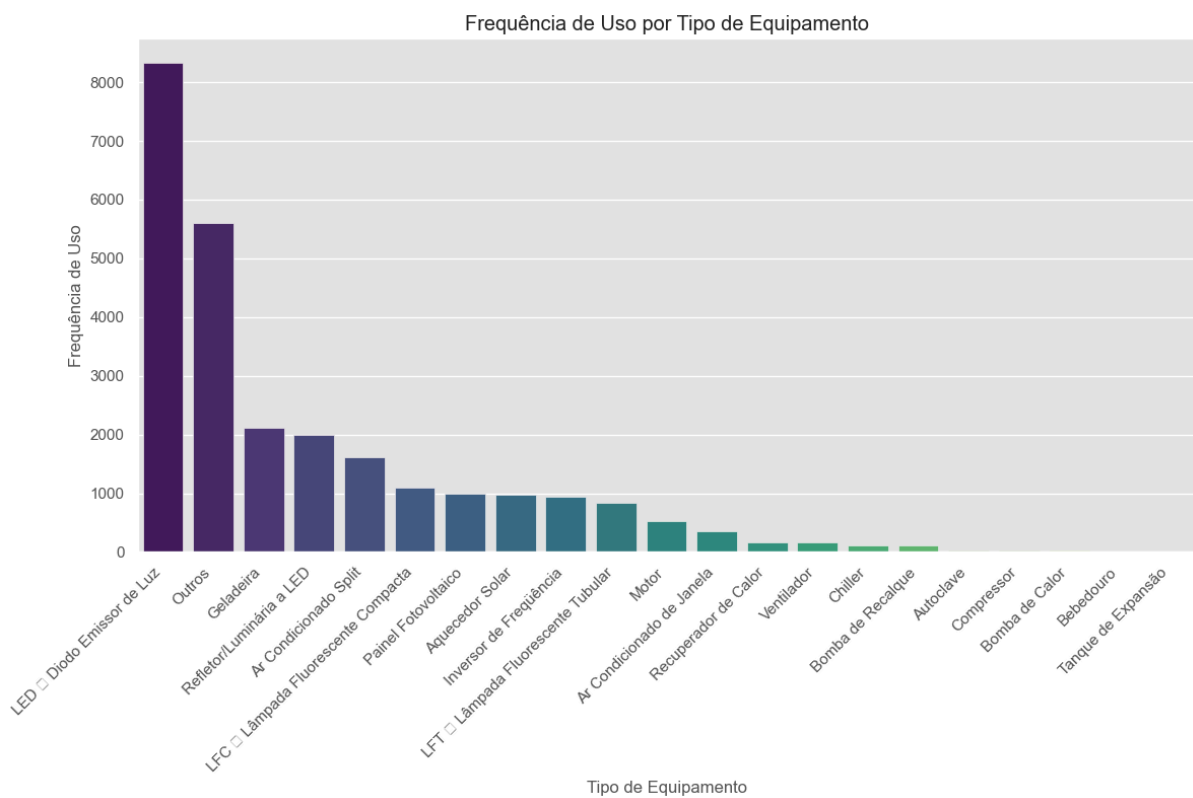
Uma conclusão interessante do gráfico acima é a observação de que a Cemig investiu praticamente o dobro da segunda colocada (Copel), mas se observarmos os valores da tabela anterior, veremos que outras empresas atingiram uma maior economia de energia com menos investimento, como é o caso da Eletropaulo. Isso pode indicar que algumas empresas são mais eficientes em seus projetos, conseguindo **maximizar a economia com menor investimento**.

Esta tendência também sugere que fatores como o **tipo de equipamento utilizado** ou a **qualidade da implementação** dos projetos podem ter um papel significativo na economia de energia, não sendo apenas o valor investido o determinante.

Outra maneira de visualizar isso é utilizando um gráfico de dispersão com linha de tendência, a fim de tentar entender se existe uma tendência óbvia que ligue investimentos em projetos de otimização de energia e economia obtida:



Exploramos também a distribuição da frequência de utilização por tipo de equipamento, a fim de melhor entender quais dispositivos utilizados em instalações residenciais e comerciais têm maior influência no consumo energético:



Insights Práticos

A partir da análise, podemos destacar alguns insights importantes:

- **Inovação e Crescimento Econômico:** Empresas com maiores investimentos em eficiência energética, como a Cemig, demonstram um compromisso com a inovação e podem ser parceiras estratégicas no desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis. A colaboração com essas empresas pode acelerar a pesquisa e a implementação de soluções mais eficazes, impulsionando o crescimento econômico do setor.
- **Justiça Social:** A análise revelou a necessidade de ampliar projetos de eficiência energética em comunidades de baixa renda. Iniciativas como a substituição de lâmpadas incandescentes por LED em residências populares podem gerar economia significativa na conta de luz, beneficiando diretamente a população mais vulnerável.
- **Preservação Ambiental:** A economia de energia alcançada pelos projetos analisados tem um impacto direto na redução da emissão de gases de efeito estufa. A promoção de tecnologias e práticas eficientes contribui para a preservação do meio ambiente e para um futuro mais sustentável.
- **Transição para Fontes Sustentáveis:** A crescente adoção de tecnologias como iluminação LED e sistemas de refrigeração de alta eficiência demonstra uma tendência positiva na transição para uma matriz energética mais limpa. Esses avanços tecnológicos, aliados a políticas de incentivo, podem acelerar a adoção de fontes de energia renováveis e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Conclusão

Nesta análise exploratória, utilizamos técnicas de estatística descritiva e visualização de dados para entender os padrões de consumo energético e as oportunidades de eficiência. Os insights obtidos ajudam a orientar decisões que promovam inovações tecnológicas, justiça social e preservação ambiental no setor energético brasileiro.

Próximos Passos

- **Análise de Correlação:** Realizar uma análise de correlação entre variáveis, como custo do projeto e economia de energia, para identificar fatores críticos de sucesso.
- **Modelagem Preditiva:** Desenvolver um modelo preditivo para prever impactos futuros dos projetos com base em dados históricos, auxiliando na tomada de decisões mais precisas.
- **Análise de Clusters:** Agrupar projetos similares para definir estratégias mais direcionadas e identificar padrões comuns de sucesso em eficiência energética.
- **Relatório Detalhado e Apresentação:** Compilar os resultados da análise em um relatório detalhado para stakeholders e criar apresentações para facilitar a comunicação dos insights.
- **Política de Incentivos e Recomendações:** Sugerir recomendações de políticas de incentivo à eficiência energética focadas em áreas com maior potencial de economia e impacto social positivo.

- **Monitoramento Contínuo:** Desenvolver um plano de monitoramento contínuo para garantir a eficácia dos projetos de eficiência energética e ajustar estratégias conforme necessário.

Cognitive Data Science (CDS)

O banco de dados relaciona dados históricos de consumo obtidos dos sensores com informações externas (dados governamentais sobre consumo energético, conforme a seção CDS), permitindo a criação de dashboards com estatísticas úteis para avaliação e direcionamento do consumo energético da residência e alimentação de modelos de machine learning (futuramente) que auxiliem na tomada de decisões e automações da solução. Além disso, os dados coletados permitem uma análise detalhada de tendências de consumo e a aplicação de políticas de economia baseadas em horários de pico ou horários de tarifa diferenciada, em regiões onde existe essa diferenciação.

A aplicação principal interage diretamente com o banco de dados para exibir os dashboards (mais sobre isso na seção [Computational Thinking with Python \(CTWP\)](#)), e a estrutura responsável por armazenar dados externos de consumo histórico no Brasil consiste em três tabelas:

- **state:** Estados brasileiros (SP, RJ, etc)
- **consumption_type:** Tipo de consumo (Total, Cativo, Outros)
- **energy_data:** Contém o consumo histórico de cada estado por ano/mês.

Já os dados para armazenamento histórico dos eventos capturados é distribuído em outras 3 tabelas:

- **zones:** Responsável por armazenar as zonas (cada cômodo, área externa, etc).
- **device:** Armazena dados dos dispositivos (sensores).
- **device_event:** Armazena os eventos capturados dos dispositivos.

Computational Thinking with Python (CTWP)

A aplicação central, rodando no Raspberry Pi, coleta dados via MQTT, gerencia regras automatizadas e alimenta dashboards que são acessados via interface web pelo usuário.

Optamos por utilizar um Raspberry Pi devido ao excelente balanço entre simplicidade, consumo energético, poder de processamento e armazenamento do dispositivo, permitindo que seja possível executar a aplicação central (escrita em Python) e o banco de dados localmente, sem que haja dependência de uma conexão constante à Internet. Em uma versão ampliada da solução, poderíamos ter a aplicação central se comunicando com uma estrutura em nuvem (como AWS IoT Core), fazendo o enfileiramento de mensagens MQTT localmente. Em alguns casos, pode ser possível inclusive eliminar totalmente o Raspberry Pi, de forma que a aplicação central seja totalmente hospedada na nuvem, e o próprio ESP32 principal da residência faça o enfileiramento de mensagens MQTT para envio à nuvem. De qualquer forma, nenhuma dessas abordagens altera a essência de inteligência e automação da solução.

Para o banco de dados local da solução, optamos por utilizar o SQLite, a fim de otimizar a utilização do hardware. Porém, em uma versão ampliada da solução, onde a aplicação central seja "multi-tenant" e seja executada na nuvem, devemos optar por um SGBD mais adequado à proposta, como o Oracle ou PostgreSQL.

Recursos da Aplicação

- **Coleta e Armazenamento de Métricas em tempo real:** Os eventos gerados pelo ESP32 são recebidos pela aplicação via MQTT, e então tratados e armazenados no bando de dados local, permitindo exibir estatísticas de consumo de energia, a tarifa de energia e o custo total em tempo real.
- **Relatórios de Eficiência:** Exibe o custo total por zona e dispositivo, além de gráficos interativos de consumo por zona e dispositivo.
- **Filtros interativos:** Permite selecionar zonas, dispositivos e períodos específicos para visualizar os dados.
- **Simulação de eventos:** O arquivo `mqtt.py` simula uma conexão entre um microcontrolador e a aplicação Python, enviando eventos dos dispositivos registrados, como leituras de sensores e consumo de energia.
- **Análise histórica do consumo de energia elétrica no Brasil:** A aplicação inclui gráficos e relatórios baseados em dados históricos de consumo, utilizando fontes confiáveis, como a **Base dos Dados**.
- **Análise Estatística com R:** Exploração de dados de projetos de eficiência energética disponibilizados pela **ANEEL**, utilizando estatísticas descritivas, gráficos e clusterização para identificar padrões e propor soluções sustentáveis.
- **Otimização de Iluminação com AICSS:** Integração com um circuito simulado no Wokwi usando **ESP32**, sensores LDR e ultrassônico para controlar iluminação interna e externa.

Tecnologias utilizadas

- **Streamlit:** Para criar a interface de usuário interativa.
- **Paho MQTT:** Para simulação de comunicação entre a aplicação e dispositivos.
- **SQLite:** Para armazenamento dos dados do consumo energético e eventos dos dispositivos.
- **Plotly:** Para criação de gráficos interativos.
- **R:** Para análise estatística dos dados de eficiência energética.
- **Python 3.x:** Linguagem de programação utilizada para implementar toda a lógica do sistema.
- **Wokwi:** Simulador para desenvolvimento do circuito **AICSS**.

Utilizando a aplicação

Os usuários acessam a aplicação através do navegador web, apontando para o IP do servidor (no Raspberry Pi) e porta 8501.

Um vídeo completo com uma demonstração de todos os recursos da aplicação pode ser acessado em <https://www.youtube.com/watch?v=EPctkxhwnlY>.

A interface possui 3 abas: CTWP, CDS e SCR, cada uma exibindo informações de cada uma das disciplinas:



Alguns gráficos permitem interação e filtragem de dados com base nos parâmetros selecionados:



Os custos são calculados automaticamente com base no consumo acumulado dos dispositivos:

Relatórios de Eficiência

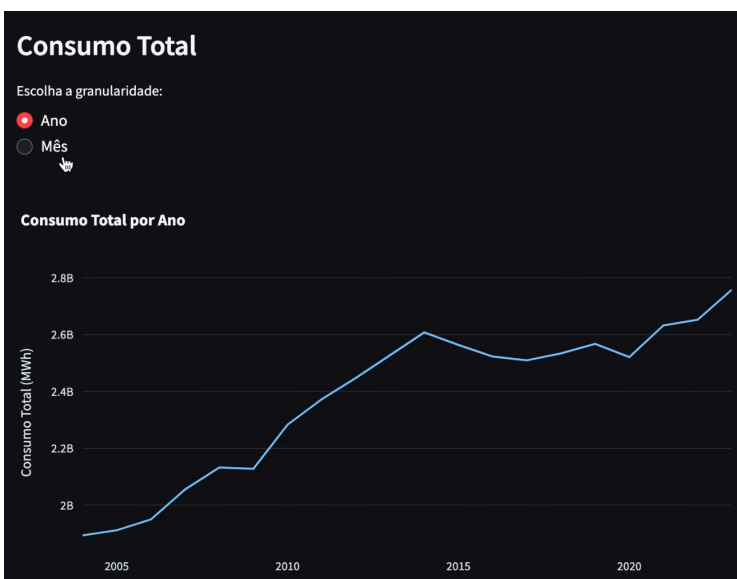
Custo por Zona

ID	Zona	Custo Total (R\$)
1	Living Room	0.15
2	Kitchen	0.33
3	Bedroom	0.8
4	Garage	0.01

Custo por Dispositivo

ID	Nome	Tipo	Potência (W)	Custo (R\$)
1	Ceiling Lamp	lamp	15	0.15
3	Light Sensor	light-sensor	None	0.33
4	Table Lamp	lamp	10	0.8
5	Garage Light	lamp	20	0.01

Os dados de consumo históricos, previamente carregados na base da aplicação, também são exibidos da mesma maneira:



Na aba SCR é possível executar o script R e gerar as análises para exibição:

CTWP CDS **SCR**

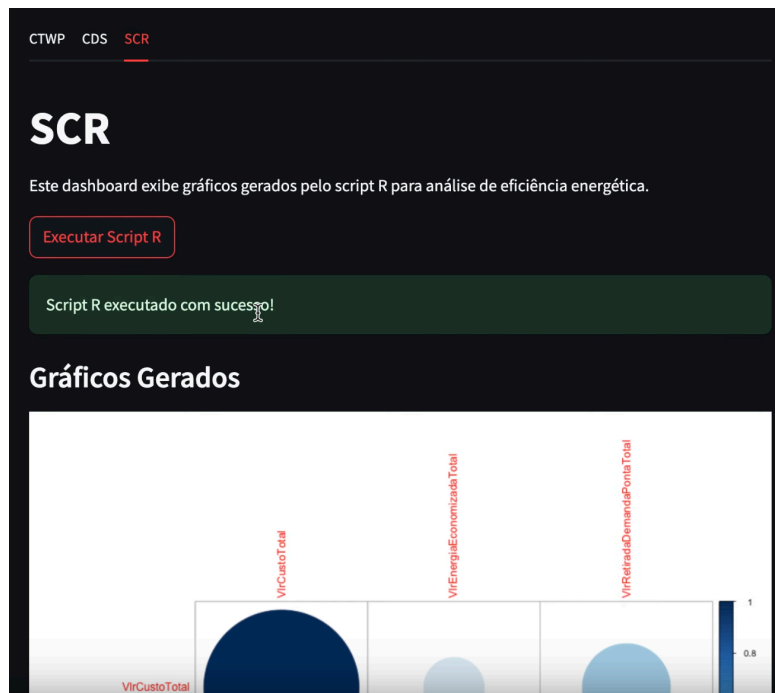
SCR

Este dashboard exibe gráficos gerados pelo script R para análise de eficiência energética.

Executar Script R

Gráficos Gerados

Nenhuma imagem foi encontrada na pasta 'scr/outputs'. Execute o script R para gerar os gráficos.



As análises geradas são as mesmas já detalhadas na seção [Statistical Computing with R \(SCR\)](#), e aqui temos apenas uma maneira conveniente de executá-las.

Conclusão

O desenvolvimento deste protótipo de solução integrada para a gestão inteligente de energia residencial proporcionou aprendizados valiosos e destacou os desafios envolvidos na implementação de tecnologias emergentes. Durante o processo, foi possível aprofundar o conhecimento em áreas como integração de dispositivos IoT, análise estatística e desenvolvimento de aplicações interativas. Além disso, a experiência demonstrou a importância de alinhar soluções tecnológicas com os princípios de acessibilidade, sustentabilidade e eficiência energética.

Entre os principais aprendizados, destacamos:

- **Importância da Simplicidade:** A usabilidade da solução foi um foco constante. Percebemos que interfaces intuitivas e automação clara são fundamentais para a aceitação dos usuários, especialmente aqueles com menor familiaridade tecnológica.
- **Viabilidade Técnica:** A combinação de ESP32 e Raspberry Pi mostrou-se eficaz para criar um sistema modular e expansível. Essa arquitetura facilita a adaptação da solução a diferentes cenários residenciais.
- **Impacto dos Dados:** A análise de consumo energético utilizando R evidenciou a relevância dos dados históricos e preditivos para a tomada de decisões mais assertivas.

No entanto, enfrentamos desafios que precisam ser superados em futuras iterações:

- **Limitações de Infraestrutura:** A implementação em residências mais antigas ou com baixa conectividade ainda representa um obstáculo técnico e financeiro.
- **Interoperabilidade:** Garantir a integração entre diferentes dispositivos e protocolos continua sendo uma barreira significativa, especialmente em sistemas heterogêneos.
- **Segurança e Privacidade:** A coleta de dados detalhados demanda atenção especial para evitar vulnerabilidades e garantir que os dados dos usuários sejam tratados de forma ética e segura.

Esses desafios, embora complexos, oferecem oportunidades para inovação e melhoria contínua. A experiência adquirida reforça a necessidade de buscar soluções escaláveis e adaptáveis, que possam beneficiar uma ampla gama de residências, contribuindo para um futuro mais eficiente e sustentável.

Por fim, este protótipo representa apenas o início de uma jornada promissora. Acreditamos que, com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, é possível não apenas melhorar a solução proposta, mas também criar um impacto significativo no consumo energético global e no bem-estar das pessoas.