



## **Monitoramento do Custo de Energia Elétrica Industrial**

**Autores: André Monteiro da Rocha, Gabriel da Fonseca Nunes<sup>1</sup>**

**Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Fumagalli**

### **Resumo**

Atualmente, um dos grandes desafios no ramo industrial conceitua-se na busca por maior produção com menor custo, sendo um fator de grande relevância a redução de custos referentes a energia elétrica consumida por máquinas e equipamentos de um processo. Deste modo, este trabalho tem por finalidade desenvolver um sistema de monitoramento de energia elétrica industrial que informe o custo de energia de cada equipamento e máquina, através da criação de um medidor de energia que mostra o consumo de energia e seu custo monetário em um sistema supervisão. Um protótipo é desenvolvido com sensores e um sistema de supervisão, os quais são empregados no projeto através da montagem de um sistema que faz a medição e acompanhamento do custo de energia de duas lâmpadas inteligentes que são monitoradas em uma interface homem-máquina. Com os testes, é possível constatar que há viabilidade do uso do sistema de monitoramento na indústria através do acompanhamento do consumo de energia elétrica e custo monetário de cada equipamento conectado ao sistema.

**Palavras-chaves:** Monitoramento. Energia. Supervisórios. Custo.

### **Abstract**

Currently, one of the major challenges in the industrial sector is conceptualized in the search for greater production at a lower cost, a factor of great relevance being the reduction of costs related to the electrical energy consumed by machines and equipment in a process. Thus, this work aims to develop an industrial electric energy monitoring system that reports the energy cost of each equipment and machine, by creating an energy meter that shows the energy consumption and its monetary cost in a system. supervisory. A prototype is developed with sensors and a supervision system, which are used in the project by assembling a system that measures and monitors the energy cost of two smart lamps, being monitored on a human-machine interface. With the tests, it is possible to verify that there is feasibility of using the monitoring system in the industry by monitoring the consumption of electricity and monetary cost for each equipment connected to the system.

**Keywords:** Monitoring. Energy. Supervisory. Cost.

---

<sup>1</sup> Faculdade de Tecnologia Termomecânica, Centro Educacional da Fundação Salvador Arena, Estrada dos Alvarengas, 4001 - São Bernardo do Campo - SP



## 1. Introdução

No final do século XIX houve o início da exploração comercial da energia elétrica no mundo, esse foi um processo de valorização crescente dessa fonte de energia. Nesse mesmo período estava acontecendo a transição da primeira para a segunda revolução industrial, na qual começaram surgir as indústrias e consequentemente o maior uso da energia elétrica (GOMES E VIEIRA, 2009). No Brasil em 1883, foi inaugurada a primeira usina hidroelétrica, localizada em Ribeirão de Inferno, afluente do Jequitinhonha, e com o crescimento do consumo e a política nacionalista da era Getúlio Vargas e dos governos militares o foco foi à criação de grandes hidroelétricas (CAMPOS, 2016).

Segundo Januzzi (2007), paralelamente à criação de usinas hidrelétricas, houve também investimentos na formação de concessionárias nacionais e estrangeiras no Rio de Janeiro e em São Paulo. Há neste mesmo momento a criação da Companhia Brasileira de Energia Elétrica (CBEE), visando à exploração de praticamente todos os serviços urbanos de utilidades públicas, como bondes, ônibus, iluminação pública, produção e distribuição de eletricidade.

A evolução da energia elétrica com o avanço da indústria estimulou o surgimento do controle automático de processos. Este controle a partir do uso de microcontroladores e *softwares* supervisórios tem o objetivo de obter o monitoramento de processos industriais a partir de Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), que são sistemas que utilizam *software* para monitorar e supervisionar as variáveis e dispositivos de um sistema de automação a partir de uma interface homem-máquina (IHM) (OLIVEIRA, 1999).

Segundo Fornazari (2016), houve um grande aumento no setor de controle de energia, na qual através de técnicas inteligentes tem-se um controle maior de algumas variáveis, como tensão e corrente, todo esse processo busca evoluir o controle e automação no setor de energia elétrica. O principal objetivo de monitorar variáveis de energia é a redução de custos, visto que em uma indústria o custo da energia elétrica pode representar mais de 40% de seus custos de produção. Em vista disso, seu fornecimento com segurança, qualidade adequada, custos módicos e realizar o devido monitoramento do consumo é imprescindível para a garantia da competitividade da indústria nacional. Entretanto, nos últimos anos o setor tem seguido no sentido oposto, com constantes elevações no custo da energia elétrica (FIRJAN, 2016).



De acordo com Soares (2014), o uso adequado e eficiente da energia elétrica para cada processo deve estar presente no planejamento das indústrias, sendo que este uso adequado proporciona a redução dos custos operacionais e consequentemente a redução dos custos de produção. Com o uso eficiente da energia elétrica e cada equipamento mais bem alocado, a indústria terá melhor utilização das instalações e equipamentos elétricos, tendo uma redução no consumo de energia e consequente economia nos custos da empresa.

Companhia Paranaense de Energia (2005) relata que muitas vezes o acompanhamento do consumo através das contas de energia não é suficiente para o melhor conhecimento de como a energia é consumida por diversos equipamentos e máquinas instalados, pois apenas através da conta de energia não há como saber a influência que cada um tem no valor final. Para um melhor acompanhamento diário ou em tempo real, é necessário instalar medidores alternativos em cada equipamento, sendo isso essencial para analisar quais pontos é necessário priorizar para identificar ações a serem realizadas para diminuir o consumo.

Os sistemas automatizados de monitoramento de energia elétrica podem ser implementados tanto em um único aparelho como em vários equipamentos, esta aplicação é de extrema significância para o setor. Destaca-se como fator principal, a redução de gastos que podem ser evitados tanto pelo consumidor final como pela concessionária de energia. O combate a perdas e maior eficiência energética são outros fatores primordiais (BRITO, 2016).

Fugita (2014) relata que a tecnologia de medidores inteligentes registra o consumo de energia e comunica as informações ao fornecedor de eletricidade para ter monitoramento. A energia pode ser monitorada em tempo real, sendo o valor enviado eletronicamente para uma central do comando, que acompanha todo o consumo. Essa central de comando pode ser composta por computadores que são utilizados como uma interface homem-máquina (IHM). Medidores inteligentes economizam custos, sendo esta tecnologia viável para acompanhamento do consumidor e consequentemente regular e evitar consumo inadequado da energia elétrica (BRITO, 2016).

Diante das argumentações explicitadas, este trabalho tem o objetivo de criar um sistema de monitoramento de custo de energia industrial.



## 1.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um Sistema de Monitoramento de Consumo de Energia Elétrica Industrial que informe a quantidade de energia elétrica e seu custo monetário para cada equipamento e/ou máquina, através de um sistema que integra *softwares* de supervisão e componentes eletrônicos.

## 1.2 Objetivos Específicos

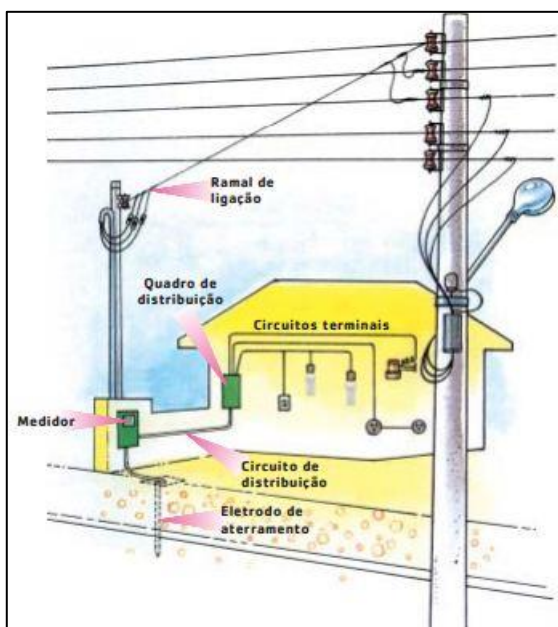
- Fazer a leitura de variáveis de energia (tensão, corrente e potência);
- Desenvolver um *software* com objetivo de realizar a leitura e transmissão dos dados entre o módulo de aquisição e a tela Interface homem - máquina (IHM);
- Desenvolver a tela de supervisão do *software* Elipse SCADA;
- Realizar o acompanhamento do consumo de energia através da IHM;
- Realizar a leitura de tensão, corrente e potência de dois dispositivos como forma de representar duas máquinas de uma indústria;
- Através da programação desenvolvida, calcular o quilowatt-hora consumido e o custo monetário de energia de cada dispositivo;
- Calibrar o sistema de monitoramento desenvolvido através de um instrumento de referência;
- Comparar o resultado teórico calculado com o resultado medido pelo sistema.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1 Medição e Custos da Energia Elétrica

Prysmian (2006) relata que a energia da concessionária é levada até ao consumidor através do circuito de distribuição, passando por transformadores instalados nos postes, a energia vai até o ramal de ligação. Após passar pelo ramal de ligação os fios são ligados até a residência ou indústria, onde a energia passa pelo medidor sendo levada até o quadro de distribuição, a partir desse acontece às ligações do local seja ele industrial, comercial ou residencial. A figura 1 ilustra a chegada da energia elétrica em uma residência.

Figura 1 – Chegada da energia elétrica em uma residência.



Fonte: Prysmian (2006).

Wolaniuk (2011) aponta que para saber o valor de energia que está sendo consumida por um determinado local, é necessário que tenha um equipamento que verifique a quantidade de energia que está chegando, para isso são usados medidores de energia. Existem diversos tipos de medidores como: Medição por transformadores diferenciais, medição por medidores resistivos de potencial, medição por sensores de correntes, dentre outros. Medidores inteligentes possibilitam ao consumidor, maior eficiência no consumo de energia, pois este terá mais informações sobre seu perfil (ANEEL, 2012). A figura 2 ilustra um medidor de energia eletrônico.

Figura 2 – Medidor de energia eletrônico.



Fonte: ANEEL (2012).

Segundo ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2012), saber calcular o consumo de equipamentos, máquinas e aparelhos contribui para reduzir o valor da conta de energia e evitar desgastes. Os equipamentos que mais consomem energia são os que têm maior valor de potência, sendo que para determinados processos um determinado equipamento A pode consumir mais energia do que outro equipamento B. Para saber o consumo de energia elétrica que um equipamento está oferecendo é necessário conhecer a tensão a que este está submetido, a potência consumida e o tempo que permanece ativo. A fórmula para o consumo de energia elétrica é relatada na equação 1.

Equação 1 – Fórmula para consumo de energia elétrica por aparelho.

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Potência em watt}}{1000} \cdot \text{tempo (número de horas)} = \text{total em kWh} \quad (01)$$

Fonte: ANEEL (2012).

Como ilustra a imagem, a potência consumida pelo aparelho para ser aplicada na fórmula tem que ser em Quilowatts (kW), com isso o consumo total é dado em Quilowatt-hora (kWh). Esse valor dado em Quilowatt-hora é multiplicado pelo custo de cada Quilowatt-hora fornecido pela concessionária de energia, e assim, tem-se o custo monetário em reais (R\$) de cada aparelho em determinado tempo. O valor que o medidor de energia mostra é o somatório do Quilowatt-hora (kWh) de todos os pontos de energia de uma residência ou indústria (FRANCHI, 2009).

## 2.2 Monitoramento Autônomo de Sistemas

Os sistemas automatizados de monitoramento de energia elétrica podem ser aplicados desde em um único aparelho isolado como também em consumidores industriais de pequeno e de grande porte. Alguns dos fatores de sua implementação são de extrema significância para o setor de energia elétrica, destacando-se um como o principal, o combate às perdas. Um exemplo é a má utilização do próprio consumidor que por falta de conhecimento desperdiça dinheiro, consumindo energia que poderia estar sendo poupada (BRITO, 2016).

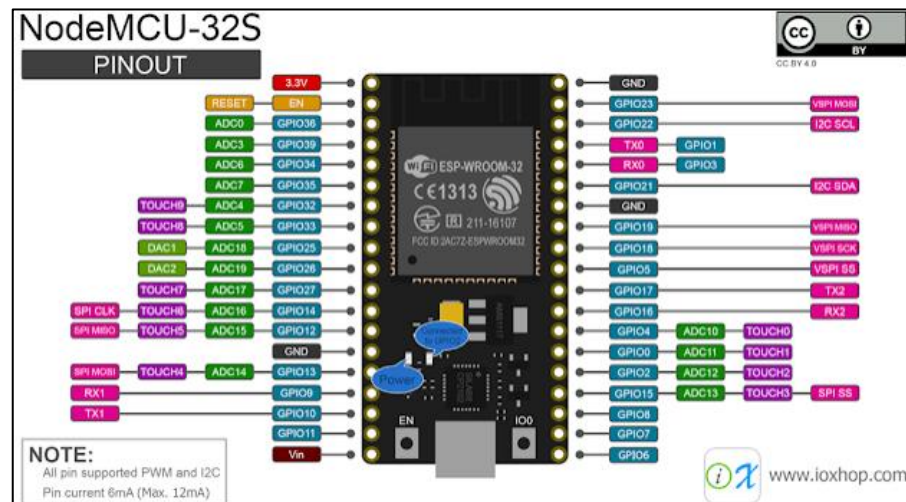
Silva (2018) relata que para monitorar o consumo de energia de um ou vários equipamentos é necessário obter o valor de corrente e tensão do equipamento por um determinado tempo, para isso é necessário o uso de sensores propriamente utilizados para esse objetivo. Através do medidor de tensão e de corrente, as variáveis são enviadas para o microcontrolador e a partir deste os valores são tratados e utilizados em um ambiente que consiga a sua visualização da forma que o consumidor necessita verificar, como por exemplo, serem visualizados em uma IHM – Interface homem-máquina.

Segundo Nascimento (2020) existem placas eletrônicas que são medidores de grandezas elétricas como, por exemplo, o módulo PZEM004T, este consegue medir diversas grandezas elétricas, como tensão, corrente e potência. Esta placa de medição pode ser ligada juntamente a um microcontrolador para prosseguir na análise dos dados e posteriormente inclusão de um monitoramento de supervisão.

Machado (2019) aponta que, para o monitoramento de energia elétrica pode ser utilizado juntamente com o módulo de aquisição PZEM o microcontrolador ESP32, este é um microcontrolador de alto desempenho para aplicações envolvendo *Wi-fi* e *Bluetooth*, dando oportunidade para futuras implementações com *Internet of Things (IOT)*. Este microcontrolador apresenta baixo consumo de energia, bem como diferentes interfaces de comunicação e o protocolo de comunicação CAN (comunicação serial síncrona). Devido a essas funcionalidades o ESP32 se torna um dos melhores microcontroladores da atualidade. A figura 3 ilustra o microcontrolador ESP32 bem como os pinos de entradas e saídas.



Figura 3 – I/Os do microcontrolador ESP32.



Fonte: Fernandok.com (2021).

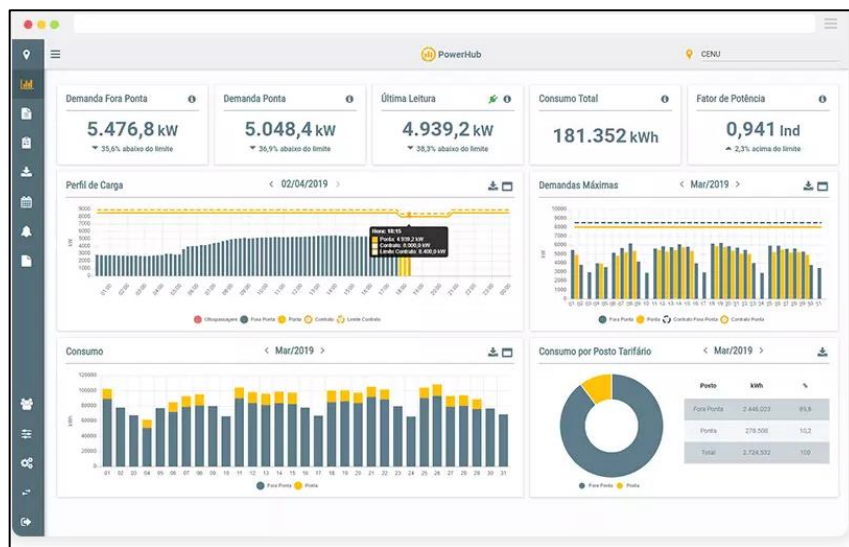
Maestrelli (2018) aponta que é possível obter a conexão do ESP32 com *softwares* de supervisão, estes são *softwares* que monitoram e supervisionam sistemas de automação através de uma tela de Interface homem-máquina (IHM). Um exemplo é o monitoramento da corrente elétrica que está sendo consumido por um equipamento e o monitoramento do custo da energia. Para obter a integração do ESP32 com o *software* de supervisão é necessária uma conexão serial, a programação do ESP32 é realizada no ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino. A troca de dados entre o microcontrolador e a tela de IHM é realizada via protocolo de rede *Modbus*, portanto é preciso acrescentar na IDE de programação a biblioteca *Modbus*, juntamente com o seu driver.

*Modbus* é um protocolo de requisição-resposta que utiliza um relacionamento mestre-escravo e nele a comunicação sempre ocorre em pares, sendo que o dispositivo responsável por iniciar cada interação é chamado de mestre. Tipicamente, o escravo é um microcontrolador e o mestre é uma interface homem-máquina (NATIONAL INSTRUMENTS, 2021).

Os Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) são sistemas que utilizam software para monitorar e supervisionar as variáveis e dispositivos de um sistema de automação a partir de uma IHM, como exemplos de variáveis monitoradas tem-se o consumo total de energia em kWh, o fator potência de uma determinada carga, também consegue-se monitorar o perfil da carga através de gráficos. (OLIVEIRA, 1999). A figura 4 ilustra a IHM de um sistema de supervisão de dados que está monitorando essas variáveis relacionadas.



Figura 4 – IHM de um sistema de supervisão de dados.



Fonte: Way2.com (2021).

Scholl (2015) aponta que Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), são sistemas que a partir da segunda metade do século XX, começaram surgir e evoluir com bastante avanço, juntamente com a tecnologia da informação. O aumento da complexidade das instalações industriais, usualmente conhecidas por plantas, faz com que grandes volumes de dados tenham de ser monitorados e analisados em curto espaço de tempo, o que é cada vez mais complexo de se fazer manualmente, o que impacta no grau de qualidade e confiabilidade do processo produtivo. A função primordial de um sistema SCADA é supervisionar e monitorar processos executados em uma planta industrial, através da visualização de variáveis do ambiente que está sendo automatizado, e das ações tomadas pelo sistema de automação (CONSTAIN, 2011).

Segundo Brito (2016) medidores inteligentes também possuem dispositivos com monitores integrados para o monitoramento do consumo energético, como exemplo de monitores têm-se computadores que são utilizados como uma interface homem-máquina (IHM). Medidores inteligentes economizam custos, sendo esta tecnologia viável para acompanhamento do consumidor e consequentemente regular e evitar consumo inadequado da energia elétrica. A interligação entre a o ESP32 e o *software* de supervisão, proporciona um monitoramento inteligente do consumo de energia elétrica.

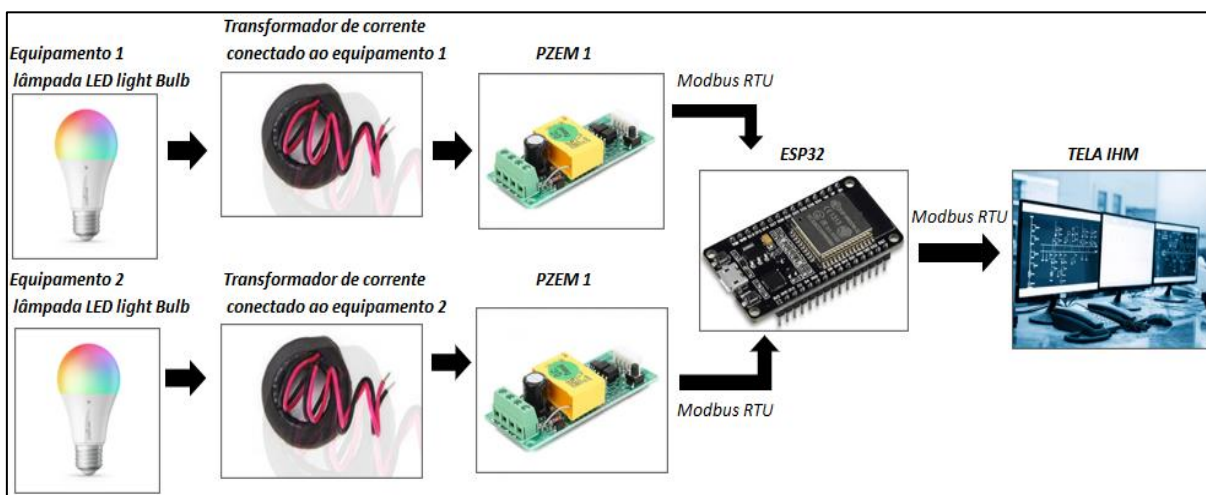
### 3. Metodologia

Para simular o funcionamento do sistema de monitoramento de energia, é realizada a medição de duas lâmpadas inteligentes que são chamadas de *LED light Bulb*, ambas simulam um processo de dois equipamentos em uma indústria, cujo objetivo é acompanhar seu consumo de energia elétrica juntamente com seu custo monetário. No *software* elipse SCADA é desenvolvido uma interface que mostra o acompanhamento.

#### 3.1 Descrição do funcionamento do projeto e estrutura da programação

No sistema é medido o custo da energia elétrica de duas lâmpadas. A corrente elétrica é capturada através do transformador de corrente conectado nos fios condutores de corrente elétrica, que faz a transformação de 1:10 da corrente e envia diretamente para o módulo de monitoramento elétrico PZEM. O PZEM faz a medição das grandezas elétricas tais como tensão, corrente, potência ativa e fator potência. É utilizado um PZEM para cada equipamento medido. Os dados coletados são enviados ao microcontrolador ESP32. Na memória do ESP32 está gravada a programação do sistema. Através de via serial as variáveis de tensão medida, corrente medida, potência medida e custos da energia calculados são transferidos do ESP32 para o computador através do protocolo de comunicação *Modbus RTU* e, então, são monitorados via *software* supervisorio através de uma IHM. Para melhor entendimento deste processo, a figura 5 ilustra o diagrama principal de funcionamento do sistema de monitoramento.

Figura 5 – Diagrama principal de funcionamento do sistema.



Fonte: Autoria própria (2021).

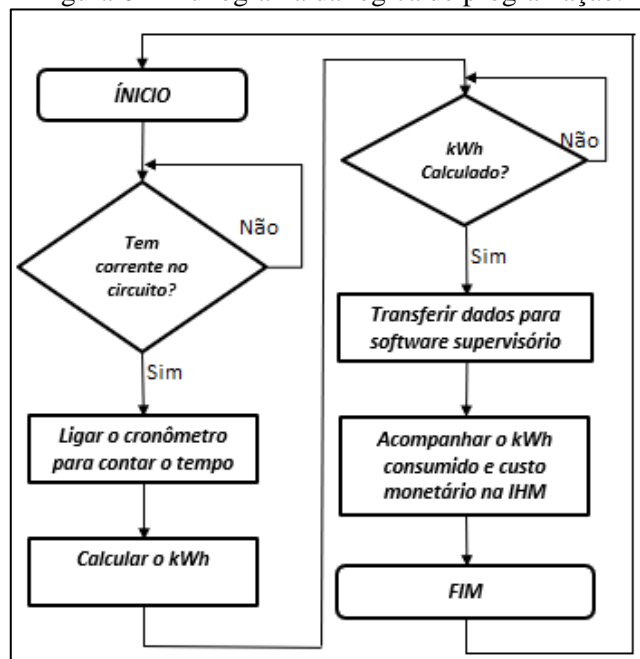
Módulo de monitoramento elétrico – PZEM 004T: O Módulo de Monitoramento Elétrico Multifunção PZEM-004T é uma pequena placa capaz de efetuar medições de várias grandezas elétricas, consegue medir potência ativa, corrente e tensão. A comunicação do PZEM com o ESP32 e do ESP32 com o Elipse é realizada através do protocolo de comunicação *Modbus* RTU. No projeto esta placa tem o objetivo de capturar as variáveis de tensão, corrente e potência através de um transformador de corrente conectado em sua entrada que faz a transformação 1:10 da corrente.

Transformador de Corrente 1:10: O transformador de corrente é um dispositivo que através de seu conjunto de espiras, tem o objetivo de aumentar ou diminuir a intensidade da corrente para um circuito secundário. De acordo com a relação de espiras, o transformador aumenta ou diminui a intensidade da corrente que está passando em suas bobinas. Para que a placa de monitoramento não corra risco de ser danificada devido a uma corrente de intensidade mais alta, é utilizado o transformador de corrente de relação de espiras 1:10 sendo assim, a corrente que chega para a entrada do módulo é reduzida 10 vezes o seu valor de entrada no primário do transformador.

Microcontrolador ESP32: Como controlador do projeto, no ESP32 é armazenada a lógica de programação do sistema de monitoramento. Na entrada do ESP32 é conectado o Módulo PZEM, em sua saída é conectado o computador que é utilizado para a IHM. O ESP32 possui uma tensão de operação de 5 V, possuindo 36 pinos de I/Os e sua programação é realizada através da plataforma de desenvolvimento do Arduino. Após o programa ser escrito e compilado corretamente, é realizada a gravação do programa na memória do dispositivo. A programação realizada para o sistema de monitoramento possui a seguinte lógica:

No início o programa verifica se há corrente e tensão no circuito, caso não tenha corrente é porque o sinal de energia foi cortado e com isso não irá complementar no custo da energia para o consumidor. Se houver tensão e corrente é iniciado o cronômetro de tempo. Nesta fase através da programação é calculado o custo de energia em kWh. Depois de calculado o valor do custo de energia, os dados são transmitidos para o computador e para o *software* de supervisão. O consumo de energia é acompanhado através da IHM. A figura 6 ilustra o fluxograma da lógica de programação.

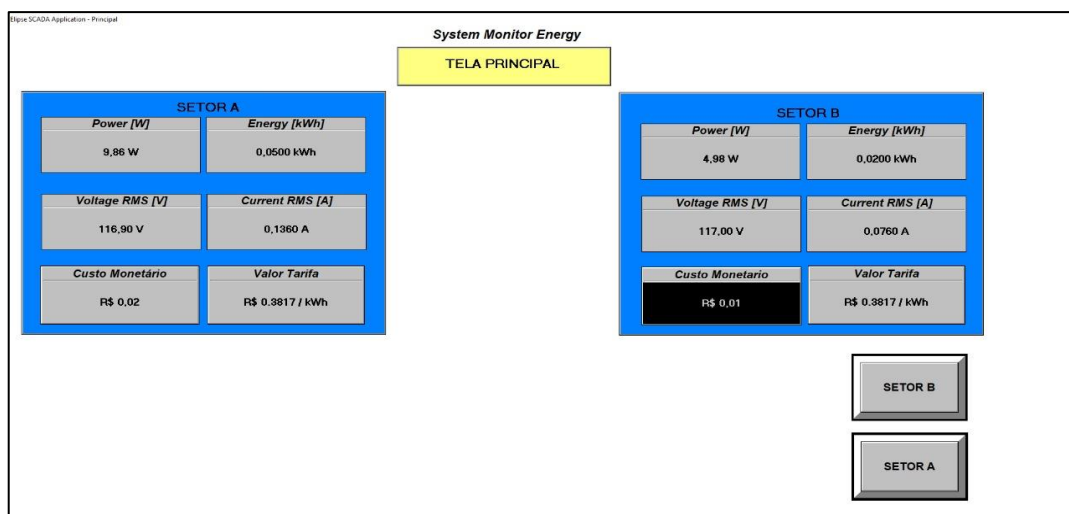
Figura 6 – Fluxograma da lógica de programação.



Fonte: Autoria própria (2021).

Após ser realizada a programação e o programa ser compilado para a memória do ESP32, é realizada a programação e montagem da *Interface* de monitoramento que será visualizada pelo usuário final através do *software* de supervisão Elipse SCADA. A tela IHM é dividida em 3 telas diferentes, chamadas de tela principal, Setor A e Setor B. Na tela principal é acompanhado as variáveis de tensão, corrente, potência, quilowatt-hora consumido e o custo monetário de cada lâmpada que representa um setor. Estas são as variáveis principais que devem ser analisadas, por isso ficam na aba principal do sistema, como ilustra a figura 7.

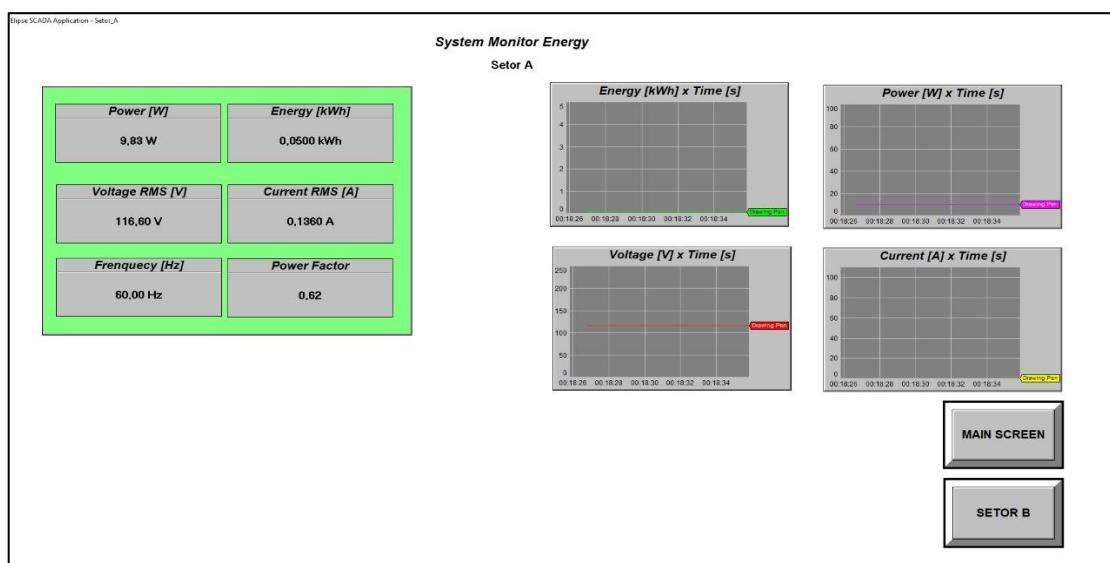
Figura 7 – Tela principal do sistema de monitoramento.



Fonte: Autoria própria (2021).

Através de botões de seleção o usuário pode navegar nas telas secundárias do sistema de monitoramento. Essas telas mostram variáveis e gráficos relacionados aos equipamentos/setor que estão sendo monitorados pela determinada tela. A figura 8 ilustra a tela de monitoramento do Setor A, que mostra variáveis de energia referentes a lâmpada A e seus respectivos gráficos.

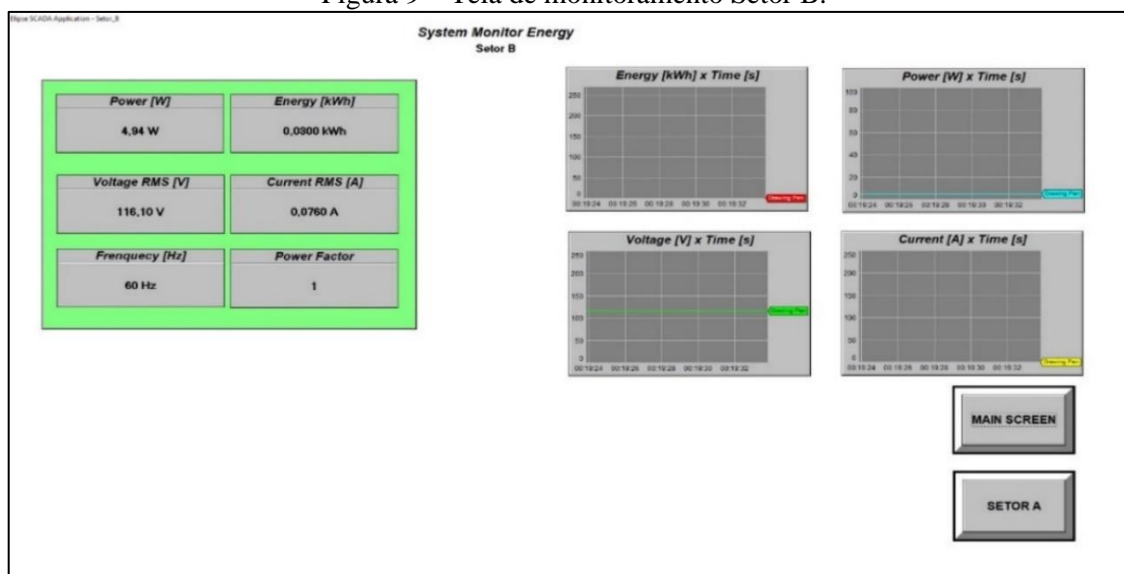
Figura 8 – Tela de monitoramento do Setor A.



Fonte: Autoria própria (2021).

A figura 9 ilustra a tela de monitoramento do Setor B, que mostra variáveis de energia referentes a lâmpada B e seus respectivos gráficos.

Figura 9 – Tela de monitoramento Setor B.

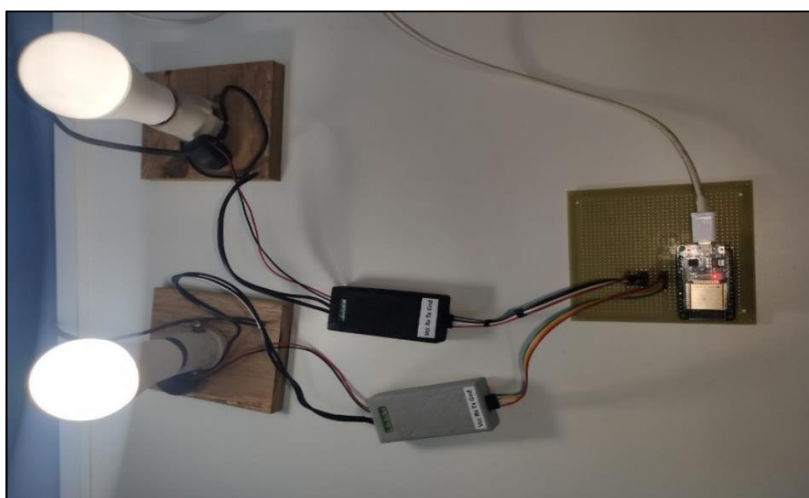


Fonte: Autoria própria (2021).

#### 4. Análise dos resultados

No projeto para a simulação de um processo industrial no qual há o monitoramento de energia, é medido o custo de energia de duas lâmpadas inteligentes que são chamadas de *LED light bulb*. A figura 10 ilustra a montagem prática das duas lâmpadas no sistema que é utilizado para a medição do custo de energia.

Figura 10 – Equipamentos e montagem do projeto.



Fonte: Autoria própria (2021).

##### 4.1 Calibração do Sistema de Monitoramento de Energia

Com objetivo de validar os valores medidos, se faz necessário realizar a calibração do sistema de monitoramento de energia. A calibração consiste na comparação entre os valores obtidos pelo sistema de monitoramento desenvolvido e um instrumento de referência. O instrumento de referência utilizado é o multímetro digital *Rich meters 100 true RMS*.

São comparados os valores de tensão e corrente em que uma lâmpada está sendo submetida. Para obter os valores medidos pelo instrumento de referência, o multímetro é colocado diretamente na lâmpada para medir qual a tensão e corrente que está chegando ao sistema. Os valores medidos pelo sistema de monitoramento são observados diretamente na tela IHM.

Para a calibração são comparados os valores de tensão e corrente que cada instrumento mostra. Primeiramente, é realizada a calibração do multímetro que é o instrumento de referência. Para realizar a calibração do multímetro são realizadas 10 medidas de corrente e tensão da rede, em momentos distintos, e, a partir dos valores observados, calcula-se a média amostral  $\bar{x}$  e o desvio médio absoluto  $\delta$ , utilizado quando há erros sistemáticos e quando não



há certeza da minimização deles. A equação 2 e 3 apresentam os cálculos de  $\bar{x}$  e  $\delta$ , respectivamente.

Equação 2 – Média amostral.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (02)$$

Fonte: Apostila de Física Experimental IFRS (2013).

Equação 3 – Desvio médio absoluto.

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (03)$$

Fonte: Apostila de Física Experimental IFRS (2013).

A Tabela 1 ilustra os valores da média amostral e desvio médio absoluto para as variáveis tensão e corrente relacionadas ao instrumento de referência.

Tabela 1 – Valores medidos de tensão e corrente da rede no medidor de referência.

Medição	Tensão (V)		Corrente (A)	
	$x_i$	$\delta_i = x_i - \bar{x}$	$x_i$	$\delta_i = x_i - \bar{x}$
1	116,4	-0,04	0,0647	0,00005
2	116,1	-0,34	0,0647	0,00005
3	116,1	-0,34	0,0647	0,00005
4	116,7	0,26	0,0646	-0,00005
5	116,7	0,26	0,0647	0,00005
6	116,9	0,46	0,0647	0,00005
7	116,4	-0,04	0,0646	-0,00005
8	116,4	-0,04	0,0646	-0,00005
9	116,4	-0,04	0,0646	-0,00005
10	116,3	-0,14	0,0646	-0,00005
<b>MÉDIA</b>	<b>116,44</b>	<b>0,196</b>	<b>0,06465</b>	<b>0,00005</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com os valores obtidos, considera-se que o valor médio da tensão e da corrente do medidor de referência é de 116,44 V e 0,06465 A, respectivamente. A incerteza da medição calculada resulta em 0,196 V para a tensão e 0,00005 A para a corrente.

A Tabela 2 ilustra os valores da média amostral e desvio médio absoluto para as variáveis tensão e corrente relacionadas ao sistema de monitoramento.

Tabela 2 – Valores medidos de tensão e corrente da rede no sistema de monitoramento.

Medição	Tensão (V)		Corrente (A)	
	$x_i$	$\delta_i = x_i - \bar{x}$	$x_i$	$\delta_i = x_i - \bar{x}$
1	116,5	0,20	0,064	0,00040
2	115,9	-0,40	0,063	-0,00060
3	116,0	-0,30	0,063	-0,00060
4	116,6	0,30	0,063	-0,00060
5	116,6	0,30	0,063	-0,00060
6	116,7	0,40	0,064	0,00040
7	116,2	-0,10	0,064	0,00040
8	116,1	-0,20	0,064	0,00040
9	116,2	-0,10	0,064	0,00040
10	116,2	-0,10	0,064	0,00040
<b>MÉDIA</b>	<b>116,3</b>	<b>0,240</b>	<b>0,0636</b>	<b>0,00048</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com os valores obtidos, considera-se que o valor médio da tensão e da corrente do medidor de referência é de 116,3 V e 0,0636 A, respectivamente. A incerteza da medição calculada resulta em 0,240 V para a tensão e 0,00048 A para a corrente. A tabela 3 ilustra a comparação entre os valores obtidos entre o sistema e o instrumento de referência.

Tabela 3 – Sistema de monitoramento *versus* Instrumento de referência.

	Tensão (V)			Corrente (mA)		
	$\bar{x}$	$\delta$	$X = \bar{x} \pm \delta$	$\bar{x}$	$\delta$	$X = \bar{x} \pm \delta$
<b>Instrumento de referência</b>	116,44	0,196	$X = 116,44 \pm 0,196$	64,6	0,05	$X = 64,6 \pm 0,05$
<b>Sistema de monitoramento</b>	116,30	0,240	$X = 116,30 \pm 0,240$	63,6	0,48	$X = 63,6 \pm 0,48$

Fonte: Autoria própria (2021).

Como ilustrado na tabela 3, quanto à tensão, nota-se que há uma variação de aproximadamente 0,14 V entre o valor médio das medidas realizadas pelo sistema de monitoramento e pelo multímetro digital. Com relação à corrente, os valores diferem cerca de 1 mA. Tais variações são compreendidas pelo fato de ambos os equipamentos terem incertezas e erros de medidas diferentes. Quanto ao desvio médio absoluto, tem-se a diferença de 0,044 V e 0,43 mA entre os dois instrumentos, assim como, os desvios médios relativos percentuais de 0,21% e 0,75% para a tensão e corrente obtidas pelo sistema de monitoramento.

O equipamento de referência possui resolução entre 0,1 mV e 1 V e precisão de  $\pm(1\% + 3D)$ , o sistema de monitoramento com relação a tensão possui resolução de 0,1 V.

Com objetivo de calibrar o sistema de monitoramento, é aplicado o método de calibração do erro relativo, pois através desse método é possível obter o erro entre a medida de laboratório e um instrumento de referência. A equação 4 ilustra o cálculo para obtenção do erro relativo entre dois instrumentos.

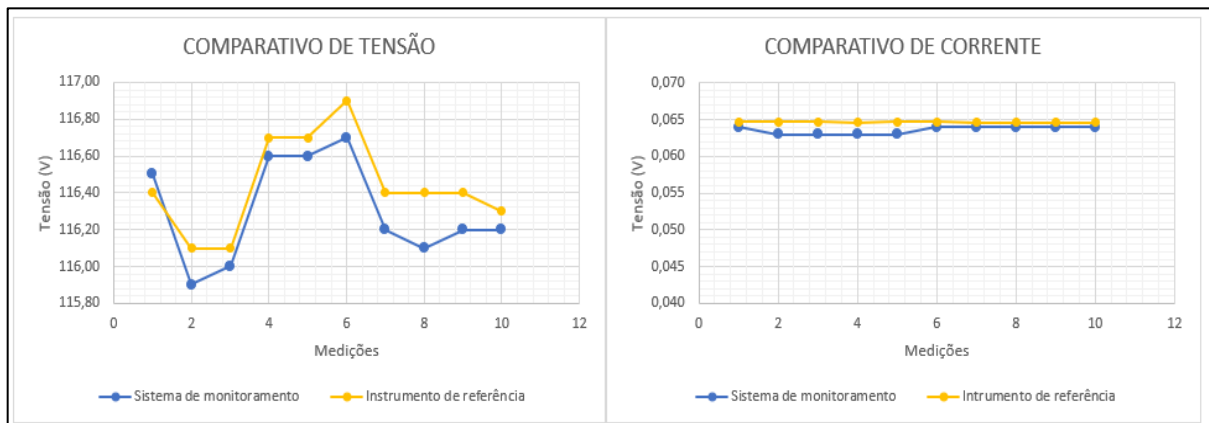
Equação 4 – Cálculo do erro relativo.

$$\text{Erro relativo (\%)} = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor de referencia}}{\text{Valor de referencia}} * 100 \quad (04)$$

Fonte: Silva (2013).

Utilizando a equação 4, na variável de valor medido é considerado os valores médios de tensão e corrente do sistema de monitoramento e na variável de valor de referência é considerado o valor médio de tensão e corrente do instrumento de referência. Conclui-se que, comparando tensões e correntes, encontram-se os erros relativos de 0,120% e 1,65%, respectivamente. Portanto, a leitura do dispositivo de monitoramento possui confiabilidade de 99,8% para tensão e 98,35% para corrente, baseando-se no multímetro utilizado como referência. A figura 11 ilustra os gráficos dessas comparações.

Figura 11 – Comparativo de tensão e corrente.



Fonte: Autoria própria (2021).

#### 4.2 Comparação do Resultado Prático versus Resultado Teórico

Objetivando quantificar o custo final de energia que cada lâmpada consome é necessário, primeiro, definir e calcular as variáveis envolvidas no cálculo do valor de energia consumido, isto é, potência, tensão e corrente. Tais variáveis já foram definidas e calibradas anteriormente. A variável do custo de energia pode ser obtida através de cálculos teóricos utilizando a fórmula indicada pela ANEEL, assim como por meio de leituras e análises práticas. Para o cálculo do kWh total consumido e do custo monetário de energia é considerado o somatório de todo o kWh consumido durante o tempo de execução do sistema ( $kWh_{consum. ant.}$ ). As medições são realizadas a cada 10ms ( $T_{entre\ medições}$ ), como é apresentado na equação 5 e 6.

Equação 5 – Fórmula do consumo total em kWh.

$$kWh_{total\ consum.} = kWh_{consum. ant.} + Pot.atual (kW) * T_{entre\ medições} (h) \quad (05)$$

Fonte: ENEL (2021).

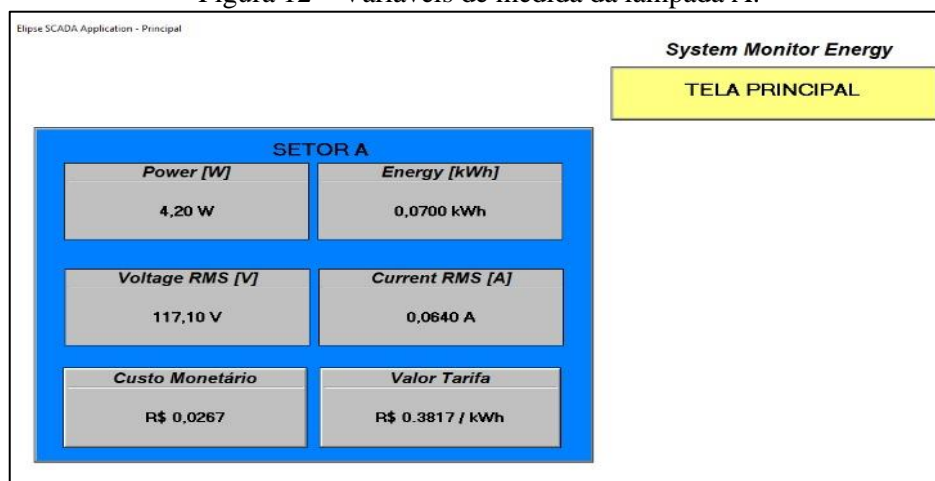
Equação 6 – Fórmula do custo monetário

$$Custo\ monetário (R\$) = kWh_{total\ consum.} * valor\ tarifa_{data\ de\ medição} \quad (06)$$

Fonte: ENEL (2021).

A figura 12 ilustra as variáveis de energia medidas na lâmpada A, juntamente com o custo monetário e o valor da tarifa estipulada em 17/05/2021 pela ENEL.

Figura 12 – Variáveis de medida da lâmpada A.



Fonte: Autoria própria (2021).

Essa lâmpada é submetida a uma tensão de 117,10 V e uma corrente de 0,0640 A, então, tem-se a potência ativa no valor de 4,20 W. Percebe-se que, o resultado prático está bem próximo do resultado teórico calculado, considerando que a lâmpada utilizada tem uma parcela de potência ativa e uma parcela de potência reativa, portanto, para chegar no resultado de potência ativa teórico, é necessário considerar o fator potência medido. Prosseguindo para o cálculo do custo de energia, é considerado que o kWh consumido está no valor de R\$ 0,38217. A comparação entre o resultado teórico e o resultado medido é ilustrado na tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis calculadas e medidas da lâmpada A.

	Resultado Teórico	Resultado Prático
<b>TENSÃO</b>	117,10 V	117,10 V
<b>CORRENTE</b>	0,0640 A	0,0640 A
<b>POTÊNCIA</b>	Tensão * Corrente = 7,4944 VA 6,333VA * 0,56 = 4,199 W	4,20 W

Fonte: Autoria própria (2021).

#### 4.3 Aplicação do Sistema de Monitoramento na Indústria

Através da calibração é provado que tanto a margem de erro como a margem de incerteza do sistema de monitoramento estão na ordem de grandeza de volts e miliamperes, com confiabilidade de medição entre 98% e 99%, portanto, o medidor de energia

desenvolvido pode ser usado para verificar o custo de energia de um ou vários equipamentos e/ou máquinas com o erro de medição pequeno.

Tendo em vista que o acompanhamento do consumo de energia pode ser acompanhado através de um *software* de monitoramento supervisorio, este pode ser usado em uma indústria com objetivo de precificar o custo de energia de cada máquina específica na produção, bem como, indicar o fator potência por setor e/ou máquina, com objetivo de monitorar e reduzir o custo de energia. Para garantir que haja real redução de energia elétrica também são necessárias outras medidas em conjunto com o sistema, tais como:

- Revisão da conta de energia elétrica e suas tarifas monetárias;
- Revisão do comissionamento da planta fabril (motores, secção dos condutores, disjuntores residuais, entre outros);
- Estudo de investimento em energias renováveis no processo fabril;
- Acompanhamento e estudo sobre o rendimento de cada equipamento e/ou máquinas.

Através de gráficos, pode-se ver a quantidade de corrente, tensão e consequentemente a potência gasta em cada horário específico e/ou tempo específico determinado. Para o cálculo do custo monetário é considerado o valor de 0,38217 R\$/kWh, porém, em uma aplicação real, o consumidor poderá trocar o valor do custo monetário, considerando que esse valor de custo do kWh varia de acordo com a cidade, data e horário que é realizada a medição de energia.

Para verificação do quanto o projeto é aceitável tanto no ramo industrial como no ramo residencial, é aberto um *google forms* para pesquisa, sendo o público-alvo os universitários de engenharia, no qual os participantes respondem às seguintes questões:

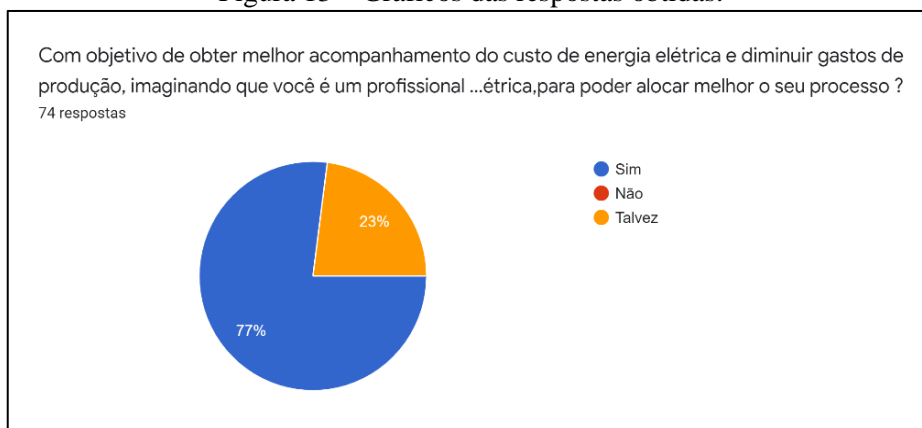
- 1- Com objetivo de obter melhor acompanhamento do custo de energia elétrica e diminuir gastos de produção, imaginando que você é um profissional de engenharia de uma indústria. Você gostaria de acompanhar o quanto cada máquina está gastando de energia elétrica, para poder alocar melhor o seu processo?
- 2- Acompanhando diariamente o gasto, ajudaria diminuir os custos mensais de energia e produção?



Cada entrevistado pode escolher 3 respostas objetivas para cada questão. Com esse método de pesquisa, tem-se a proporção de quantas pessoas entrevistadas gostariam ou não de obter o sistema de monitoramento de energia em um processo de produção.

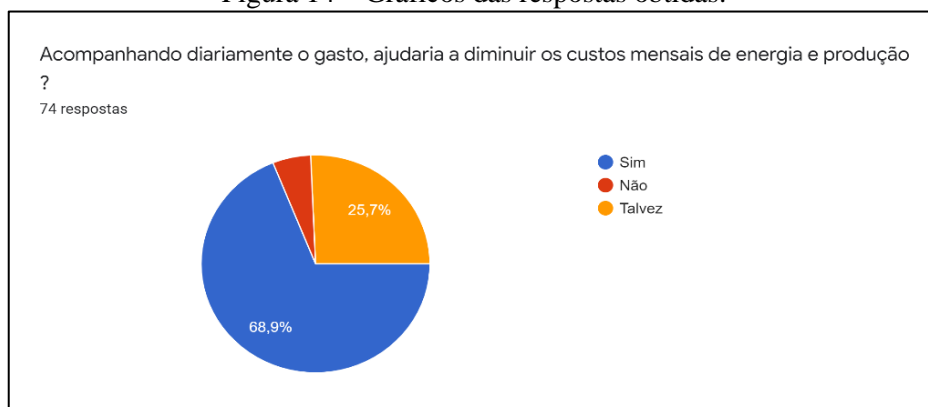
Após a finalização da pesquisa, 77% dos entrevistados gostariam de acompanhar o custo de energia elétrica que cada máquina consome dentro de um processo de produção, e 68,9% dos entrevistados acham que acompanhando diariamente o gasto ajudaria a diminuir os custos mensais de energia e produção dentro de uma indústria. As figuras 13 e 14 ilustram os gráficos e as porcentagens obtidas para cada resposta, respectivamente.

Figura 13 – Gráficos das respostas obtidas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 14 – Gráficos das respostas obtidas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Com o resultado da pesquisa, conclui-se que, a maioria dos entrevistados gostariam de obter o sistema de monitoramento em seu processo de produção para acompanhar o consumo de energia elétrica, de acordo com a necessidade de cada processo. A pesquisa indica que, no ramo industrial, o projeto desenvolvido é de grande utilidade e foi validado pelos entrevistados para seu uso como forma de redução de custos.

## 5. Considerações Finais

O projeto proposto proporciona o acompanhamento do consumo de energia elétrica industrial e informa o custo de energia em kWh e o custo monetário de cada equipamento e/ou máquinas. Tendo como base a integração entre computadores, *softwares* de supervisão e componentes eletrônicos, tem-se como objetivo reduzir os custos de energia elétrica, bem como os custos de produção em processos industriais. Com o acompanhamento de quanto o usuário final está consumindo de energia elétrica, através do monitoramento o usuário consegue verificar qual o valor de kWh está sendo consumido por cada equipamento do seu processo e não apenas o valor total, como é verificado na conta de energia elétrica.

Para o desenvolvimento e construção do projeto, usa-se um microcontrolador ESP32, que funciona com cérebro do sistema, o qual todas as ações exercidas pelos componentes passam pelo microcontrolador antes de serem executadas. Através da programação realizada, estipula-se qual ação será executada pelo sistema. O *software* de supervisão *elipse* SCADA é utilizado para a visualização e acompanhamento das variáveis principais de energia que são tensão, corrente, potência consumida, quilowatt-hora e valor monetário a ser pago no determinado instante de tempo. Através da tela de supervisão, o usuário pode navegar entre todos os equipamentos que estão conectados ao sistema e verificar também outras variáveis secundárias e gráficos.

O sistema de monitoramento proposto tem a vantagem de ser um projeto novo no mercado, no qual são poucos os projetos criados em relação ao tema estipulado, tem-se também como ponto forte do sistema, o monitoramento de energia e a eficiência energética que através do acompanhamento do custo de energia proporciona conscientização do usuário final a reduzir o seu consumo. Como projeto inicial é montado para a simulação a medição de energia de duas lâmpadas, entretanto o sistema pode ser usado em máquinas reais em uma indústria.

As conquistas alcançadas com o tema-problema desenvolvido é que, para transformar a ideia principal em uma simulação real foram realizadas diversas pesquisas e testes. Todas as teorias pesquisadas são de suma importância para dar sustentação e concretização no desenvolvimento do projeto, principalmente as que trouxeram conhecimentos sobre monitoramento de energia, sistemas supervisórios, programação do ESP32 e o estudo sobre a



melhor maneira de acompanhar o consumo de energia de uma indústria e reduzir gastos com relação a energia elétrica.

Na construção do projeto, realizaram-se testes em relação à parte elétrica e programação. Houve presença de algumas falhas que, no decorrer do tempo, foram facilmente resolvidas, outras, porém, foram solucionadas com um pouco mais de dificuldade, mas todas as dificuldades sofridas contribuem para o aumento intelectual de todos. Ao realizar o ensaio da programação com o módulo de monitoramento PZEM, um problema surgiu em relação à comunicação de diversos módulos com o microcontrolador e *software elipse* SCADA, que foi solucionado com base nas teorias explicitadas na metodologia e análise de resultados. Por fim, o projeto atendeu às expectativas, como planejado.

Ao final do projeto, é realizada uma pesquisa no qual o público-alvo principal são alunos de engenharia juntamente com pessoas que são funcionários de indústrias, no qual responderam questões relacionadas com a aplicação do projeto em uma situação no dia a dia industrial. A pesquisa foi satisfatória, pois 77% dos entrevistados concordam que gostariam de acompanhar o quanto cada equipamento/máquina está consumindo de energia com objetivo de alocar melhor o processo de produção, e, 68,9% dos entrevistados concordam que, com o monitoramento desenvolvido é possível reduzir os gastos referentes ao custo de energia elétrica e produção.

Como melhorias futuras é sugerido que o sistema de monitoramento de energia informe o consumo e, juntamente com isto, seja implementado um sistema de alarmes de forma a obter um *trigger* de acordo com o consumo de energia para manutenção das máquinas e equipamentos de forma a alcançar um maior acompanhamento de energia elétrica.



## Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil: Energia Hidráulica**. 3 ed. Brasília: 2008. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap3.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf). Acesso em 01. abr. 2020.

ANGELONI, G.C. **Automação Residencial**. 2013. 1-20 p. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/167410/PFC-20122-GuilhermeCamposAngeloni.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01. abr. 2020.

BRITO J, L.G. **Sistema para Monitoramento de Consumo de Energia Elétrica Particular em Tempo Real e não Invasivo Utilizando a Tecnologia Arduino**. 2016. Monografia (Graduação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016. Disponível em: [http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2016\\_JoaoLuisGrizinskyBrito.pdf](http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2016_JoaoLuisGrizinskyBrito.pdf). Acesso em: 01. abr. 2020.

CAMPOS, A. L.A.D. **Sistema de Controle de Energia Elétrica Alternativa com Interligação a Rede**. 2016. 12-15 p. Monografia (Graduação) – Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo, São Bernardo do Campo, 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. **Manual de Eficiência Energética na Indústria**. 1 ed. Curitiba: 2005. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual/\\$FILE/manual\\_eficiencia\\_energ.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual/$FILE/manual_eficiencia_energ.pdf). Acesso em 11. mar. 2021.

FIRJAN. Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisas e Estudos Socioeconômicos**. 1 ed. Rio de Janeiro: 2016. Disponível em: [https://www.solrico.com/fileadmin/solrico/media/doc/pdf\\_presentations/sistema-firjan-2016.pdf](https://www.solrico.com/fileadmin/solrico/media/doc/pdf_presentations/sistema-firjan-2016.pdf). Acesso em 11. mar. 2021.

FORNAZARI, E. **Automação e Controle do Consumo de Energia Elétrica em Blocos de Salas de Aulas e Universidades Públicas, Buscando Eficiência Energética**. 2016. 02-32 p. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa 2016. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7622/1/PG\\_COELE\\_2016\\_1\\_02.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7622/1/PG_COELE_2016_1_02.pdf). Acesso em: 10. ago. 2020.

FUGITA, S.D. **Smart Meter Integrado a Analisador de Qualidade de Energia para Propósitos de Identificação de Cargas Residenciais**. 2014. 1-30 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GOMES, J. P.; VIEIRA, M.F. **O Campo da Energia Elétrica no Brasil de 1880 a 2002**. Revista de Administração Pública. Lages, v.13, n.2, p. 63-64, mar, 2009. Disponível em: <http://app.ebape.fgv.br/comum/arq/295-321.pdf>. Acesso em: 31. mar. 2020.



INSTITUTO FEDERAL DE CIENCIA E TECNOLOGIA – IFRS. **Apostila de Física Experimental**. 2013. Disponível em:

<https://nelsonreyes.com.br/APOSTILA%20F%20EXP%20I.pdf>. Acesso em 23.mai.2021.

JANUZZI, A.C. **Regulação da Qualidade de Energia Elétrica sob o Foco do Consumidor**. 2007. 4-11 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

LIMA, E.M.S. **Automação Residencial de Baixo Custo com Arduíno Mega e Ethernet Shield**. 2015. 1-20 p. Monografia (Graduação) – Centro Universitário Estácio do Ceará, Ceará, 2015. Disponível em: [http://www.aureside.org.br/\\_pdf/TCC\\_615.pdf](http://www.aureside.org.br/_pdf/TCC_615.pdf). Acesso em: 01. abr. 2020.

MACHADO, G. A. **Sistema Inteligente de Medição de Energia Elétrica**. 2019. 28-40 p. Monografia (Graduação) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2019.

MAESTRELLI, G. A. **Sistema Supervisório para Monitoramento de Energia Elétrica Residencial**. 2018 20-40 p. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

MORAES, P. S. **Curso básico de lógica de programação**. Manual técnico. São Paulo, 2000.

NASCIMENTO, B. **Medidor de Grandezas Elétricas com Acesso Remoto**. 2020. Artigo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020. Disponível em <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/r4em/article/view/9600>. Acesso em 28. Mar. 2021.

NATIONAL INSTRUMENTS– NI. **O Protocolo Modbus em Detalhes**. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html>. Acesso em 23. mai.2021.

OLIVEIRA, A. L. L. **Fundamentos de Controle de Processos**. Apostila de Aula. Vitória - ES, 1999.

ROVERI, G.B. **Automação Residencial**. 2012. 10-32 p. Monografia (Graduação) – Faculdade POLITEC, Santa Barbara d'Oeste, 2012.

SILVA, J.C.J. **Química Analítica V – Análise instrumental**. Apostila de Aula. Juiz de Fora – MG, 2013. Disponível em: [https://www.ufjf.br/baccan/files/2010/10/Aula-2-2Sem\\_Estatistica\\_julio.pdf](https://www.ufjf.br/baccan/files/2010/10/Aula-2-2Sem_Estatistica_julio.pdf). Acesso em 22. mai. 2021.

SILVA, R.N. A. **Sistema de Monitoramento de Fornecimento de Energia Elétrica para uma Residência**. 2018. 71-84 p. Monografia (Graduação) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS, Brasília, 2018. Disponível em <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/prefix/12753/1/21214993.pdf>. Acesso em 28. Mar. 2021.

SOARES, T. **Melhor Aproveitamento da Energia Elétrica na Indústria**. O Setor Elétrico. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/melhor-aproveitamento-da-energia-eletrica-na-industria/>. Acesso em 11. mar. 2021.