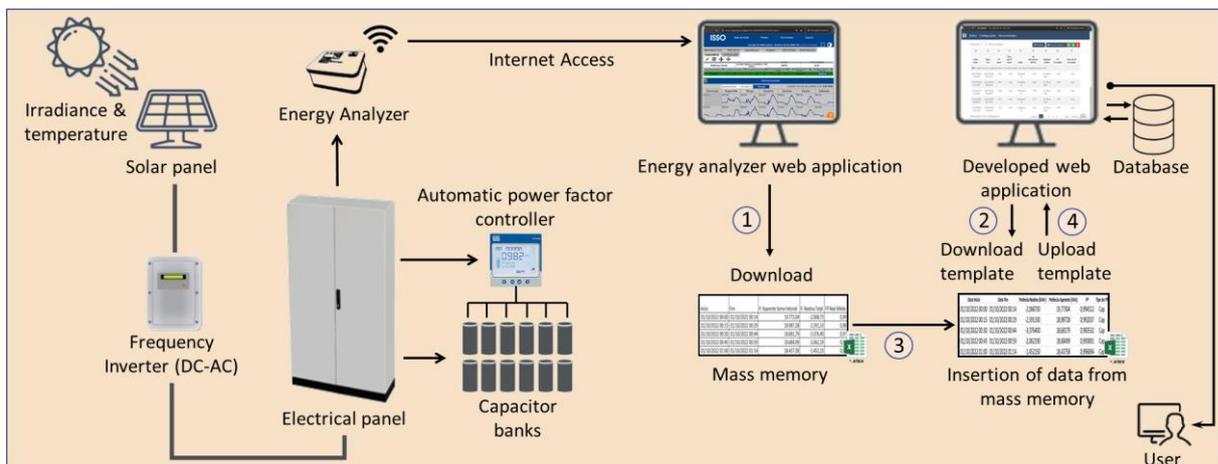


GRAPHICAL ABSTRACT



The web application proposed based on receiving consumer data with photovoltaic generation and capacitor bank.

APLICAÇÃO WEB PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM CONSUMIDOR COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E BANCO DE CAPACITORES

WEB APPLICATION FOR CORRECTING THE POWER FACTOR OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH CAPACITOR BANK

Renan Elias Gobbi ¹, Marcos Ribeiro de Souza, ² e Danilo de Paula e Silva ³ *

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus Vitória, Brazil

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus São Mateus, Brazil

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus Serra, Brazil

*danilo.silva@ifes.edu.br

Artigo submetido em 23/05/2024, aceito em 29/07/2024 e publicado em 07/10/2024.

Resumo: A legislação brasileira estabelece o limite mínimo de fator de potência para períodos determinados da semana, sob pena de cobrança de faturamento de energia reativa excedente. Entretanto, para tais consumidores, são frequentes as variações que desequilibram o fator de potência. Isso ocorre com a instituição de ensino Ifes - Campus Serra, que, mesmo se valendo de equipamentos auxiliares, é assim penalizada mensalmente. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi criar uma aplicação web, utilizável por diferentes usuários, que lhes permita simular diferentes cenários de combinações de entradas (tensão de linha, transformador de corrente, estratégia de compensação e capacitores), para visualizar a melhor solução, a fim de adequar o fator de potência da unidade consumidora, a partir dos dados que eles forneçam à aplicação. Como resultados, a aplicação identificou a menor e maior potência de reativo capacitivo necessária para correção do fator de potência desejável (0,92), com valores entre 0,46 kVAr e 16,38 kVAr; e, dentre os 34.013 registros analisados em um ano, identificou 7.453 deles como fontes de energia reativa excedente, apontou os valores mais demandados para correção do fator de potência (entre 4,46 kVAr e 13,66 kVAr), e propôs substituição de 2 capacitores de 30 kVAr lá instalados por um de 5 e um de 7,5 kVAr. O indicador VPL de R\$ 6.595,10 mostrou-se viável, com retorno financeiro superior à taxa mínima de atratividade.

Palavras-chave: energia ativa; energia reativa; geração distribuída; fator de potência; banco de capacitores; aplicação *web*.

Abstract: Brazilian legislation establishes the minimum power factor limit for certain periods of the week, under the penalty of charging for excess reactive power. However, for such consumers, variations that unbalance the power factor are frequent. This is the case with the educational institution Ifes - Campus Serra, which, despite using auxiliary equipment, is penalized monthly. Therefore, the objective of this work was to create a web application, usable by different users, that allows them to simulate different scenarios of input combinations (line voltage, current transformer, compensation strategy, and capacitors) to visualize the best solution to adjust the power factor of the consumer unit, based on the data they provide to the application. As results, the application identified the minimum and maximum capacitive reactive power needed to correct the desired power factor (0.92), with values ranging from 0.46 kVAr to 16.38 kVAr; and, among the 34,013 records analyzed over a year, identified 7,453 of them as sources of excess reactive power, pointed out the most demanded values for power factor correction (between 4.46 kVAr and 13.66 kVAr), and proposed replacing the two 30 kVAr capacitors installed there with one 5 kVAr and one 7.5 kVAr. The NPV indicator of R\$ 6,595.10 proved to be viable, with a financial return above the minimum attractiveness rate.

Keywords: active energy; reactive energy; distributed generation; power factor; capacitor banks; web application.

1 INTRODUÇÃO

A Resolução Normativa nº 1.000/2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (ANEEL, 2021), ao estabelecer regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, dispõe sobre o controle e o faturamento da energia reativa excedente produzida por unidades consumidoras do grupo A (unidades consumidoras com conexão em tensão maior ou igual a 2,3 kV).

Para parametrização desse controle, o referido normativo determina o fator de potência mínimo, que é um valor de referência calculado com base na relação entre energia ativa (potência ativa) e energia

reativa (potência reativa) em uma unidade consumidora do grupo A (ANEEL, 2021); e estabelece a aplicação de encargos financeiros, caso esse valor mínimo seja infringido pelo usuário, em determinados períodos do dia.

O dito faturamento de energia reativa excedente é recorrente entre consumidores com geração distribuída (SILVA *et al.*, 2020; PIGNATON *et al.*, 2023) que se valem dessa geração para consumo próprio – ou seja, entre os consumidores que, para reduzir seus custos com as faturas pagas, optam por produzir parte da energia elétrica que consomem.

Pois um dos impactos trazidos pela inserção de geração distribuída na rede elétrica é, justamente, a redução notável no fator de potência durante períodos de alta geração de energia (POMPERMAYER e FARDIN, 2023). Este problema (de redução no fator de potência por excesso de energia reativa) é tão corriqueiro, que também foi constatado na Índia, por exemplo, com a instalação de um sistema fotovoltaico na rede elétrica em consumidor de média tensão em uma instituição de ensino técnico (AFSHER e KUMAR, 2023).

Para análise desse fenômeno, a literatura é farta no que concerne à compreensão dos impactos da inserção de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos na rede elétrica, tanto em relação à excedente de reativos (PINTO *et al.*, 2012; TÉLLEZ, 2018; TAVEIRA, 2019; POMPERMAYER *et al.*, 2019; MFENGUZA, 2022; MAGHAMI, *et al.*, 2023; POMPERMAYER e FARDIN, 2023), quanto no que tange à utilização de redes inteligentes variadas para análise ou monitoramento da qualidade da energia em sistemas fotovoltaicos (JEGEN e PHILION, 2018; KAKRAN e CHANANA, 2018; RAHMAN *et al.*, 2018; DI SANTO *et al.*, 2018; BORNIAATTI *et al.*, 2020; BARRADAS, 2023; SELVARAJ *et al.*, 2023). Destaca-se, também, o trabalho de Silva *et al.* (2021), que disponibiliza dados meteorológicos e de geração de fontes renováveis para diversos estudos de gerenciamento de energia.

Benedito e Zilles (2021), por sua vez, sugerem três possíveis soluções para a questão do faturamento de energia reativa excedente: (1^a) uma mudança regulatória no que diz respeito ao procedimento de medição; (2^a) compensação de potência reativa utilizando inversores fotovoltaicos; e (3^a) compensação de potência reativa utilizando bancos de capacitores.

E, nessa perspectiva de se evitar encargos financeiros, há entendimento de que é necessário apoio à potência reativa para tornar atrativo o investimento no

sistema distribuído (GUSMAN *et al.*, 2020).

Alguns autores, tais como Taveira (2019), Callegari *et al.* (2019), e Aboshady *et al.* (2023), utilizaram em seus estudos a segunda sugestão proposta por Benedito e Zilles (2021), ou seja, eles corroboram com a solução da utilização da compensação de potência reativa utilizando inversores fotovoltaicos. Já outros estudos, tais como, os de Benedito *et al.* (2021), Afsher e Kumar (2023), utilizam da terceira solução proposta por Benedito e Zilles (2021), na qual se descreve a compensação de potência reativa utilizando bancos de capacitores.

Observa-se, no entanto, que há poucos artigos que analisam a utilização de softwares ou aplicações *web* para aferir o melhor cenário de combinações de entradas, ante o fornecimento dos dados de energia elétrica do usuário. É o que fizeram, por exemplo: (1) MELIONES *et al.*, em 2014, que construíram um aplicativo *web*, com foco no gerenciamento integrado de instalações fotovoltaicas, incluindo controle e monitoramento de dados de entrada e saída de equipamentos remotos; (2) SILVA *et al.*, 2016, ao desenvolverem uma plataforma de gestão de energia elétrica aplicada a um sistema de geração fotovoltaica para consumidores residenciais, com uma interface *web* para acompanhar e controlar de forma remota os seus custos; (3) LIMA *et al.*, 2020, que desenvolveram um *software* de gerenciamento energético aplicado a análises tarifárias com estudo de caso na Universidade Federal do Pará (UFPA), com a visualização e análise gráfica dos dados de consumo para adequar o modelo tarifário; (4) ADESINA *et al.*, 2021, ao desenvolverem uma aplicação *web* para dimensionar a capacidade dos componentes da fonte solar fotovoltaica que atendam aos requisitos de demanda energética; e (5) LEE *et al.*, 2023, que projetaram e implantaram um sistema de gestão de energia para diversos locais com geração fotovoltaica na ilha Kinmen, de Taiwan. Esse sistema possibilita a aquisição em tempo real de

dados para geração de energia e utilização dos mesmos para previsão de energia renovável gerada pelos sistemas fotovoltaicos.

É importante que nenhum dos trabalhos mencionados utilizam simulações de cenários para otimizar a correção do fator de potência em consumidores com geração distribuída.

O objetivo do presente trabalho é, por meio do estudo de caso de uma escola de cursos profissionalizantes (unidade consumidora) ligada em média tensão e com geração distribuída, analisar seu consumo de energia e desenvolver uma aplicação *web*, utilizável por diferentes usuários (de diferentes unidades consumidoras nas quais a energia reativa excedente ocorra), e que faça simulações para a visualização do melhor cenário de combinações de entradas (estratégia de compensação, tensão de linha, transformador de corrente e capacitores), a fim de adequar a relação entre energias ativa e reativa da unidade consumidora, evitando o faturamento por excessos de reativos.

O presente trabalho se divide da seguinte forma: no primeiro capítulo, é feita esta introdução; na segunda seção é apresentado o referencial teórico, com os conceitos e premissas aplicados; na seção 3 são descritos os métodos e materiais utilizados; na quarta seção há o estudo de caso; os resultados obtidos são revelados e discutidos na seção 5; na seção 6 é feita a conclusão do estudo; e, por fim, são feitos, nessa ordem, os agradecimentos e as referências às obras que serviram de base a este trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FATOR DE POTÊNCIA

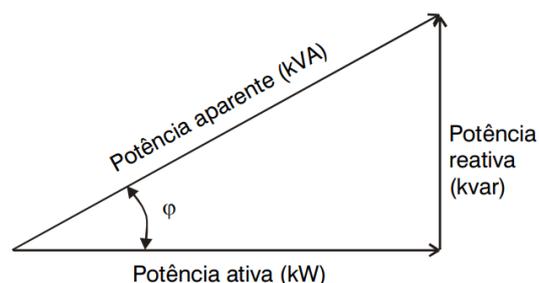
Equipamentos em unidades consumidoras de energia elétrica, em sua maioria, demandam de energia reativa indutiva, tais como: motores, transformadores, reatores para lâmpadas de descarga, fornos de indução, entre outros. Estas cargas indutivas necessitam de dois

tipos de potências para sua operação, a saber: a potência ativa, que efetivamente realiza trabalho, medida em kW; e a potência reativa, responsável por criar os campos eletromagnéticos, fundamental para o funcionamento de cargas indutivas, medida em kVAr (WEG, 2023a).

Por definição, o fator de potência pode ser representado matematicamente como a relação entre a potência ativa (kW) e a potência aparente (kVA). Por ser uma relação entre duas quantidades representadas pela mesma unidade de potência, trata-se de um número adimensional (CREDER, 2012).

Um triângulo retângulo é frequentemente utilizado para representar as relações entre kW, kVAr e kVA, conforme a Figura 1:

Figura 1: Triângulo retângulo de potência



Fonte: WEG (2023a).

Então, o fator de potência (FP) pode ser definido pela Eq. 1:

$$FP = \frac{kW}{kVA} = \cos \varphi = \cos \left(\text{arc tg} \frac{kVAr}{kW} \right) \quad (1)$$

O fator de potência, portanto, indica a eficiência do uso de energia. Um alto fator de potência, assim, indica quase toda a potência aparente é formada por potência ativa para conversão de energia elétrica em outras formas de energia; e um baixo fator de potência, por sua vez, indica que somente uma parcela da potência aparente é potência ativa e que há excesso de energia reativa que não é convertida em outras formas de energia para gerar trabalho.

2.2 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS SOBRE A LEGISLAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Embora essencial para o funcionamento de alguns equipamentos elétricos, a energia reativa deve ser limitada ao mínimo possível, pois, quando em excesso, causa consequências indesejadas, como perdas expressivas na rede elétrica em forma de calor, causando aumento do aquecimento de condutores e equipamentos, além de mais quedas e flutuações das redes de distribuição de energia (SEBRAE, 2023).

Para evitar o uso ineficiente do sistema elétrico pelas unidades consumidoras e, por consequência, investimentos adicionais pelo sistema de distribuição, as concessionárias aplicam como um faturamento intitulado de “energia reativa excedente”.

De acordo com a ANEEL (2021), unidades consumidoras do grupo A serão cobradas pela distribuidora, além do montante de energia elétrica, pela demanda de potências reativas excedentes, com um limite mínimo do fator de potência igual a 0,92 indutivo ou capacitivo.

Sua avaliação é horária durante 24 horas, e é realizada em dois períodos distintos do dia: o primeiro, num intervalo de 6 horas entre 23h30 e 6h30, a ser definido pela distribuidora – no Espírito Santo, isso se dá entre 0h00 e 6h00, por exemplo (ANEEL, 2021) –, período no qual ensejam faturamento de energia reativa excedente para fator de potência menor que 0,92 capacitivo; e, no período diário complementar, geram o faturamento de energia reativa excedente somente o fator de potência menor que 0,92 indutivo.

Na avaliação do fator de potência, não são considerados os dias de sábado, domingo e feriados.

2.3 FATURAMENTO DE ENERGIA REATIVA EXCEDENTE

O faturamento cobrado pela distribuidora se aplica conforme as equações abaixo (ANEEL, 2021):

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^n \left[EEAM_T \times \left(\frac{f_R}{f_T} - 1 \right) \right] \times VR_{ERE} \quad (2)$$

Onde:

$EEAM_T$: Montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo “T” de uma hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh);

f_R : Fator de potência de referência igual a 0,92;

f_T : Fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo “T” de uma hora, durante o período de faturamento;

VR_{ERE} : Valor de referência equivalente à tarifa de energia “TE” da bandeira verde aplicável ao subgrupo B1, em Reais por mega watt-hora (R\$/MWh).

Já o valor por posto tarifário “p”, que correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “ f_R ” no período de faturamento, em Reais (R\$), é dado pela Eq. 3.

$$D_{RE(P)} = \left[T = 1nMAX \left(DAM_T \times \frac{f_R}{f_T} \right) - DAF(p) \right] \times VR_{DRE} \quad (3)$$

Onde:

DAM_T : Demanda de potência ativa medida no intervalo de integralização de uma hora “T”, durante o período de faturamento, em quilowatt (kW);

$DAF(p)$: Demanda de potência ativa faturável, em cada posto tarifário “p” no período de faturamento, em quilowatt (kW);

VR_{DRE} : Valor de referência, em Reais por quilowatt (R\$/kW), equivalente às tarifas de demanda de potência – para o posto tarifário fora de ponta – das tarifas aplicáveis aos subgrupos do grupo A para a modalidade tarifária horária azul;

MAX : Função que identifica o valor máximo da equação, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto tarifário “p”.

2.4 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A melhora da correção do fator de potência pela unidade consumidora é importante, tanto para se enquadrar dentro dos limites estabelecidos pela legislação, quanto aos aspectos operacionais internos à instalação, tais como liberação da capacidade de transformadores e dos cabos, redução das perdas *etc.* (COTRIM, 2009).

A correção deve ser realizada considerando-se as características da carga instalada da unidade consumidora. Algumas alternativas podem ser adotadas para a correção do fator de potência, como: modificar ações da rotina operacional, mantendo os motores em operação a plena carga, de maneira a se evitar o funcionamento a vazio, otimizando o uso racional da energia e atuando sobre o uso da iluminação; instalação de motores síncronos superexcitados de forma a injetar potência reativa capacitiva no sistema; e a instalação de banco de capacitores, como solução mais empregada nos sistemas industriais, devido ao custo reduzido.

2.4.1 Instalação de capacitores

A instalação de banco de capacitores é a solução mais empregada na correção do fator de potência de instalações industriais, comerciais e dos sistemas de distribuição e de potência (FILHO, 2017).

Para a correção do fator de potência, podem ser utilizados bancos de capacitores fixos ou automáticos.

2.4.1.1 Banco de capacitores fixos

Os capacitores fixos são utilizados quando a carga da indústria praticamente não varia ao longo da curva de carga diária. Também são empregados como uma potência capacitiva de base correspondente à demanda mínima da instalação.

2.4.1.2 Banco de capacitores automáticos

O método de cálculo utilizado para a correção do fator de potência empregando banco de capacitores automáticos, ou chaveados, é o mesmo utilizado para banco de capacitores fixos.

Os bancos automáticos são utilizados em instalações onde exista uma variação razoável da curva de carga reativa diária ou haja necessidade de manutenção do fator de potência em uma faixa muito estreita de variação.

Os bancos chaveados são controlados por um equipamento conhecido como controlador automático de fator de potência.

Alguns fabricantes adotam em seus controladores uma sistemática similar para o ajuste de sensibilidade do processo de correção de fator de potência, disponibilizando o índice parametrizável denominado C/k . Este valor representa o limite de corrente para que o controlador de fator de potência ative ou desative um estágio de capacitor, e pode ser representado pela Eq. 4:

$$\frac{C}{K} = \frac{I_c}{K} = \frac{Q}{K \cdot \sqrt{3} \cdot V} \quad (4)$$

Onde:

C: Menor corrente entre os estágios;

I_c: Corrente do reativo;

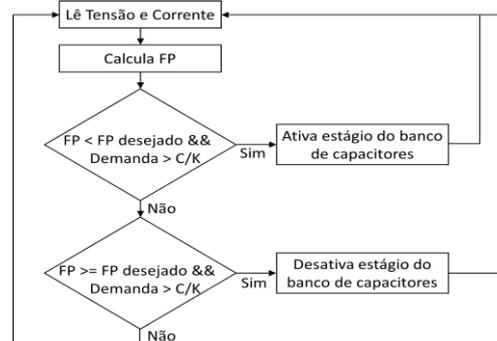
K: Relação de TC (transformador de corrente);

Q: Menor potência entre os estágios;

V: Tensão de linha (V).

A Figura 2 representa um fluxograma mostrando os principais processos de funcionamento de um banco de capacitor automático.

Figura 2: Fluxograma de funcionamento de um banco de capacitor automático



Fonte: próprio autor (2023).

2.4.1.3 Banco de capacitores semiautomáticos

Consiste em um banco onde se faz o chaveamento dos estágios manualmente, ou um relógio de programação horária em que é possível programar o horário para o banco ligar e desligar. Proporciona um controle menos preciso que o banco automático.

2.5 COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM SISTEMAS DISTRIBUÍDOS

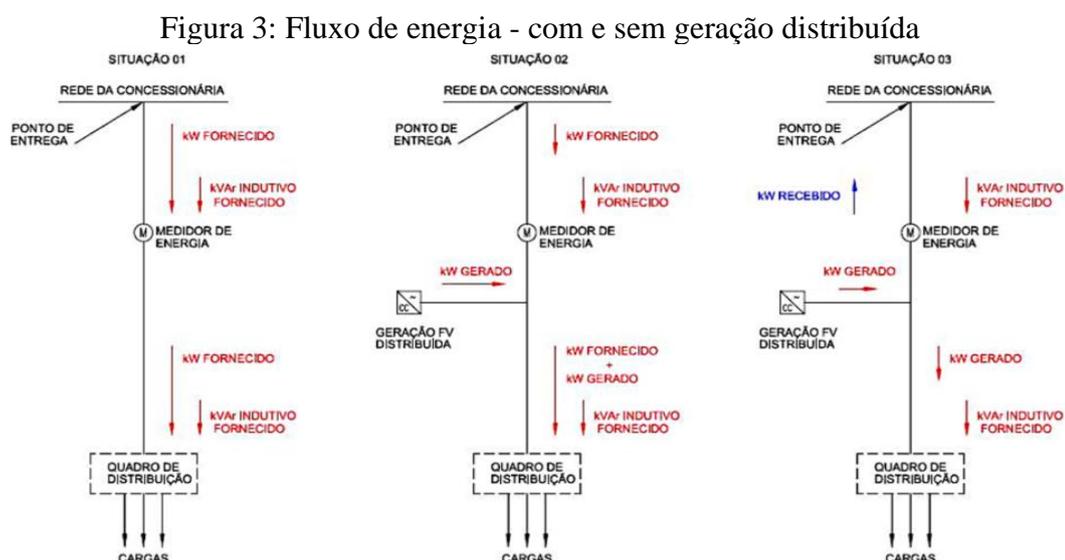
Desde o advento da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, os consumidores do país podem gerar sua própria energia elétrica, por meio de fontes renováveis ou cogeração qualificada, como forma de se reduzir os custos com a fatura paga à fornecedora, além de contribuir com o meio ambiente pelo uso mais sustentável desse bem (ANEEL, 2022).

O referido normativo estabelece, para isso, as condições gerais para o acesso de microgeração, minigeração e sistema de compensação de energia (PINTO *et al.*, 2012).

São exemplos de fontes renováveis de energia: hidráulica, solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada, dentre outras (PINTO *et al.*, 2012).

Entretanto, ao mesmo tempo em que o uso de mini e microgeradores de energia pelo usuário reduz o fornecimento de energia ativa para o mesmo e lhe proporciona economia na fatura, essa prática também acarreta diminuição do consumo ativo; o que, aliado à manutenção do consumo reativo durante os horários de geração, resulta na redução do fator de potência das unidades geradoras, e pode acarretar, assim, cobranças adicionais a seus faturamentos (TAVEIRA, 2019).

Conforme ilustra a Figura 3, em unidades consumidoras convencionais (situação 01) o fator de potência no ponto de entrega é o mesmo no quadro de distribuição. Contudo, em unidades com geração distribuída (situações 02 e 03), a unidade consumidora passa a ser alimentada por duas fontes: a rede da concessionária e a geração fotovoltaica, e, por isso, os fatores de potência medidos a montante e a jusante da geração fotovoltaica são diferentes. Com a adição da geração fotovoltaica na unidade consumidora, o medidor de faturamento enxergará uma mudança no fator de potência, visto que houve uma redução na demanda de potência ativa.



Fonte: Adaptado de Taveira (2019).

2.6 DESENVOLVIMENTO WEB E FRAMEWORKS

A aplicação *web* é um software que permite seu acesso por todos os navegadores *web* e dispositivos modernos, e não precisa ser baixada pelo usuário, o que facilita o acesso e elimina a necessidade de manutenção do usuário final (AWS, 2023). A grande maioria das aplicações *web* e seus dados são armazenados em servidores externos com auxílio da internet (nuvem). É possível criar aplicações *web* com praticamente qualquer linguagem de programação, como: C#, PHP, Python e

Java, com seus respectivos frameworks para desenvolvimento *web*, tais como ASP.NET, Laravel, Flask e Spring Boot.

2.6.1 A linguagem C#

A linguagem C# (pronuncia-se "*C Sharp*") é uma linguagem de programação desenvolvida pela Microsoft e está incluída no framework .NET da empresa. É a principal linguagem do .NET por ter sido especialmente desenvolvida para esta plataforma (TECHNET, 2010). A linguagem de programação é simples, moderna, orientada a objeto, suportando conceitos com o encapsulamento, herança e polimorfismo, e é fortemente tipada (ECMA:334, 2022). Tem suas raízes na família de linguagens C, de modo a ser familiar a programadores em C, C++, Java e *JavaScript* (MICROSOFT, 2023).

A linguagem C# suporta desenvolvimento para aplicações *web* e aplicações móveis (MICROSOFT, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A ideia de elaborar o presente trabalho surgiu do interesse em analisar a fatura de energia reativa excedente de um consumidor com geração distribuída, num primeiro momento; e posteriormente, elaborar uma solução que contribuísse para a economia de energia desse consumidor.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Com a finalidade de compor uma estrutura para armazenar os dados inseridos pelo usuário, foi utilizado o banco de dados SQLite, capaz de integrar uma coleção de tabelas com dados estruturados.

Primeiramente, para criação das tabelas do banco de dados, foi necessário realizar a modelagem de dados.

Para a elaboração do modelo em questão, considerou-se que o usuário pudesse inserir dados de qualquer unidade consumidora, o que levou às tabelas disponíveis no Apêndice A.

Optou-se, então, por se desenvolver a aplicação *web* com a linguagem de programação C# e com a tecnologia ASP.NET Core, que é uma estrutura de código aberto, multiplataforma (Windows, macOS e Linux) e de alto desempenho para a criação de aplicativos modernos conectados à Internet e habilitados para a nuvem.

3.2 MODELAGEM DO SISTEMA PROPOSTO

O intuito da modelagem proposta consiste na elaboração de uma aplicação *web* que receba dados de entrada e gere dados de saída, em resposta aos parâmetros definidos inicialmente pelo usuário.

A aplicação se baseia em uma interface, que é a parte visível do sistema para o usuário. Ela permite que o usuário, por meio de *upload*, insira os dados da memória de massa a serem analisados e defina os parâmetros desejados para a geração dos dados de saída (Apêndice B).

O banco de dados é o responsável por armazenar a memória de massa fornecida pelo usuário de forma permanente, e pode ser utilizado para recuperar posteriormente estas informações recebidas.

A lógica do algoritmo da aplicação é a parte central, pois ele transforma os dados de entrada nos dados de saída correspondentes e envia de volta ao usuário

por meio de interface, que pode ser baixada como um arquivo.

3.3 UTILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO

A utilização da aplicação se constitui em colocar em seu *template*, disponível para *download*, as informações de entrada do cenário local de medição, com os seguintes campos: data de início da medição, data final da medição, potência reativa, potência aparente, fator de potência e tipo de fator de potência. Mais detalhes sobre o fluxo de preparação dos dados se encontram disponíveis no Apêndice C.

Para o cálculo de sensibilidade do controlador do fator de potência C/k, o usuário pode optar por fornecer valores de entradas necessários para o seu cálculo, como tensão de linha e relação de TC (transformador de corrente).

A aplicação contém um campo para *upload* do *template* preenchido pelo usuário, e os dados nele constantes são armazenados no banco de dados. Após o armazenamento das informações inseridas no banco de dados, a aplicação fará a leitura desses registros e, dadas as configurações de parametrização, identificará em quais deles ocorrerá a fatura por energia reativa excedente, mostrando o resultado na página em forma de tabela.

Foram utilizados, neste estudo, apenas os modos sequenciais ascendentes e descendentes constantes no controlar automático de fator de potência – que são, juntamente com o modo inteligente, os algoritmos mais utilizados.

Entretanto, como o estudo toma por base apenas os dados fornecidos pelo usuário, sem possuir a informação de qual estágio do banco de capacitor está ativo, optou-se por não se fazer a análise pelo modo inteligente.

Os resultados foram obtidos por simulações de diferentes cenários de estratégias de compensação ascendente e descendente, que serão explicados no próximo capítulo “4 ESTUDO DE CASO”.

3.4 ANÁLISE DOS CUSTOS

Para análise e quantificação da viabilidade econômica da aplicação prática dos resultados do presente estudo – em outras palavras, para atestar que os resultados obtidos na simulação são, de fato, economicamente viáveis para a unidade consumidora analisada, e qual a economia real desse consumidor, com base no seu custo anual de energia –, fez-se pesquisa e cálculo dos seguintes valores: (1º) gastos com faturamento de energia reativa excedente nas faturas do consumidor, durante um ano; (2º) compra de novos capacitores, indicados na simulação, bem como de disjuntor em caixa moldada referente ao capacitor; (3º) custo do serviço para instalação desses materiais; e (4º) análise de viabilidade econômica.

As contas de energia foram fornecidas pelo consumidor; os valores de compra de capacitores, disjuntores e o serviço para instalação desses materiais foram orçados em estabelecimentos comerciais da região onde se encontra a referida unidade consumidora.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso visa ao enfrentamento do problema pelo qual passa o Ifes - Campus Serra, que instalou painéis de energia solar (painéis fotovoltaicos) para redução dos custos de energia, mas, por outro lado, percebeu uma diminuição no fator de potência, o que acabou por contribuir para que a instituição de ensino fosse penalizada pela desregulação desse fator nos horários não permitidos pela concessionária (GUAITOLINI *et al.*, 2023).

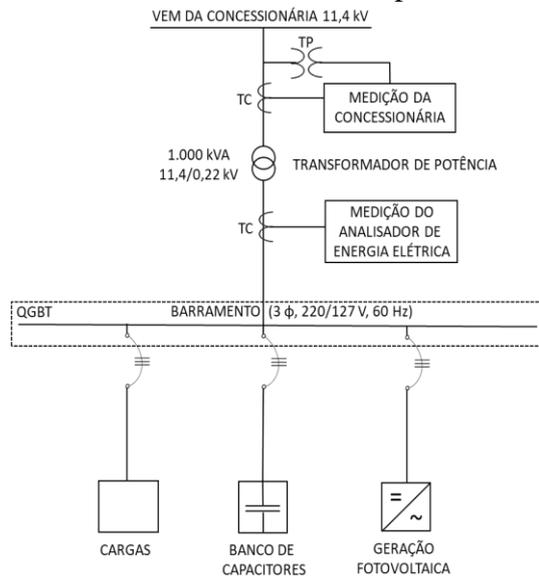
O *campus* é classificado como unidade consumidora do grupo A, pertencente ao subgrupo A4; sua modalidade tarifária é a verde; seu tipo de fornecimento é trifásico; sua tensão contratada é de 11,4 kV; e, a relação do Transformador de Corrente (TC), que é a razão entre a corrente de entrada (primária) e a corrente de saída (secundária) em carga máxima, instalada na rede elétrica, é igual a 800 (4.000/5A). O sistema fotovoltaico

presente nesse campus possui as seguintes propriedades: potência de pico igual a 119 kWp, e produção média de 214.200 kWh por ano. A energia elétrica produzida pelos módulos solares é convertida de corrente contínua para corrente alternada pelo inversor de frequência, e o medidor bidirecional da concessionária, ligado em média tensão, contabiliza a quantidade de energia injetada e permite o fluxo da energia elétrica nas duas direções.

Ligados à mesma rede elétrica do campus, há um controlador de fator de potência e um banco de capacitores trifásicos (300kVAr/220V), ambos instalados na subestação de energia.

A Figura 4 ilustra o diagrama unifilar simplificado com sistema fotovoltaico, o banco de capacitores existente e o analisador de energia instalado no barramento geral de baixa tensão para coleta de dados de consumo do Ifes - Campus Serra.

Figura 4 - Diagrama unifilar simplificado do Ifes - Campus Serra, com Geração Fotovoltaica e Banco de Capacitores



Fonte: próprio autor (2023).

4.1 EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS PARA ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA

O Ifes - Campus Serra, instituição objeto do estudo, dispõe de soluções e dispositivos eletrônicos inteligentes para monitorar e controlar o fator de potência, como analisador de energia elétrica, banco de capacitores fixos, banco de capacitores automáticos e controlador de fator de potência – que estão funcionando, permanentemente, junto à instalação elétrica, por opção da administração do campus.

O analisador de energia elétrica trifásico, modelo DMI F3000R V2 Lite, registra permanentemente, em tempo real, os parâmetros elétricos da instalação (GUAITOLINI *et al.*, 2023). Seu software permite, além de visualizar graficamente os dados monitorados, exportar a memória de massa referente ao período da data de interesse e ao intervalo de tempo entre cada dado coletado, como ilustra a Figura 5.

Figura 5: Dados exportados pelo software oriundos do analisador de energia DMI F3000R V2 Lite

Base de dados: EnergiaV2				
Período: 01/09/2023 a 30/09/2023				
Data: 03/10/2023 21:32				
Início	Fim	P. Aparente Soma Vetorial	P. Reativa Total	
01/09/2023 00:00	01/09/2023 00:14	23.811,89	-16.903,91	
01/09/2023 00:15	01/09/2023 00:29	23.678,26	-17.158,56	
01/09/2023 00:30	01/09/2023 00:44	24.278,75	-15.880,19	
01/09/2023 00:45	01/09/2023 00:59	24.091,87	-16.664,72	
01/09/2023 01:00	01/09/2023 01:14	24.276,72	-16.921,43	
01/09/2023 01:15	01/09/2023 01:29	24.217,74	-17.067,30	

Fonte: próprio autor (2023).

É dessa forma, pela exportação da massa de dados fornecida pelo analisador de energia elétrica, que foram extraídos os dados utilizados para o estudo do caso do consumidor em questão.

Na Tabela 1, observam-se os valores das células capacitivas que compõem o banco fixo e o banco automático, com seus respectivos valores de potência. Esses bancos estão localizados na estrutura mostrada na Figura 6.

Tabela 1: Valores do banco de capacitores existentes no Ifes - Campus Serra

#	Tipo de banco	Tipo de estágio	Potência (kVAR)
1	Fixo	Capacitivo	5
2	Fixo	Capacitivo	5
3	Automático	Capacitivo	5
4	Automático	Capacitivo	15
5	Automático	Capacitivo	20
6	Automático	Capacitivo	20
7	Automático	Capacitivo	20
8	Automático	Capacitivo	20
9	Automático	Capacitivo	20
10	Automático	Capacitivo	30
11	Automático	Capacitivo	30
12	Automático	Capacitivo	30
13	Automático	Capacitivo	30
14	Automático	Capacitivo	30

Fonte: próprio autor (2023).

Figura 6: Disposição dos equipamentos de medição e banco de capacitores



Legenda

- Analisador de energia elétrica;
- Disjuntores do banco fixo de capacitores;
- Disjuntores do banco automático de capacitores;
- Controlador automático de fator de potência.

Fonte: próprio autor (2023).

O controlador automático de fator de potência utilizado é o modelo PFW03-M12 da WEG, com disponibilidade de até 12 estágios – representado na Figura 7

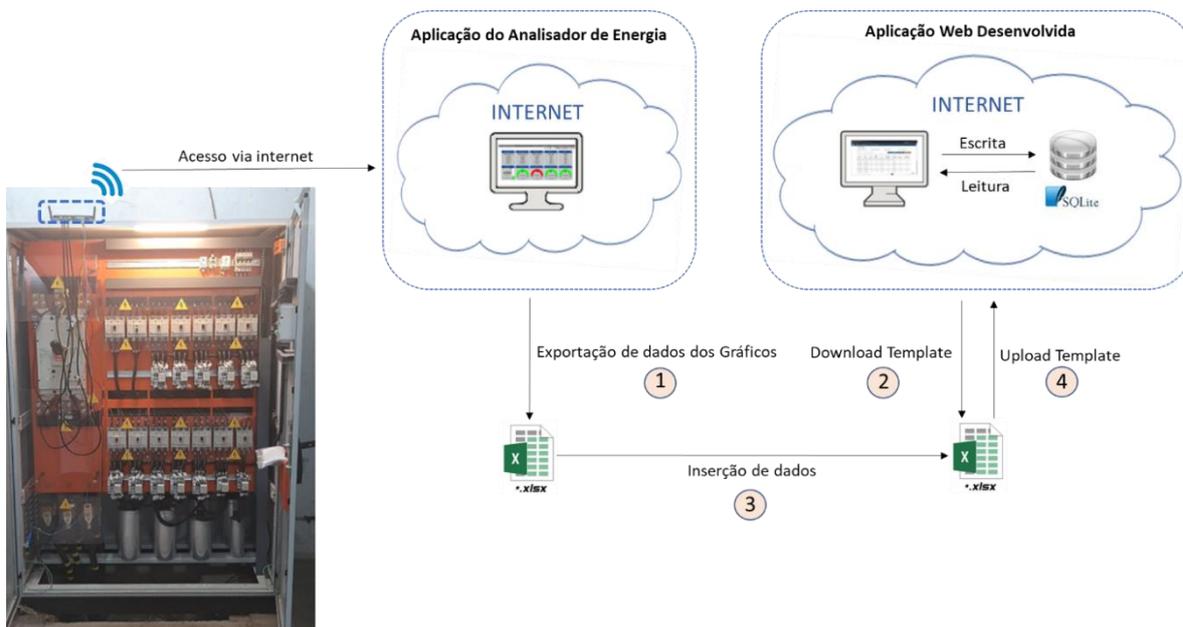
Figura 7: Controlador para correção do fator de potência



Fonte: WEG (2023b).

Este modelo de controlador possui seis módulos de compensação, quais sejam: (1) o PFW03-M, ou modo inteligente, em que sua compensação ativa a combinação de estágios mais próxima da demanda medida – modo utilizado atualmente pela instituição analisada; (2) o modo sequencial ascendente, que ativa ou desativa apenas um estágio por vez, começando pelo estágio com menor potência; (3) o modo sequencial descendente, que ativa ou desativa apenas um estágio por vez, começando pelo com maior potência; (4) o modo linear, em que o primeiro estágio ativado é o último desativado; (5) o modo circular, em que o primeiro estágio ativado é o primeiro desativado; e (6) o modo manual que necessita configurar manualmente o estágio que deve ser ativado ou desativado. O controlador mede as potências ativa, reativa e total do sistema a que está conectado. Como resultado dessas medições, ele ativa o capacitor e reatores de derivação no painel de compensação. O sistema proposto, aplicado ao caso do Ifes – Campus Serra, está ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Sistema proposto, aplicado ao caso do Ifes – Campus Serra



Fonte: próprio autor (2023).

4.2 COLETA DE FATURAS DE ENERGIA DA INSTITUIÇÃO DE ENSINO

Inicialmente, o estudo se direcionou a compreender dados reais do consumidor. Para isso, foi analisada a demanda contratada, sua modalidade tarifária e a qual grupo e subgrupo tarifários pertence. Foram considerados, neste estudo, dados coletados do consumidor por meio das contas de energia. Com essas informações, podem-se observar o faturamento do reativo excedente, em todos os meses analisados, e seu impacto na conta de energia da instituição.

4.3 CENÁRIOS DE ANÁLISE DESENVOLVIDOS E APLICADOS

Os testes para o presente estudo foram realizados a partir da massa de dados fornecida pelo analisador de energia elétrica instalado pelo Ifes – campus Serra, coletados durante 1 ano (outubro/2022 a setembro/2023).

Com base nessas informações, foram adotados 23 cenários, de modo a analisar a melhor combinação entre as estratégias de compensação sequencial ascendente e sequencial descendente. Em nenhum desses cenários foi adotado banco

de capacitores fixos. No primeiro cenário, foi utilizado o banco já em uso atualmente (ver Figura 9).

Figura 9: Cenário 1 – Banco de capacitores existentes com alteração de energia para o modo ascendente e descendente

Bancos Automáticos			
Quantidade 12 estágios			
Estágio 1 5	Estágio 2 15	Estágio 3 20	Estágio 4 20
Estágio 5 20	Estágio 6 20	Estágio 7 20	Estágio 8 30
Estágio 9 30	Estágio 10 30	Estágio 11 30	Estágio 12 30

Fonte: próprio autor (2023).

Enquanto, nos cenários seguintes, foram realizadas substituições de células capacitivas desse banco por outras de diferentes valores, para corrigir o reativo excedente (como, por exemplo, no cenário descrito na Figura 10).

Figura 10: Cenário 2 – Substituição de um capacitor de 30 kVAr por um de 2 kVAr

Bancos Automáticos			
Quantidade 12 estágios			
Estágio 1 5	Estágio 2 15	Estágio 3 20	Estágio 4 20
Estágio 5 20	Estágio 6 20	Estágio 7 20	Estágio 8 2
Estágio 9 30	Estágio 10 30	Estágio 11 30	Estágio 12 30

Fonte: próprio autor (2023).

Esses novos valores de células capacitivas utilizados e os novos cenários de teste foram escolhidos com base nos resultados com o primeiro cenário analisado.

Os resultados do primeiro cenário apontavam que: (1º) havia necessidade de utilização de células capacitivas com valores inferiores ao do menor capacitor já utilizado pelo consumidor (5 kVAr), para correção do fator de potência; (2º) percebeu-se que há um salto muito grande entre os valores dos dois menores capacitores do consumidor (de 5 kVAr e de 15 kVAr), diminuindo o grau de liberdade do controlador do fator de potência.

Por isso, optou-se pela utilização de células capacitivas de valores menores que 15 kVAr, encontradas no mercado, a fim de que, somados seus valores com os dos capacitores já existentes no banco do usuário, se pudesse preencher melhor os intervalos dos valores necessários para correção do fator de potência.

Assim, os 22 cenários seguintes (ao primeiro) foram realizados tomando como referência capacitores de 0,5, 1, 1,5, 2,0, 2,5, 3, 5, 7,5 e 10 kVAr, combinados para obtenção do melhor resultado possível.

Durante a realização dos testes de simulação, 7 cenários foram mais efetivos, porque apontavam para a correção de 100% do fator de potência ao longo do ano. Esses 7 cenários de maior eficiência foram:

1. Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por dois de 2 kVAr e outro de 7,5 kVAr;

2. Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por um de 2,0 kVAr e dois de 5 kVAr;
3. Substituir 2 capacitores de 30 kVAr por um de 5 kVAr e outro de 7,5 kVAr;
4. Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por um de 2,5 kVAr e dois de 5 kVAr;
5. Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por um de 3 kVAr e dois de 5 kVAr;
6. Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por três de 5 kVAr; e
7. Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por um de 7,5 kVAr e dois de 5 kVAr.

4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para análise dos custos da viabilidade econômica das soluções propostas na simulação realizada pelo aplicativo desenvolvido, foram pesquisados e calculados, como dito, diversos valores de referência.

Primeiramente, por meio análise das faturas de energia fornecidas pelo consumidor, referentes a um ano, pôde-se quantificar seu faturamento anual de energia reativa excedente: R\$ 1.577,91, no total – soma que, dividida por doze meses, é equivalente a seu faturamento mensal: R\$ 131,49.

Também foram orçados, os valores para compra dos novos capacitores, conforme apontados pela simulação – todos da linha Weg, que são os que o Ifes campus Serra já utiliza –, junto a fornecedor do produto localizado próximo ao consumidor, e esses custos variaram entre R\$ 686,00 e R\$ 1.001,50,

Já a compra dos disjuntores em caixa moldada, referentes a esses capacitores, custou entre R\$ 1.010,60 e R\$ 1.442,90. Enquanto o valor do serviço de instalação dos materiais, foi orçado em R\$ 1.000,00, junto a profissionais da região. Logo, o custo total da implementação da solução mais econômica proposta pela aplicação é de R\$ 2.696,60.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados, ao todo, 34.013 registros, com períodos de intervalo de 15 minutos entre cada um. Com as avaliações realizadas pela aplicação desenvolvida, foi possível aferir, ao longo do período de análise (outubro/2022 e setembro/2023), a menor e a maior potência reativa capacitiva necessária para corrigir o fator de potência desejável (0,92), sendo seus valores, respectivamente, 0,46 kVAr (maio/2023) e 16,38 kVAr (junho/2023), como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de potência reativa para correção do fator de potência

Ano	Mês	Menor Qc Necessário (kVAr)	Maior Qc Necessário (kVAr)
2022	Outubro	0,51	2,99
2022	Novembro	0,66	13,39
2022	Dezembro	0,71	15,26
2023	Janeiro	0,65	16,15
2023	Fevereiro	0,69	15,11
2023	Março	1,38	15,68
2023	Abril	1,35	12,90
2023	Maior	0,46	13,15
2023	Junho	0,73	16,38
2023	Julho	2,54	13,75
2023	Agosto	0,72	13,25
2023	Setembro	3,05	15,18

Fonte: próprio autor (2023).

Dos 34.013 registros analisados, 7.458 foram identificados – por meio do código da aplicação – como sujeitos a faturamento de energia reativa excedente. Levaram-se em consideração, na obtenção dos resultados do excedente de reativo, o valor do fator de potência e a avaliação horária.

Alguns desses 7.458 resultados, no entanto, foram aferidos em sábados,

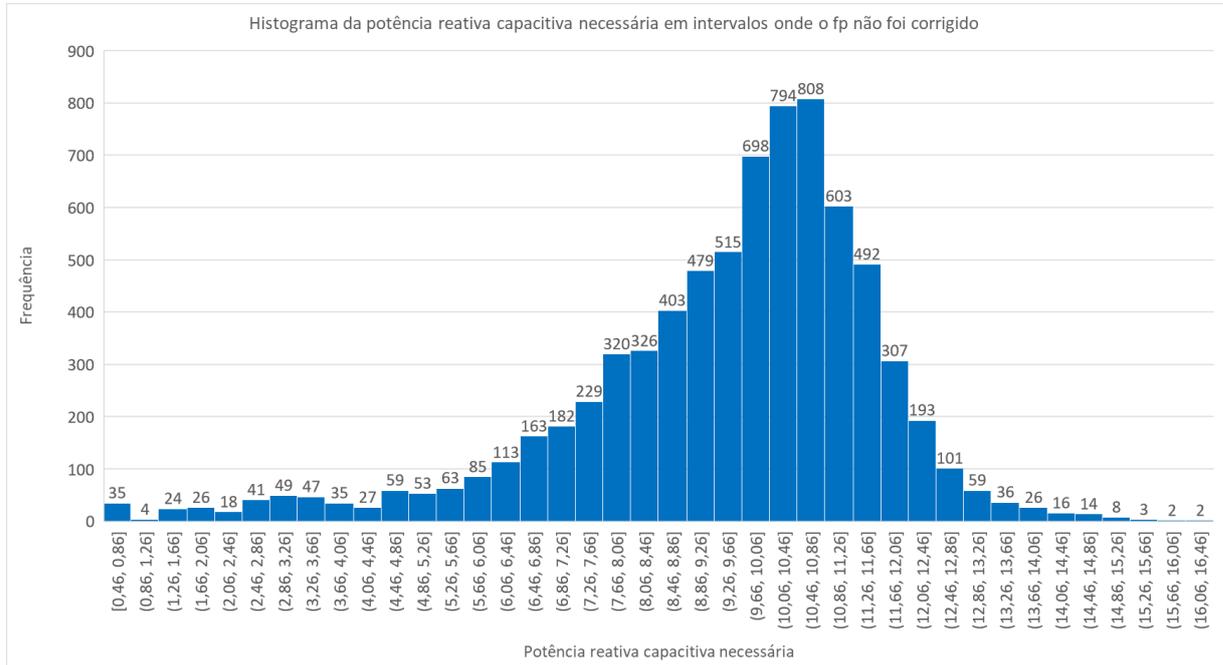
domingos ou feriados, períodos não sujeitos ao faturamento de energia reativa excedente pela legislação.

Diante disso, após se plotar o histograma dos 7.458 registros que obtiveram seus excedentes de reativos perante a avaliação horária, foram identificados os intervalos dos estágios mais demandados para a correção do fator de potência, quais sejam, valores entre 4,94 kVAr e 13,56 kVAr, como demonstrado pela Figura 11.

Nos testes realizados para correção do fator de potência, verifica-se que a estratégia utilizada pelo modo sequencial descendente, de utilizar como primeiro estágio a maior célula capacitiva (30 kVAr), pouco fez tal correção, pois a potência da célula se distancia muito do reativo necessário para esse acerto.

Ao passo que a estratégia de compensação do modo sequencial ascendente – de adicionar gradativamente células capacitivas, da de menor para a de maior valor, até que se corrija o fator de potência – obteve melhores resultados, por trabalhar, de maneira mais imediata, com valores mais próximos do que é necessário para corrigir o reativo excedente.

Figura 11: Histograma da potência reativa capacitiva necessária para correção do fator de potência



Fonte: próprio autor (2023).

Com base nos cálculos da aplicação *web* desenvolvida, pôde-se aferir que, com a utilização apenas dos capacitores já existentes no banco do Ifes – campus Serra, foram corrigidas 7.415 das 7458 intercorrências com faturamentos por excesso de reativo (restando somente 43 incidências não corrigidas) com a estratégia de compensação ascendente, o que já aponta para uma economia de R\$ 1.568,81 por ano.

Já com a estratégia de compensação descendente, esse resultado cai para somente 32 intercorrências resolvidas (restando 7426 sem solução), com uma economia anual de apenas R\$ 6,77, com a utilização somente dos capacitores atuais.

Também se percebeu, pelos 23 cenários propostos e testados com o auxílio da aplicação, que, em 7 cenários, houve correção do excedente reativo de 100% das ocasiões que haveria faturamento de reativos – como se verifica na Tabela 3.

Tabela 3: Melhores cenários de testes aplicados para correção do fator de potência

Cenário	Descrição	Estratégia de compensação
1	Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por dois de 2 kVAr e outro de 7,5 kVAr	Sequencial Ascendente
2	Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por um de 2,0 kVAr e dois de 5 kVAr	Sequencial Ascendente
3	Substituir 2 capacitores de 30 kVAr por um de 5 kVAr e outro de 7,5 kVAr	Sequencial Ascendente
4	Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por um de 2,5 kVAr e dois de 5 kVAr	Sequencial Ascendente
5	Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por um de 3 kVAr e dois de 5 kVAr	Sequencial Ascendente
6	Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por três de 5 kVAr	Sequencial Ascendente
7	Substituir 3 capacitores de 30 kVAr por um de 7,5 kVAr e dois de 5 kVAr	Sequencial Ascendente

Fonte: próprio autor (2023).

Todos esses 7 melhores cenários, todavia, demandavam a instalação de novos capacitores específicos, para se juntarem aos que o consumidor analisado já possui, de forma a se otimizar a combinação deles e obter a correção total do fator de potência, de maneira a não se pagar faturamento por excesso de energia reativa.

Dentre as potências das novas células capacitivas sugeridas nesses melhores cenários, a serem adquiridas pelo consumidor analisado, figuram as de 2 kVAr, 2,5 kVAr, 3 kVAr, 5 kVAr (outro, além do que o consumidor já tem) e 7,5 kVAr, a depender de cada cenário e de suas combinações (vide Tabela 3).

Além disso, entre esses melhores cenários, pode-se destacar o que tem o menor custo de implementação, por ser o único desses que recomenda a instalação de apenas mais 02 (dois) novos capacitores: um de 5 kVAr e um de 7,5 kVAr – trata-se do cenário 3, conforme Tabela 3.

Além disso, nenhum dos 23 cenários testados propôs a utilização dos capacitores de 30 kVAr já instalados pelo consumidor analisado, pois suas valências estão muito acima de todos os valores necessários para correção do fator de potência mostrados pelo histograma (Figura 10).

Por isso, ante o desuso de alguns capacitores (os 30 kVAr) e a já demonstrada necessidade de instalação de outros novos (um de 5 kVAr e outro de 7,5 kVAr, no cenário mais econômico proposto), e por uma questão de economia e eficiência, mostrou-se recomendável a troca de 2 células capacitivas de 30 kVAr por uma de 5 kVAr e uma de 7,5 kVAr.

Quanto à viabilidade econômica da implementação das soluções apontadas pelo aplicativo, é importante observar: (1º) que o investimento inicial, que é o custo para aplicação da solução mais econômica proposta, como já dito, é de R\$ 2.696,60; (2º) o valor a ser economizado durante o ano (economia anual), com o fim do faturamento de energia reativa excedente, é de R\$ 1.577,91; (3º) logo, a economia mensal (dividindo-se por 12 meses a

economia anual) é de R\$ 131,49; (4º) conseqüentemente, o *payback* simples, que não considera a desvalorização do dinheiro, é a razão entre o investimento inicial (R\$ 2.696,60) e o valor economizado por mês (R\$ 131,49), aponta que haverá retorno do investimento a partir de 21 meses. O *payback* descontado, que considera a mudança de valor do dinheiro no decorrer do tempo, é de 33 meses; (5º) o VPL indica um ganho total de R\$ 6.595,10, ao longo de 17 (dezesete) anos (tempo de vida útil do aparelho), já descontados os custos com investimento inicial e a desvalorização da moeda (taxa de desconto, com base em projeção dos juros); e, por fim, (6º) O cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR) apresenta um valor positivo, indicando que o retorno do investimento é superior a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Neste estudo, a TMA foi determinada com base na taxa Selic, que é de 10,50%, referente a 07/2024.

6 CONCLUSÃO

A aplicação *web* desenvolvida, pelos testes realizados, se mostrou uma ferramenta útil, pois, por meio das simulações nele feitas (com os dados inseridos pelo usuário), revelou-se capaz de permitir ao usuário a visualização do melhor cenário de combinações, com vistas à correção do excedente de energia reativa. Com base nos dados analisados, foi possível concluir que, para o caso do Ifes – campus Serra, a estratégia de compensação ascendente corrigiu mais o fator de potência que a de compensação descendente, em todos os cenários aplicados para a mesma massa de dados de energia elétrica, em todo o tempo de análise. Além disso, o histograma de potência reativa capacitiva necessária para corrigir o fator de potência revela, nos períodos em que a legislação aplica faturamento de excedente de reativo, maiores demandas de valores de capacitores próximos a 5 kVAr e 15 kVAr. Confirmou-se, ainda, a viabilidade econômica da implementação das soluções propostas pela aplicação *web* desenvolvida, uma vez

aferido que o tempo de retorno do capital investido é de 33 meses, e que o tempo de vida útil dos capacitores a serem adquiridos é de 17 anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o grupo de pesquisa de energias renováveis para automação (GERA) e o Laboratório Espaço Energia por disponibilizar a estrutura física e o analisador de energia; e ao Campus Serra, por disponibilizar acesso às instalações do banco de capacitores.

REFERÊNCIAS

ABOSHADY, F. M. *et al.* **Reactive Power Control of PV Inverters in Active Distribution Grids with High PV Penetration**. IEEE Access, 2023.

ADESINA, L. M.; OGUNBIYI, O.; MUBARAK, M. **Web-based software application design for solar PV system sizing**. TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), v. 19, n. 6, p. 2009-2019, 2021.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 1.000 da ANEEL**, de 7 de dezembro, de 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Acesso em: 02 nov. 2023.

AFSHER, P. A.; KUMAR, M. V. M. Performance Analysis of a 50 kW Grid-Tied PV System on Energy Productivity in a Technical Institution Building and Mitigation Method to Improve the Low Power Factor Problem. **Renewable Energy Focus**, 2023.

AWS. AMAZON WEB SERVICE. **O que é uma aplicação Web?** Disponível em: <<https://aws.amazon.com/pt/what-is/web-application/>>. Acesso em: 03 nov. 2023.

BARRADAS, J. V. A. **Análise dos impactos da alta integração da geração distribuída à rede através da modelagem computacional de geradores fotovoltaicos**, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/3435>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

BENEDITO, R. D. S.; ZILLES, R.; PINHO, J. T. Overcoming the power factor apparent degradation of loads fed by photovoltaic distributed generators. **Renewable Energy**, v. 164, p. 1364-1375, 2021.

BORDEAUX-RÊGO, Ricardo *et al.* **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. 4. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2013.

BORNIATTI, A. R. *et al.* **Gestão de Energia Inteligente em Instituição Pública de Ensino – Uma Abordagem da UFSM**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 1, n. 1, 2020.

CALLEGARI, J.M.S., SILVA, M.P., De BARROS, R.C., BRITO, E.M.S., CUPERTINO, A.F.; PEREIRA, H.A., 2019. Lifetime evaluation of three-phase multifunctional PV inverters with reactive power compensation. **Electric Power Systems Research**, 175, p.105873.

CREDER, H. **Instalações Elétrica**. 15. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2012.

COTRIM, Ademaro Alberto Machado Bittencourt. **Instalações Elétricas**. 5ª.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

DI SANTO, K. G. *et al.* Active demand side management for households in smart grids using optimization and artificial intelligence. **Measurement**, v. 115, p. 152 – 161, 2018.

ECMA. (2022). **C# Language Specification**. Disponível em: <<https://www.ecma-international.org/publications-and->

standards/standards/ecma-334/>. Acesso em: 02 maio 2023.

FILHO, J. M. **Instalações Elétrica Industriais**. 9. ed., São Paulo: LTC, 2017.
FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. São Paulo: Saraiva, 2014.

GUAITOLINI, T. M.; NASCIMENTO, E. B.; BREDE, R. P.; GOBBI, R. E.; SILVA, D. P.; SILVA, F. B. B.; CAMARGO, R. S. (2023). Load Curve Based on Modeling a Photovoltaic System, Load and Weather Data - a Case Study in Brazil. *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 248–253. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/INDUSCON58041.2023.10374578>>.

GUSMAN, L. S., *et al.* Design for reliability of multifunctional PV inverters used in industrial power factor regulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 119, p. 105932, 2020.

JEGEN, M.; PHILION, X. D. Smart grid development in Quebec: A review and policy approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 1922-1930, 2018.

KAKRAN, S.; CHANANA, S. Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 524– 535, 2018.

LEE, Hsi-Chieh *et al.* A Customized Energy Management System for Distributed PV, Energy Storage Units, and Charging Stations on Kinmen Island of Taiwan. *Sensors*, v. 23, n. 11, p. 5286, 2023.

LIMA, Cleydson Matos *et al.* Desenvolvimento de software de gerenciamento energético aplicado a análises tarifárias com estudo de caso na Universidade Federal do Pará.

In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. 2020.

LIMA, C. A. *et al.* **Uso de novas tecnologias digitais para medição de consumo de energia e níveis de eficiência energética no Brasil**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

MELIONES, A.; APOSTOLACOS, S.; NOUVAKI, A. A web-based three-tier control and monitoring application for integrated facility management of photovoltaic systems. *Applied computing and informatics*, v. 10, n. 1-2, p. 14-37, 2014.

MFENGUZA, G. **The impact of integrating solar photovoltaic generators on grid connected systems**, 2022. Disponível em: <<https://ujcontent.uj.ac.za/esploro/outputs/graduate/The-impact-of-integrating-solar-photovoltaic/9929609407691>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

MAGHAMI, M.R.; PASUPULETI, J.; LING, C.M. **Impact of Photovoltaic Penetration on Medium Voltage Distribution Network**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su15075613>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

MICROSOFT. **Um tour pela Linguagem C#**. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/pt-br/dotnet/csharp/tour-of-csharp/index>>. Acesso em: 01 nov. 2023.

PIGNATON, E. G.; PAULA E SILVA, D.; DA SILVA, F. B. B.; SALLES, J. L. F.; FARDIN, J. F. (2023). Validation Of Photovoltaic Model For Application In A Distributed Energy Source Using Weather Data. *Revista Contemporânea*, 3(6), 6483–6496. Disponível em: <<https://doi.org/10.56083/RCV3N6-096>>.

PINTO, A., ZILLES, R., BET, I. **Excedente de reativos em sistemas fotovoltaicos conectados à rede**, 2012. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2006/1990>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

POMPERMAYER, D. C. *et al.* **Extra Reactive Power Analysis on a Distribution Grid with High Integration of PV Generation**, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9065632>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

POMPERMAYER, D. C.; FARDIN, J. F. **The impact of integrating solar photovoltaic generators on grid connected systems**, 2023. Disponível em: <https://cobep.org/wp-content/uploads/2023/11/ID_269.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2023.

RAHMAN, M. M. *et al.* Global modern monitoring systems for PV based power generation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 4142 – 4158, 2018.

RAJPUT, S. K.; DHEER, D. K. Forecasting power-factor reductions in rooftop PV-integrated industrial power systems: Mathematical modelling and experimental validation. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 33, p. 100974, 2023.

RESENDE, F.; PAULILLO, G. Capítulo VIII - **Compensação reativa e qualidade da energia elétrica**, 2013. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/09/ed-91_Fasciculo_Cap-VIII-Qualidade-de-energia.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2023.

SEBRAE. **Aprenda a identificar a energia excedente reativa para evitar multas**. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/aprenda-a-identificar-a-energia-excedente-reativa-para-evitar-multas,9774ec2777cb5810VgnVCM1000001b00320aRCRD>>.

Acesso em: 27 nov. 2023.

SELVARAJ, R.; KUTHADI, V. M.; BASKAR, S. Smart building energy management and monitoring system based on artificial intelligence in smart city. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 56, p. 103090, 2023.

SILVA, D. P.; FÉLIX SALLES, J. L.; FARDIN, J. F.; ROCHA PEREIRA, M. M. (2020). Management of an island and grid-connected microgrid using hybrid economic model predictive control with weather data. **Applied Energy**, 278(July), 115581. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115581>>.

SILVA, D. P.; SALLES, J. L. F.; FARDIN, J. F.; PEREIRA, M. M. R.; OTTZ, V. C.; DA SILVA, F. B. B.; PIGNATON, E. G. (2021). Measured and forecasted weather and power dataset for management of an island and grid-connected microgrid. **Data in Brief**, 39, 107513. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107513>>.

TAVEIRA, Isabela Maciel. **A influência da geração fotovoltaica no fator de potência de unidades prosumidoras: uma avaliação técnica e financeira**. Monografia do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará Fortaleza, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/45193/1/2019_tcc_imtaveira.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2023.

TECHNET. (2010) **Arquitetura ASP.NET** Disponível em: <<http://technet.microsoft.com/ptbr/library/cc737863%28WS.10%29.aspx>>. Acesso em: 01 nov. 2023.

TÉLLEZ, A. A. *et al.* Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. **Review. Heliyon**, v. 4, n. 8, 2018. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844018332766>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

WEG. Correção do Fator de Potência.

Disponível em:

<<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hda/ha0/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-pt.pdf>>. Acesso em: 30 dez. 2022.

WEG. Manual para Correção do Fator de Potência.

Disponível em:

<<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/erley/inst.-industriais-1/fator-de-potencia-em-instalacoes-industriais/materiais-de-apoio/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-manual-portugues-br.pdf/view>>.

Acesso em: 30 out. 2023a.

WEG. Controlador fator potência

PFW03-M12. Disponível em:

<<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf4/h45/WEG-multimedidor-MMW03-e-controlador-PFW03-0084748-pt.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2023b.

APÊNDICE A – ENTIDADES DO BANCO DE DADOS

Quadro 1: Entidades e seus respectivos atributos

Entidade	Atributos	Observações sobre a Entidade
Capacitor	Capacitor_ID	Entidade que representa os valores das células capacitivas incluindo dados técnicos
	Capacitor_Fabricante	
	Capacitor_Potencia	
	Capacitor_Tensao	
	Capacitor_Unidade	
Configuracao	Configuracao_ID	Entidade que armazena informações necessárias dos parâmetros de entrada
	Configuracao_Nome	
	Configuracao_Descricao	
	Configuracao_Valor	
Estagio	Estagio_ID	Entidade que representa os estágios do banco de capacitores simulado
	Tipo_Potencia_ID	
	Capacitor_ID	
	Estagio_Descricao	
	Tipo_Estagio_ID	
	Estagio_Ativo	
Medicao	Medicao_ID	Entidade que representa os valores obtidos pela memória de massa de energia elétrica
	Medicao_DataInicio	
	Medicao_DataFim	
	Medicao_PotenciaAtiva	
	Medicao_PotenciaReativa	
	Medicao_PotenciaAparente	
	Medicao_FatorPotencia	
	Medicao_TipoFatorPotencia	
Modo_Compensacao	Modo_Compensacao_ID	Entidade que representa os modos de compensação
	Modo_Compensacao_Nome	
Tipo_Estagio	Tipo_Estagio_ID	Entidade que representa os tipos de estágios
	Tipo_Estagio_Nome	
	Tipo_Estagio_Descricao	
Tipo_Potencia	Tipo_Potencia_ID	Entidade que representa os tipos de potência
	Tipo_Potencia_Sigla	
	Tipo_Potencia_Descricao	

Fonte: próprio autor (2023).

APÊNDICE B – TELAS DO APLICATIVO WEB DESENVOLVIDO

Figura 12: Telas do aplicativo web

Configurações

Parametrizações

Esquema de Ligação das Entradas

Tensão de Linha (V) 220 Relação TC 800 Relação C/K 0.016

Bancos Fixos

Quantidade: Nenhum estágio

Bancos Automáticos

Quantidade: 12 estágios

Estágio 1: 30, Estágio 2: 30, Estágio 3: 30, Estágio 4: 30, Estágio 5: 30, Estágio 6: 20, Estágio 7: 20, Estágio 8: 20, Estágio 9: 20, Estágio 10: 20, Estágio 11: 15, Estágio 12: 5

Resultado

Total de medições: 2834 Candidatos a ERE: 811 FP corrigidos: 783 FP não corrigidos: 28

Apresentar: 5 linhas por página Atualizar Colunas Visíveis

Data Início	Data Fim	FP atual	Tipo de FP atual	Ação	Qc Necessário (kVAR)	Estágios (kVAR)	FP Corrigido	Tipo de FP Corrigido
01/08/2023 00:00:00	01/08/2023 00:14:59	0.63	Cap	Desativar	10.79	5 [A] → 15 [A]	0.97	Ind
01/08/2023 00:15:00	01/08/2023 00:29:59	0.67	Cap	Desativar	9.88	5 [A] → 15 [A]	0.96	Ind
01/08/2023 00:30:00	01/08/2023 00:44:59	0.65	Cap	Desativar	10.3	5 [A] → 15 [A]	0.96	Ind
01/08/2023 00:45:00	01/08/2023 00:59:59	0.65	Cap	Desativar	10.23	5 [A] → 15 [A]	0.96	Ind
01/08/2023 01:00:00	01/08/2023 01:14:59	0.63	Cap	Desativar	10.99	5 [A] → 15 [A]	0.97	Ind

Mostrando 1 a 5 de 811 registros

Fonte: próprio autor (2023).

APÊNDICE C – FLUXO DE PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA UTILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO

Figura 13: Fluxo de preparação dos dados



Memória de massa

Início	Fim	P. Aparente Soma Vetorial	P. Reativa Total	FP Real Média
01/10/2022 00:00	01/10/2022 00:14	19.773,04	-2.068,75	0,99
01/10/2022 00:15	01/10/2022 00:29	18.987,28	-2.391,33	0,98
01/10/2022 00:30	01/10/2022 00:44	18.681,79	-3.376,40	0,97
01/10/2022 00:45	01/10/2022 00:59	18.684,99	-2.062,19	0,99
01/10/2022 01:00	01/10/2022 01:14	18.437,58	-1.452,15	0,99



Upload do template com registros da memória de massa

Data Início	Data Fim	Potência Reativa (kVAR)	Potência Aparente (kVA)	FP	Tipo de FP
01/10/2022 00:00	01/10/2022 00:14	-2,068750	19,77304	0,994512	Cap
01/10/2022 00:15	01/10/2022 00:29	-2,391330	18,98728	0,992037	Cap
01/10/2022 00:30	01/10/2022 00:44	-3,376400	18,68179	0,983532	Cap
01/10/2022 00:45	01/10/2022 00:59	-2,062190	18,68499	0,993891	Cap
01/10/2022 01:00	01/10/2022 01:14	-1,452150	18,43758	0,996894	Cap



Registros inseridos no banco de dados

Medicao_DataInicio	Medicao_DataFim	Medicao_PotenciaAtiva	Medicao_PotenciaReativa	Medicao_PotenciaAparente	Medicao_FatorPotencia	Medicao_TipoFatorPotencia
2022-10-01 00:00:00	2022-10-01 00:14:59	19.77304	-2.06875	19.77304	0.994511767143014	Cap
2022-10-01 00:15:00	2022-10-01 00:29:59	18.98728	-2.39133	18.98728	0.99203737924871	Cap
2022-10-01 00:30:00	2022-10-01 00:44:59	18.68179	-3.3764	18.68179	0.983532353997611	Cap
2022-10-01 00:45:00	2022-10-01 00:59:59	18.68499	-2.06219	18.68499	0.993890998936444	Cap
2022-10-01 01:00:00	2022-10-01 01:14:59	18.43758	-1.45215	18.43758	0.996893579795514	Cap



Tabela de aplicação com os dados da memória de massa

Apresentar 5 linhas por página

Colunas Visíveis

Data Início	Data Fim	Pot. Ativa	Pot. Reativa	Pot. Aparente	Fator de Potência	Tipo de FP
01/10/2022 00:00:00	01/10/2022 00:14:59	19.66	-2.07	19.77	0.99	Cap
01/10/2022 00:15:00	01/10/2022 00:29:59	18.84	-2.39	18.99	0.99	Cap
01/10/2022 00:30:00	01/10/2022 00:44:59	18.37	-3.38	18.68	0.98	Cap
01/10/2022 00:45:00	01/10/2022 00:59:59	18.57	-2.06	18.68	0.99	Cap
01/10/2022 01:00:00	01/10/2022 01:14:59	18.38	-1.45	18.44	1.00	Cap

Mostrando 1 a 5 de 34.013 registros

Anterior 1 2 3 4 5 ... 6803 Próximo

Fonte: próprio autor (2023).