UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

João Gabriel Bandeira Ramos

Desenvolvimento de Software Para Gestão de Energia e Eficiência Energética Voltado a Unidades Consumidoras do Grupo A

Ilha Solteira
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

João Gabriel Bandeira Ramos

Desenvolvimento de Software Para Gestão de Energia e Eficiência Energética Voltado a Unidades Consumidoras do Grupo A

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharelado em Engenharia Elétrica.

Nome do orientador
Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R175d

Ramos, João Gabriel Bandeira.
Desenvolvimento de software para gestão de energia e eficiência energética voltado a unidades consumidoras do grupo A / João Gabriel Bandeira Ramos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024

Orientador: Fábio Bertequini Leão

Inclui bibliografia

1. Gestão de energia. 2. Eficiência energética. 3. Otimização. 4. Algoritmo genético. 5. Python.

Elaborado por Raiane da Silva Santos - CRB: 8/9999

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos **nove dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e quatro**, o discente **João Gabriel Bandeira Ramos,** matriculado sob o nº 2233/15, tendo como banca examinadora seu orientador, o *Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão, o Prof. Dr. Carlos Antonio Alves e o prof. Dr. John Fredy Franco Baquero,* apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"Desenvolvimento de Software para Gestão de Energia e Eficiência Energética voltado a Unidades Consumidoras do Grupo A"** obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito APROVADO.

Fábio Bertequini Leão

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão

- orientador -

João Gabriel Bandeira Ramos

- discente -

Prof. Dr. Carlos Antonio Alves

- membro da banca -

John Fredy Franco B.

Prof. Dr. John Fredy Franco Baquero

- membro da banca -

Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Elétrica
Avenida Professor José Carlos Rossi, 1370 - CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP - Brasil
Tel (18) 37431150 - Fax (18) 3742-2735 - www.feis.unesp.br

Dedico a realização deste trabalho aos meus pais, Cláudio e Eliana, e ao meu irmão Pedro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela saúde, o privilégio da vida e a bênção de mais esta conquista.

Aos meus pais, Cláudio e Eliana, gratidão, pelo suporte incondicional que sempre me foi concedido ao longo de toda a minha trajetória.

Ao professor Fábio, sou grato pelo conhecimento compartilhado ao longo da graduação e pela orientação precisa e criteriosa, que foram essenciais para o êxito deste trabalho.

Por fim, agradeço à UNESP de Ilha Solteira, aos seus docentes, técnicos e demais colaboradores, pelo ensino de referência, fundamental para o meu desenvolvimento profissional.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um software voltado à consultoria energética, com foco em unidades consumidoras do grupo A, para gestão eficiente de energia e implementação de estratégias de otimização. A ferramenta é capaz de realizar análises estatísticas detalhadas do perfil de consumo, verificar a necessidade de correção do fator de potência, dimensionar bancos de capacitores, além de determinar a modalidade tarifária mais adequada e o ajuste ideal da demanda contratada, visando minimizar os custos para o cliente. O software foi validado por meio de dados reais e referências da literatura, demonstrando eficácia em traçar perfis típicos de consumo e em garantir conformidade regulatória com as exigências da Resolução Normativa nº 1000 da ANEEL. Além disso, os algoritmos híbridos de otimização desenvolvidos comprovaram alto desempenho, proporcionando resultados corretos e otimizados em tempos de execução significativamente menores que os métodos tradicionais. A ferramenta se destaca como um recurso robusto para análise energética, oferecendo suporte técnico confiável aos profissionais do setor.

Palavras-chave: gestão de energia; eficiência energética; otimização; algoritmo genético; python.

ABSTRACT

This work presents the development of a software tool aimed at energy consulting, focusing on Group A consumer units, for efficient energy management and the implementation of optimization strategies. The tool is capable of performing detailed statistical analyses of consumption profiles, verifying the need for power factor correction, dimensioning capacitor banks, and determining the most appropriate tariff modality and optimal contracted demand adjustment to minimize costs for the client. The software was validated using real data and references from the literature, demonstrating its effectiveness in mapping typical consumption profiles and ensuring regulatory compliance with the requirements of ANEEL's Normative Resolution No. 1000. Furthermore, the hybrid optimization algorithms developed proved to be highly efficient, providing correct and optimized results in significantly shorter execution times compared to traditional methods. The tool stands out as a robust resource for energy analysis, offering reliable technical support to industry professionals.

Keywords: energy management; energy efficiency; optimization; genetic algorithm; python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Triângulo de potências 20
Figura 2. Correção do fator de potência via banco de capacitores 24
Figura 3. Fluxograma simplificado do algoritmo genético híbrido 35
Figura 4. Exemplo de memória de massa de uma unidade consumidora conectada à rede elétrica da CEMIG 38
Figura 5. Dados da memória de massa importados e tratados pelo software 39
Figura 6. Curva de carga da unidade consumidora no período considerado 40
Figura 7. Perfil típico de demanda e consumo da instalação, em um intervalo de 15minutos, para cada posto tarifário 42
Figura 8. Perfil típico de demanda e consumo da instalação, em um intervalo de 15minutos, para cada dia da semana 43
Figura 9. Perfil de demanda típico diário da instalação, para cada dia da semana 44
Figura 10. Perfil de demanda típico diário da instalação, com intervalo de confiança 44
Figura 11. Fator de potência, e ângulo correspondente, da instalação 47
Figura 12. Perfil típico do fator de potência, em um intervalo de 15 minutos, para cada dia da semana 48
Figura 13. Perfil típico do fator de potência diário da instalação, por dia da semana 48
Figura 14. Recorte da base de dados: instantes em que o fator de potência é menor que o valor de referência 49
Figura 15. Recorte da base de dados: potência reativa capacitiva mínima necessária para corrigir o fator de potência para o valor de referencia 50
Figura 16. Catálogo de unidades capacitivas expressas em kVAr 51
Figura 17. Opções de configuração disponíveis para cada unidade capacitiva 51

Figura 18. Recorte da base de dados: efeito da instalação do banco de capacitores chaveados no fator de potência da unidade consumidora 52
Figura 19. Fator de potência, e ângulo correspondente, antes e depois da instalação do banco de capacitores chaveados 53
Figura 20. Dia e número de unidades capacitivas manobradas pelo controlador 53
Figura 21 Ângulo do fator de potência, antes e depois da instalação do banco de capacitores chaveados, por intervalo de cobrança diário 54
Figura 22. Recorte da base de dados: efeitos da instalação do banco de capacitores fixo no fator de potência da unidade consumidora ... 55
Figura 23. Fator de potência, e ângulo correspondente, antes e depois da instalação do banco de capacitores fixo 56
Figura 24. Ângulo do fator de potência, antes e depois da instalação do banco de capacitores fixo, por intervalo de cobrança diário 56
Figura 25. Três meses de memória de massa importado e tratado pelo software 57
Figura 26. Resumo dos registros mensais da instalação gerado pelo software 58
Figura 27. Contrato de demanda ótimo dentro da modalidade tarifária horária verde 59
Figura 28. Demanda contratada ótima dentro da modalidade tarifária horária verde 59
Figura 29. Demanda contratada atual, ótima e demandas máximas registradas 60
Figura 30. Contrato de demanda ótimo dentro da modalidade tarifária horária azul 62
Figura 31. Análise da performance do algoritmo genético híbrido 63
Figura 32. Tempo de execução por método de tentativa e erro 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Demanda média, máxima e fator de carga da unidade consumidora, no período considerado 41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

FP: Fator de Potência

k: Prefixo do Sistema Internacional que representa a multiplicação por 10^3.

M: Prefixo do Sistema Internacional que representa a multiplicação por 10^6.

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

REN: Resolução Normativa.

VA: Unidade de medida do Sistema Internacional para Potência Aparente.

VAr: Unidade de medida do Sistema Internacional para Energia Reativa.

W: Unidade de medida do Sistema Internacional para Potência Ativa.

Wh: Unidade de medida do Sistema Internacional para Energia Ativa.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

2. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UNIDADES CONSUMIDORAS DO GRUPO A 17

2.1 Análise estatística da memória de massa 18

2.2 Correção do fator de potência em unidades consumidoras do grupo A 19

2.2.1 Exigências regulatórias sobre o fator de potência em unidades consumidoras do grupo A 21

2.2.2 Correção do fator de potência via banco de capacitores 22

2.3 Gestão de modalidades tarifárias e ajuste de demanda contratada 24

3. TÉCNICA DE SOLUÇÃO E PLATAFORMA COMPUTACIONAL UTILIZADAS PARA A ANÁLISE E GESTÃO ENERGÉTICA 26

3.1 Função objetivo e *fitness* 26

3.2 População e cromossomo 26

3.3 Codificação real 27

3.4 Operadores Genéticos 27

3.5 *Crossover* 27

3.6 Mutação 28

3.7 Seleção 28

3.8 Elitismo 28

3.9 Hibridização nos algoritmos genéticos 29

3.10 A linguagem de programação Python 30

3.11 A distribuição Anaconda e o ambiente Jupyter Notebook 31

4. METODOLOGIA 34

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 38

5.1 Avaliação estatística dos registros da memória de massa 38

5.2 Análise do fator de potência da unidade consumidora 47

5.2.1 Resultados para o dimensionamento de banco de capacitores chaveados para correção do fator de potência 50

5.2.2 Resultados para o dimensionamento de banco de capacitores fixo para correção do fator de potência 55

5.3 Resultados para a gestão de modalidades tarifárias e ajuste de demanda contratada 57
5.3.1 Modalidade tarifária horária verde 58
5.3.2 Modalidade tarifária horária azul 61
6. CONCLUSÕES 65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética e a gestão de energia elétrica têm se tornado tópicos cada vez mais relevantes no cenário brasileiro, especialmente no contexto de unidades consumidoras do Grupo A. Segundo o Art. 2º da Resolução Normativa (REN) nº 1000 da ANEEL, as unidades consumidoras classificadas como pertencentes ao Grupo A são aquelas atendidas com tensão de conexão maior ou igual a 2,3 kV, ou por meio de sistemas subterrâneos de distribuição em tensão inferior a 2,3 kV, sendo subdivididas nos seguintes subgrupos: (1)

- Subgrupo A1: tensão de conexão maior ou igual a 230 kV;
- Subgrupo A2: tensão de conexão maior ou igual a 88 kV e menor ou igual a 138 kV;
- Subgrupo A3: tensão de conexão igual a 69 kV;
- Subgrupo A3a: tensão de conexão maior ou igual a 30 kV e menor ou igual a 44 kV;
- Subgrupo A4: tensão de conexão maior ou igual a 2,3 kV e menor ou igual a 25 kV; e
- Subgrupo AS: tensão de conexão menor que 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição;

Esses consumidores possuem um perfil de consumo e necessidades operacionais que exigem uma gestão precisa e estratégias específicas para otimizar o uso de energia elétrica. A busca por eficiência não se resume apenas à redução de custos, mas também à melhoria da qualidade da energia fornecida, à continuidade das operações e à sustentabilidade dos processos industriais e comerciais.

A relevância dessas estratégias se intensificou em função das crises no sistema hidrelétrico nacional, que é a principal fonte de energia do Brasil. Esses eventos, aliados à variabilidade climática e ao aumento da demanda energética, resultaram em elevações nos custos da energia elétrica e, consequentemente, na necessidade de estratégias que possam mitigar esses custos. Para o consumidor industrial, a eficiência energética não implica somente uma redução na fatura mensal, mas também um incremento na competitividade de seus produtos e serviços, além de contribuir para a sustentabilidade do sistema elétrico brasileiro como um todo.

No âmbito regulatório, a Agência Nacional de Energia Elétrica estabeleceu, por meio da Resolução Normativa nº 1000 de 2021, regras específicas para a prestação do serviço de distribuição de energia elétrica. Essa resolução prevê a aplicação de diferentes modalidades tarifárias para o grupo A, como a horo-sazonal azul e a horo-sazonal verde, com tarifas e condições ajustadas de acordo com o perfil de consumo e a demanda contratada. As modalidades tarifárias têm como objetivo incentivar o consumidor a adequar seu consumo aos horários em que o sistema elétrico nacional está menos sobrecarregado, promovendo, assim, a estabilidade do sistema e contribuindo para a redução dos custos operacionais das concessionárias.

Além disso, a Resolução Normativa nº 1000 define critérios e penalidades para o fator de potência, especialmente nas unidades consumidoras do grupo A. O fator de potência, que mede a relação entre a potência ativa e a potência aparente, é um parâmetro fundamental para o bom funcionamento das instalações. Um fator de potência abaixo de 0,92 é considerado inadequado e pode resultar em cobranças adicionais, de acordo com os horários e as características - indutivas ou capacitivas - do consumo de energia reativa. Essa exigência visa incentivar o uso racional da energia e a redução de perdas elétricas na rede de distribuição (1).

Nesse cenário, a gestão eficiente da energia elétrica nas unidades consumidoras do grupo A envolve diversas estratégias, como a análise estatística da curva de carga, o ajuste da demanda contratada e a correção do fator de potência. Cada uma dessas ações visa não apenas a otimização dos custos, mas também o aumento da confiabilidade operacional e a melhoria da qualidade da energia, uma vez que fatores como interrupções e variações de tensão podem impactar diretamente as operações, causando desde atrasos na produção até danos a equipamentos sensíveis.

Portanto, a implementação de medidas de eficiência energética nas unidades consumidoras do Grupo A não apenas reforça o compromisso com a sustentabilidade, mas também promove maior competitividade econômica ao viabilizar a redução de custos operacionais e o uso racional de recursos. Essas medidas incluem desde a análise criteriosa do perfil de carga até a escolha estratégica das modalidades tarifárias mais adequadas, de forma a potencializar a eficiência no uso da energia elétrica.

Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um software especializado, implementado na linguagem de programação Python e utilizando o

ambiente de desenvolvimento Jupyter Notebook, para a análise detalhada de dados provenientes dos registros de memória de massa de unidades consumidoras. A ferramenta realiza a análise estatística do perfil de consumo e demanda, automatiza o dimensionamento de bancos de capacitores para a correção do fator de potência quando necessário e incorpora um algoritmo genético híbrido para otimizar os contratos de demanda contratada. O objetivo final é oferecer soluções integradas que promovam a minimização dos custos com energia elétrica, contribuindo para um gerenciamento energético mais eficiente e sustentável.

2. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UNIDADES CONSUMIDORAS DO GRUPO A

Engenheiros, gestores de energia e demais profissionais do setor frequentemente necessitam compreender o perfil de consumo e demanda de uma instalação elétrica. Essa análise é essencial para identificar padrões de utilização, avaliar o comportamento do fator de potência, verificar os níveis de tensão de fornecimento e registrar ocorrências, como interrupções ou flutuações. Essas informações são fundamentais para o diagnóstico de problemas e para a implementação de estratégias de eficiência energética.

Uma das abordagens mais utilizadas para obter esses dados é a instalação de analisadores de energia elétrica diretamente na unidade consumidora. Esses dispositivos realizam a análise da qualidade de energia de sistemas elétricos, pois permitem a medição precisa de parâmetros como tensões, correntes, potências (ativa, reativa e aparente) e fator de potência. Além disso, registram energia consumida, distorção harmônica total, desbalanceamento entre fases, flutuações de tensão, interrupções e eventos transitórios. Por meio do monitoramento contínuo e do registro de curvas de carga e demandas, os analisadores de energia facilitam a identificação de anomalias e auxiliam na otimização do consumo e na gestão eficiente da energia elétrica (2).

No entanto, dependendo da complexidade e dos objetivos da análise, uma alternativa prática e eficiente é a solicitação do registro de memória de massa junto à concessionária de energia elétrica responsável pela unidade consumidora. Esse registro, disponibilizado em formato digital mediante solicitação e pagamento, fornece dados detalhados sobre o perfil de consumo, incluindo medições de potência ativa, reativa e aparente, fator de potência (com indicação de sua natureza indutiva ou capacitiva), bem como os horários e dias específicos de cada registro (3).

Comparado ao uso de analisadores de energia, a análise baseada na memória de massa apresenta vantagens significativas em determinadas situações. Enquanto os analisadores demandam custos elevados de aquisição ou aluguel, manutenção, calibração e a instalação in loco por um profissional, os dados de memória de massa podem ser acessados remotamente, eliminando a necessidade de deslocamento e de instalação de equipamentos adicionais. Além disso, esses registros, coletados diretamente pelos medidores da concessionária, oferecem confiabilidade e praticidade para análises detalhadas, consolidando-se como uma alternativa viável e

eficiente para o monitoramento e diagnóstico do consumo energético de unidades consumidoras.

2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MEMÓRIA DE MASSA

A análise estatística da curva de carga de uma unidade consumidora oferece uma visão detalhada sobre o comportamento de consumo ao longo do tempo, fornecendo informações cruciais para a otimização da gestão de energia elétrica. Para indústrias em operação os dados necessários para essa análise são obtidos por meio da solicitação da memória de massa do medidor de energia junto à distribuidora de energia elétrica.

Com esses dados em mãos, é possível realizar um mapeamento detalhado dos padrões de consumo, aplicando técnicas estatísticas como a média e o desvio padrão. A média, denotada por $\bar{x}$, é uma medida de tendência central que representa o valor típico de um conjunto de dados. É calculada dividindo-se a soma de todos os valores pelo número total de elementos, conforme a fórmula:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1}$$

onde x_i representa os valores individuais do conjunto de dados e n é o número total de elementos. No contexto da análise de consumo de energia, a média fornece uma estimativa do consumo médio em um determinado período, permitindo identificar o padrão central de consumo (4).

O desvio padrão, por sua vez, é uma medida de dispersão que quantifica o grau de variação ou espalhamento dos dados em relação à média. Valores mais altos sugerem maior variabilidade, enquanto valores baixos indicam que os dados estão mais próximos da média. Para uma amostra, é calculado pela equação:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \tag{2}$$

Ao somar ou subtrair o desvio padrão à média, é possível traçar uma faixa de variação que ajuda a identificar as flutuações naturais do consumo ao longo do tempo. Essa faixa pode ser usada para detectar anomalias, avaliar o comportamento típico de carga e projetar cenários futuros. No contexto da gestão de energia, essas métricas permitem identificar os períodos de maior e menor consumo, demanda e fator de potência, ao longo do dia, e ainda avaliar este perfil para diferentes dias da semana. Além disso, este “intervalo de confiança” permite diferenciar as flutuações normais de picos anômalos, que podem sinalizar desperdícios de energia ou oportunidades de otimização na carga. Esse tipo de análise é fundamental para identificar os momentos críticos, quando o consumo é mais elevado ou o fator de potência se desvia significativamente, permitindo uma gestão energética mais precisa e eficiente (4, 5).

Essa abordagem também possibilita a segmentação do perfil de consumo com base nos postos tarifários definidos pela ANEEL, no Art 2º da REN 1000. O posto horário ponta refere-se a um período de três horas consecutivas, durante o qual as tarifas têm preços diferenciados, não se aplicando aos sábados, domingos e feriados. Já o posto horário fora de ponta é composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no posto ponta. A análise do perfil de consumo nesses diferentes postos tarifários permite que a unidade consumidora identifique os horários de maior e menor custo, otimizando suas operações para reduzir os gastos (1).

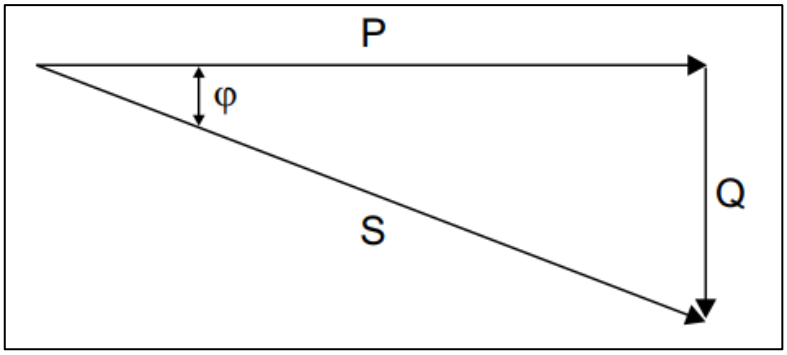
Além disso, a análise estatística facilita a identificação de períodos em que o fator de potência está abaixo do limite regulatório, possibilitando a implementação de medidas corretivas, como o uso de bancos de capacitores, para evitar cobranças adicionais. Essa metodologia de análise da curva de carga, suportada pela média, desvio padrão e pelo intervalo de confiança, possibilita que a unidade consumidora entenda e monitore seu comportamento energético, viabilizando a construção de estratégias que promovam uma operação energeticamente eficiente e financeiramente sustentável.

2.2 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM UNIDADES CONSUMIDORAS DO GRUPO A

O fator de potência (FP) é uma medida crucial para avaliar a eficiência no uso da energia elétrica em sistemas de corrente alternada. Ele reflete a proporção da potência aparente que é efetivamente convertida em trabalho útil, sendo definido

como a razão entre a potência ativa (P), que realiza trabalho, e a potência aparente (S), que representa a totalidade da potência fornecida ao sistema, como ilustrado no triângulo de potências da Figura 1 (6).

Figura 1. Triângulo de Potências.



Fonte: Próprio Autor

Matematicamente, o fator de potência é expresso como:

$$FP = \cos\varphi = \frac{P}{S} = \cos\left(arc\tan\left(\frac{Q}{P}\right)\right) \quad (3)$$

Onde P é a potência ativa (em watts, W), S é a potência aparente (em volt-amperes, VA), Q é a potência reativa (em quilovolt-amperes reativos, kVAr), e φ é o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão. O valor do fator de potência pode variar de 0 a 1. Quando o FP é igual a 1, toda a potência aparente é convertida em trabalho útil, caracterizando um sistema altamente eficiente. Valores inferiores a 1 indicam que uma parte significativa da potência fornecida é reativa e não realiza trabalho útil (6).

A potência reativa é necessária para gerar os campos magnéticos e elétricos que possibilitam o funcionamento de dispositivos como motores e transformadores, mas não é convertida em trabalho útil. Já a potência aparente combina tanto a potência ativa quanto a reativa, e sua magnitude pode ser calculada pela equação:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

A energia reativa pode ser classificada como indutiva ou capacitiva, dependendo do tipo de carga presente no sistema. A energia reativa indutiva é consumida por dispositivos como motores de indução, transformadores e reatores,

enquanto a energia reativa capacitiva é fornecida por equipamentos como bancos de capacitores e motores ou geradores síncronos sobrexcitados, que ajudam a equilibrar a energia reativa no sistema (6, 7).

Quando o fator de potência é baixo, isso indica que uma parte significativa da energia fornecida ao sistema é consumida como energia reativa, que não realiza trabalho útil. Esse consumo excessivo pode levar a problemas como sobrecarga nas linhas de transmissão e transformadores, aumento das perdas elétricas, quedas de tensão e comprometimento da qualidade da energia. Além disso, a infraestrutura elétrica precisa ser dimensionada para suportar essa carga adicional, o que eleva os custos operacionais. Em resumo, um valor elevado de fator de potência indica uma conversão mais eficiente da energia, enquanto um valor baixo reflete um uso ineficiente da energia elétrica, afetando o desempenho e aumentando os custos do sistema (7).

2.2.1 EXIGÊNCIAS REGULATÓRIAS SOBRE O FATOR DE POTÊNCIA EM UNIDADES CONSUMIDORAS DO GRUPO A

O fator de potência é uma variável essencial para o bom funcionamento do sistema elétrico, especialmente em unidades consumidoras do grupo A, que possuem um alto consumo de energia elétrica. A energia reativa, embora necessária para o funcionamento de diversos equipamentos, quando em excesso, pode provocar uma série de problemas técnicos e financeiros para o sistema elétrico e para os próprios consumidores.

Conforme estabelecido pela ANEEL e detalhado no Procedimento de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), a regulamentação exige que o fator de potência no ponto de conexão, indutivo ou capacitivo, esteja acima do limite mínimo permitido de 0,92 para a unidade consumidora do grupo A. Caso esse valor seja inferior, a unidade está sujeita à cobrança adicional de energia reativa excedente e pode ser multada pela concessionária de energia elétrica (1, 8).

A avaliação do fator de potência ocorre de maneira horária, com medição durante dois períodos distintos do dia. No período noturno, que vai de 23h30 a 6h30, o fator de potência deve ser mantido acima de 0,92 capacitivo, enquanto que, no período diurno, o fator de potência deve ser superior a 0,92 indutivo. A não conformidade com essas exigências resulta em multas para as unidades que não mantiverem o fator de potência dentro dos limites estipulados. Além disso, a correção

do fator de potência torna-se uma necessidade, já que, além das penalizações, um fator de potência baixo acarreta aumento nas perdas elétricas e na fatura de energia, uma vez que a energia reativa não realiza trabalho útil (1).

A técnica mais utilizada para elevar o fator de potência é a instalação de bancos de capacitores, que ajudam a compensar a energia reativa indutiva de forma local, evitando o pagamento do consumo de energia reativa excedente. Além disso, a redução do fator de potência impacta diretamente a qualidade da energia fornecida, podendo provocar problemas como aquecimento excessivo de condutores, quedas de tensão e flutuações na rede elétrica, o que compromete o desempenho da infraestrutura elétrica e aumenta os custos operacionais (9).

Portanto, o cumprimento das exigências regulatórias do fator de potência é fundamental para a eficiência energética e para evitar custos adicionais com energia reativa excedente e multas. A gestão adequada do fator de potência contribui para a sustentabilidade do sistema elétrico, garantindo maior qualidade de energia, menores perdas e redução de custos operacionais.

2.2.2 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA VIA BANCO DE CAPACITORES

A correção do fator de potência é uma prática essencial para garantir o uso eficiente da energia elétrica e atender às exigências regulatórias, evitando custos adicionais e penalidades impostas pelas distribuidoras. Além de atender às normas, a correção melhora a eficiência operacional da instalação, pois permite melhor utilização da capacidade de transformadores, cabos e outros componentes do sistema elétrico, ao mesmo tempo em que reduz perdas e aumenta a qualidade da energia fornecida às cargas (10).

Uma das soluções mais econômicas e amplamente utilizadas para a correção do fator de potência é a instalação de bancos de capacitores. Esses dispositivos são fundamentais em instalações industriais e comerciais, pois fornecem a potência reativa necessária para compensar o consumo de energia pelos equipamentos indutivos, como motores e transformadores. Os bancos de capacitores são preferidos principalmente por seu baixo custo de manutenção e pela eficiência na redução das perdas elétricas, além de contribuírem para a melhoria da produtividade e da capacidade de operação do sistema (6, 11).

Existem duas principais abordagens para a implementação de bancos de capacitores: a operação fixa e a operação automática. Os capacitores de operação

fixa são aplicados quando a carga da instalação não sofre grandes variações ao longo do tempo. Este tipo de banco de capacitores é adequado para instalações em que a demanda de energia reativa é constante ou previsível, permitindo o fornecimento de uma potência capacitiva de base correspondente à demanda mínima da instalação (12).

Quando há variações significativas na carga ao longo do dia ou quando é necessário manter o fator de potência dentro de uma faixa estreita de variação, a instalação de bancos de capacitores automáticos é a solução mais indicada. Estes bancos de capacitores são controlados por um controlador automático de fator de potência, ajustando a energia reativa capacitiva fornecida conforme a demanda de energia reativa da instalação. A utilização de capacitores automáticos permite uma correção dinâmica e eficiente do fator de potência, adaptando-se rapidamente às flutuações na carga reativa e mantendo o fator de potência dentro dos limites exigidos pela legislação (12).

Em ambos os casos, o uso de bancos de capacitores resulta na redução de custos com a energia elétrica, ao minimizar o consumo de energia reativa e garantir que o sistema opere de forma mais eficiente, com o fator de potência próximo de 1. Além disso, a instalação desses dispositivos contribui para a melhoria da qualidade da energia, aumentando a capacidade dos sistemas e diminuindo as perdas elétricas, o que resulta em economia nos investimentos em infraestrutura (11).

Para a correção do fator de potência em sistemas elétricos, o dimensionamento correto do banco de capacitores é fundamental para garantir que o sistema atenda às exigências regulatórias e operacionais. A potência reativa capacitiva necessária que o banco precisa fornecer é calculada com base na diferença entre a potência reativa antes e após a correção, utilizando a potência ativa como referência (10):

$$Q_C = Q_1 - P \cdot \tan\theta_2$$

$$Q_C = P \cdot \tan\theta_1 - P \cdot \tan\theta_2$$

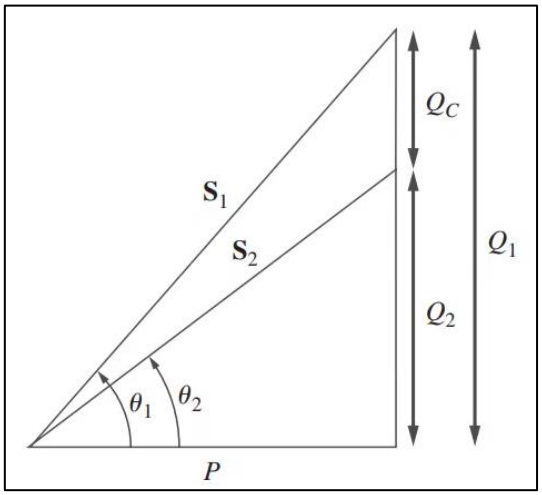
$$Q_C = P \cdot [\tan(arc\cos FP_1) - \tan(arc\cos FP_2)] \quad (5)$$

Sendo:

- Q_C é a potência reativa capacitiva necessária que o banco de capacitores precisa fornecer, em kVAr;
- P é a potência ativa demandada pela carga, em kW;
- Q_1 é a potência reativa demandada pela carga antes da correção, em kVAr;
- θ_1 é o ângulo do fator de potência antes da correção;
- θ_2 é o ângulo do fator de potência desejado após a correção;
- FP_1 e FP_2 são os valores do fator de potência antes e após a correção, respectivamente.

Na Figura 2 é destacada a alteração no ângulo de defasagem da carga com a introdução da potência reativa capacitiva para corrigir o fator de potência. Ao ajustar a potência capacitiva injetada no sistema, os cálculos visam reduzir as perdas associadas à potência reativa indutiva e otimizar o uso da energia, além de atender aos requisitos normativos estabelecidos pelas distribuidoras.

Figura 2. Correção do fator de potência via banco de capacitores.



Fonte: [13]

2.3 GESTÃO DE MODALIDADES TARIFÁRIAS E AJUSTE DE DEMANDA CONTRATADA

A gestão de modalidades tarifárias é uma estratégia crucial para a redução de custos com energia elétrica nas unidades consumidoras do grupo A. Entre as diversas abordagens que podem ser adotadas, a gestão de modalidades tarifárias e o ajuste da demanda contratada destacam-se como práticas com alto potencial de economia e fácil implementação, exigindo apenas ajustes contratuais com a distribuidora. A modalidade tarifária refere-se à forma como a energia consumida é calculada e

cobrada, levando em consideração fatores como o horário de consumo e os níveis de demanda (3).

No Brasil, conforme a Resolução Normativa nº 1.000 da ANEEL, as unidades consumidoras do grupo A podem optar entre duas modalidades tarifárias principais: a modalidade tarifária horo-sazonal verde e a modalidade tarifária horo-sazonal azul.

A modalidade Horo-Sazonal Verde, possui uma estrutura tarifária simplificada, caracterizada por:

1. Uma única tarifa para a demanda, sem segmentação horária;
2. Uma tarifa para o consumo de energia elétrica no posto tarifário de ponta; e
3. Uma tarifa distinta para o consumo de energia elétrica no posto tarifário fora de ponta (Art. 213, ANEEL, 2021).

A modalidade Horo-Sazonal Azul, por sua vez, é caracterizada por:

1. Uma tarifa para a demanda durante o posto tarifário de ponta;
2. Uma tarifa para a demanda durante o posto tarifário fora de ponta;
3. Uma tarifa para o consumo de energia elétrica durante o posto tarifário de ponta; e
4. Uma tarifa distinta para o consumo de energia elétrica durante o posto tarifário fora de ponta. (Art. 214, ANEEL, 2021).

A implementação eficaz de uma modalidade tarifária envolve a análise cuidadosa do perfil de consumo da unidade consumidora e a adequação da demanda contratada às necessidades reais da instalação. Muitas vezes, as unidades consumidoras possuem perfis de consumo que variam ao longo do dia, com períodos de pico e momentos de menor demanda. Ao escolher a modalidade tarifária mais adequada e ajustar a demanda contratada, a unidade consumidora não só otimiza seus custos com energia elétrica, mas também contribui para uma operação mais eficiente e sustentável (3).

Portanto, a gestão de modalidades tarifárias é essencial para alcançar um cenário de custo mínimo, tratando-se de um problema de otimização que visa equilibrar o consumo energético com as necessidades da unidade consumidora. Essa prática incentiva o consumo eficiente e a estabilidade do sistema elétrico, ao mesmo tempo em que reduz os custos operacionais da instalação.

3. TÉCNICA DE SOLUÇÃO E PLATAFORMA COMPUTACIONAL UTILIZADAS PARA A ANÁLISE E GESTÃO ENERGÉTICA

A computação evolutiva é uma área da inteligência computacional que utiliza processos inspirados na biologia evolutiva para resolver problemas complexos de otimização. Dentre as técnicas mais conhecidas, os Algoritmos Genéticos (AGs) se destacam devido à sua eficácia na exploração de grandes espaços de soluções, sendo capazes de encontrar soluções ótimas ou satisfatórias para problemas difíceis de resolver com métodos tradicionais. Esses algoritmos simulam processos naturais, como a seleção natural, a mutação e a recombinação genética, através de um processo iterativo que permite otimizar uma solução ao longo de várias gerações.

Os algoritmos genéticos são amplamente aplicados a uma vasta gama de problemas, desde a otimização de parâmetros em modelos de aprendizado de máquina até desafios em áreas como engenharia e sistemas de controle. Eles se caracterizam pela utilização de operadores evolutivos, como a seleção, o crossover e a mutação, para explorar soluções complexas e refinar resultados de maneira eficiente. Este processo evolutivo oferece uma abordagem robusta para a busca e otimização, especialmente em problemas onde soluções tradicionais são ineficazes ou inviáveis (14, 15).

3.1 FUNÇÃO OBJETIVO E *FITNESS*

A função objetivo é um elemento essencial em algoritmos genéticos, pois define o critério pelo qual as soluções serão avaliadas. Ela atribui a cada cromossomo da população um valor que reflete a qualidade de sua solução. Esse valor é então usado para calcular o fitness, ou aptidão, de cada cromossomo. O fitness é uma medida de quão bem a solução representada pelo cromossomo resolve o problema. Soluções com maior fitness têm uma maior chance de serem selecionadas para reprodução, garantindo que as melhores soluções sejam propagadas para as gerações subsequentes (15).

3.2 POPULAÇÃO E CROMOSSOMO

Em algoritmos genéticos, a solução para o problema é representada por um cromossomo, que contém as informações necessárias para formar uma solução. A

população é o conjunto de cromossomos existentes em uma geração, e cada cromossomo tem um valor de fitness associado. A população evolui por meio da aplicação de operadores genéticos, como crossover e mutação, e ao longo das gerações, os cromossomos com maior fitness têm uma probabilidade maior de se reproduzir, levando à evolução das soluções. A diversidade genética dentro da população é importante para a eficácia do algoritmo, pois garante que diferentes regiões do espaço de soluções sejam exploradas (14).

3.3 CODIFICAÇÃO REAL

A codificação real é uma técnica em que os cromossomos são representados por valores reais, em vez de binários. Essa abordagem é especialmente útil em problemas de otimização contínua, onde as variáveis envolvidas têm intervalos contínuos e a precisão é crucial. A codificação real permite que os algoritmos genéticos manipulem diretamente valores numéricos de forma mais eficaz, tornando-os mais adequados para resolver problemas que exigem alta precisão ou que envolvem parâmetros variáveis contínuos (16).

3.4 OPERADORES GENÉTICOS

Os operadores genéticos são mecanismos que geram novos cromossomos a partir dos existentes, mimetizando os processos biológicos de evolução. Os principais operadores genéticos são o crossover e a mutação. Cada um desses operadores desempenha um papel importante no processo evolutivo, contribuindo para a melhoria contínua da população.

3.5 *CROSSOVER*

O crossover é o operador que simula a reprodução sexuada. Ele combina dois cromossomos (pais) para gerar um ou mais descendentes, trocando segmentos dos cromossomos dos pais. O objetivo do crossover é explorar o espaço de soluções, combinando as melhores características dos pais para criar descendentes que podem ter uma performance superior. A taxa de crossover define a probabilidade de que o crossover ocorra entre dois cromossomos. Em geral, a taxa de crossover é ajustada

para valores entre 60% e 90%, com o intuito de promover uma exploração eficiente do espaço de soluções sem comprometer a convergência do algoritmo para uma solução ótima (14).

3.6 MUTAÇÃO

A mutação é o operador que introduz variação aleatória nos cromossomos. Durante o processo de mutação, um ou mais genes de um cromossomo são alterados aleatoriamente, o que permite que o algoritmo explore novas regiões do espaço de soluções. A taxa de mutação define a probabilidade de que ocorra uma mutação em um cromossomo. Uma taxa de mutação muito alta pode tornar o algoritmo aleatório e ineficiente, enquanto uma taxa muito baixa pode fazer com que o algoritmo se estagne em ótimos locais. Em geral, a taxa de mutação é mantida baixa, para equilibrar a exploração eficiente do espaço de soluções. A mutação uniforme é uma técnica específica onde qualquer gene do cromossomo pode ser alterado para qualquer valor dentro de um intervalo, com a mesma probabilidade, permitindo uma exploração mais ampla e robusta das soluções (14).

3.7 SELEÇÃO

A seleção é o processo de escolher os indivíduos mais aptos da população para gerar a próxima geração. Existem várias estratégias de seleção, sendo a seleção por torneio uma das mais populares. Na seleção por torneio, um número fixo de indivíduos é escolhido aleatoriamente da população, e o indivíduo mais apto entre os selecionados é escolhido para se reproduzir. Essa técnica é simples, eficiente e tem uma boa pressão seletiva, permitindo que os indivíduos mais adaptados ao ambiente de busca sejam favorecidos. A seleção por torneio também pode ser aplicada em diferentes tamanhos de torneios, o que afeta a intensidade da seleção e a diversidade genética da população (15).

3.8 ELITISMO

O elitismo é uma técnica que garante que os melhores indivíduos da geração sejam preservados e passados diretamente para a próxima geração, sem sofrerem a ação dos operadores de crossover e mutação. Isso assegura que as melhores

soluções encontradas até o momento não sejam perdidas e melhora a taxa de convergência do algoritmo, acelerando a busca pela solução ótima. O elitismo é especialmente útil em cenários onde é importante manter as soluções mais promissoras enquanto o algoritmo continua sua evolução (15).

3.9 HIBRIDIZAÇÃO NOS ALGORITMOS GENÉTICOS

A hibridização dos algoritmos genéticos é uma abordagem que combina os algoritmos genéticos com outras técnicas de otimização, com o objetivo de melhorar o desempenho do processo de busca e acelerar a convergência para soluções ótimas. Essa combinação busca tirar proveito dos pontos fortes das diferentes abordagens, superando as limitações que podem surgir quando os algoritmos genéticos são usados isoladamente. A hibridização pode ocorrer de várias maneiras, envolvendo a integração de algoritmos clássicos de otimização, como o gradiente descendente, técnicas de busca local, algoritmos de otimização por enxame de partículas (PSO) e métodos baseados em redes neurais (17).

A hibridização dos algoritmos genéticos com algoritmos de busca na vizinhança é uma abordagem eficaz para melhorar o desempenho e a qualidade das soluções em problemas de otimização complexos. Essa técnica combina a capacidade de exploração global dos algoritmos genéticos com a eficiência da busca local para refinar as soluções encontradas. Enquanto os algoritmos genéticos são excelentes na exploração de grandes espaços de soluções, a busca na vizinhança é eficaz para ajustar pequenas modificações em uma solução, resultando em uma melhoria contínua e mais precisa.

A busca na vizinhança é um método de otimização local em que pequenas alterações são feitas em uma solução existente para gerar novas soluções, chamadas de "vizinhas". O objetivo da busca é melhorar a solução corrente, movendo-se em direção a uma solução de melhor qualidade. Esse processo envolve explorar as soluções próximas de maneira eficiente, sem a necessidade de uma busca exaustiva pelo espaço total de soluções. Após os algoritmos genéticos gerarem soluções potenciais através de operadores como crossover e mutação, a busca na vizinhança é aplicada para refinar essas soluções, otimizando-as ainda mais.

A vantagem principal da busca na vizinhança é sua capacidade de realizar ajustes finos, permitindo que soluções quase ótimas se tornem realmente ótimas ou mais próximas da melhor solução possível (17).

3.10 A LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON

A linguagem de programação Python foi criada em 1991 por Guido van Rossum e é amplamente reconhecida por sua simplicidade, flexibilidade e aplicabilidade em uma vasta gama de disciplinas, incluindo ciência de dados, automação e engenharia. Trata-se de uma linguagem interpretada, de alto nível e multiparadigma, que combina elementos de programação estruturada, funcional e orientada a objetos. Essa versatilidade permite a implementação de soluções computacionais de forma eficiente, com menor complexidade em comparação a linguagens tradicionais, como C++ e Java.

A sintaxe do Python foi projetada para maximizar a legibilidade do código, o que o torna uma escolha ideal tanto para iniciantes quanto para profissionais experientes. Um de seus diferenciais é a utilização de indentação para delimitar blocos de código, eliminando a necessidade de símbolos adicionais, como chaves ou comandos explícitos de fim de linha. Essa característica não apenas promove um código mais limpo, mas também reduz significativamente os erros de formatação, favorecendo o desenvolvimento colaborativo e a manutenção de projetos complexos. (18).

Python é uma linguagem interpretada, o que significa que seu código é executado diretamente por um interpretador, dispensando etapas de compilação. Isso proporciona ciclos de desenvolvimento rápidos e simplifica o processo de depuração. Além disso, a portabilidade do Python permite que scripts sejam executados em múltiplas plataformas, como Windows, macOS e Linux, sem a necessidade de alterações significativas, uma característica fundamental em sistemas heterogêneos.

Outro aspecto que fortalece o Python é o vasto ecossistema de bibliotecas e frameworks disponíveis, projetados para atender necessidades específicas em diferentes campos do conhecimento. No contexto da engenharia e eficiência energética, destacam-se bibliotecas como Pandas e NumPy para manipulação de dados; Matplotlib e Seaborn para visualização gráfica; e SciPy para cálculos científicos e algoritmos de otimização. Essas ferramentas tornam o Python particularmente adequado para a análise estatística de dados e o desenvolvimento de soluções de engenharia orientadas à eficiência energética (19).

A ampla comunidade de desenvolvedores Python desempenha um papel crucial na manutenção e evolução contínua da linguagem. A documentação extensa, aliada à presença em fóruns especializados e plataformas como GitHub e Stack Overflow, facilita o aprendizado, promove a resolução de problemas complexos e incentiva inovações tecnológicas. Essa base sólida de suporte técnico é um dos motivos pelos quais o Python é frequentemente escolhido para projetos acadêmicos e industriais.

No campo da engenharia e gestão de energia, Python é utilizado como uma ferramenta essencial para modelagem e análise de sistemas elétricos, cálculo de demandas energéticas e desenvolvimento de algoritmos de otimização. A integração com ambientes interativos, como o Jupyter Notebook, potencializa sua aplicabilidade ao permitir a execução célula a célula de códigos e a geração de gráficos e relatórios em tempo real. Essa abordagem torna o Python uma plataforma poderosa para explorar e interpretar dados complexos, além de comunicar resultados de maneira clara e visualmente impactante (20).

Portanto, a combinação de simplicidade, eficiência e uma infraestrutura tecnológica robusta faz do Python uma escolha preferencial para a solução de problemas técnicos em áreas diversas, incluindo a engenharia. Sua capacidade de integrar análises estatísticas, visualizações avançadas e algoritmos de otimização, aliados ao suporte contínuo da comunidade e à adaptabilidade em múltiplos contextos, demonstra sua relevância como uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de soluções avançadas e eficientes.

3.11 A DISTRIBUIÇÃO ANACONDA E O AMBIENTE JUPYTER NOTEBOOK

O Anaconda é uma distribuição open-source amplamente utilizada para a análise de dados, aprendizado de máquina e computação científica. Desenvolvido pela Anaconda Inc., ele oferece um ambiente integrado que combina facilidade de uso, uma vasta gama de bibliotecas e ferramentas, além de uma gestão eficiente de pacotes e dependências. Voltado especialmente para linguagens como Python e R, o Anaconda facilita o desenvolvimento e a execução de aplicações complexas, tornando-se uma escolha comum para profissionais e acadêmicos que trabalham com grandes volumes de dados ou algoritmos computacionalmente intensivos (21).

Uma das características mais notáveis do Anaconda é o Conda, seu gerenciador de pacotes e ambientes. Com ele é possível instalar, atualizar e gerenciar bibliotecas e dependências de forma simplificada, sem conflitos entre versões de pacotes. Além disso, o Conda permite a criação de ambientes virtuais isolados, garantindo que projetos diferentes possam utilizar configurações específicas sem interferências mútuas, um aspecto essencial em projetos de pesquisa e engenharia (19).

O Jupyter Notebook, incluído no pacote Anaconda, é uma aplicação web interativa que permite a execução célula a célula de código em diversos idiomas de programação, sendo Python o mais amplamente suportado. Cada célula pode conter código, texto formatado em Markdown, equações matemáticas em LaTeX ou gráficos, tornando-o uma ferramenta poderosa para exploração, análise e comunicação de dados. Além disso, o Jupyter permite documentar todo o processo computacional de forma estruturada e visualmente clara, integrando análise técnica e relatórios em um único ambiente (20).

Uma das funcionalidades que destacam o Jupyter Notebook é a sua capacidade de visualização de dados. Por meio de bibliotecas como *Matplotlib* é possível criar gráficos interativos e intuitivos que facilitam a interpretação de resultados. No contexto de engenharia, isso é particularmente útil para a apresentação de perfis de carga, consumo de energia, variação de demanda e outros parâmetros críticos.

O Jupyter também suporta a execução de algoritmos complexos, incluindo simulações numéricas e modelos preditivos, com integração direta a bibliotecas de aprendizado de máquina, como TensorFlow e Scikit-learn. Essa versatilidade torna o Jupyter uma escolha natural para projetos que combinam análise estatística, otimização e machine learning (20).

Além disso, a capacidade do Jupyter de exportar os notebooks para diversos formatos, como HTML, PDF e slides, facilita a disseminação de resultados. Esse recurso é amplamente utilizado em apresentações acadêmicas e relatórios técnicos, permitindo que todo o fluxo de trabalho seja replicável e auditável.

Por fim, a combinação do Anaconda com o Jupyter Notebook oferece um ecossistema integrado e robusto que atende às demandas de projetos modernos de

análise de dados. No campo da engenharia elétrica, essa infraestrutura é fundamental para modelar sistemas, analisar dados de memória de massa de unidades consumidoras e propor soluções de otimização tarifária ou correção de fatores de potência. A capacidade de integrar dados, algoritmos e visualizações em um único ambiente acelera o processo de tomada de decisão técnica e garante maior eficiência no desenvolvimento de soluções computacionais (20).

4. METODOLOGIA

Para garantir a confiabilidade e a precisão do software proposto, assegurando sua aplicabilidade como uma ferramenta de engenharia, foi solicitado às concessionárias de energia elétrica CEMIG e CPFL Piratininga o fornecimento das memórias de massa de duas unidades consumidoras. Estes dados serviram como base para as simulações realizadas pelo software, permitindo avaliar seu desempenho e validar suas funcionalidades.

O desenvolvimento do protótipo do software foi inteiramente realizado em *scripts* Python, uma linguagem de programação interpretada amplamente reconhecida por sua versatilidade em análise de dados. O ambiente de desenvolvimento adotado foi o Jupyter Notebook, pertencente ao pacote Anaconda, que oferece um ambiente interativo adequado para experimentação e visualização de resultados.

O fluxo operacional do software é estruturado em diversas etapas. Inicialmente, as memórias de massa adquiridas, fornecidas pelas concessionárias no formato *Excel*, são importadas para o sistema. Esses dados passam por um processo de tratamento, no qual inconsistências são corrigidas, e as informações relevantes são organizadas para análise.

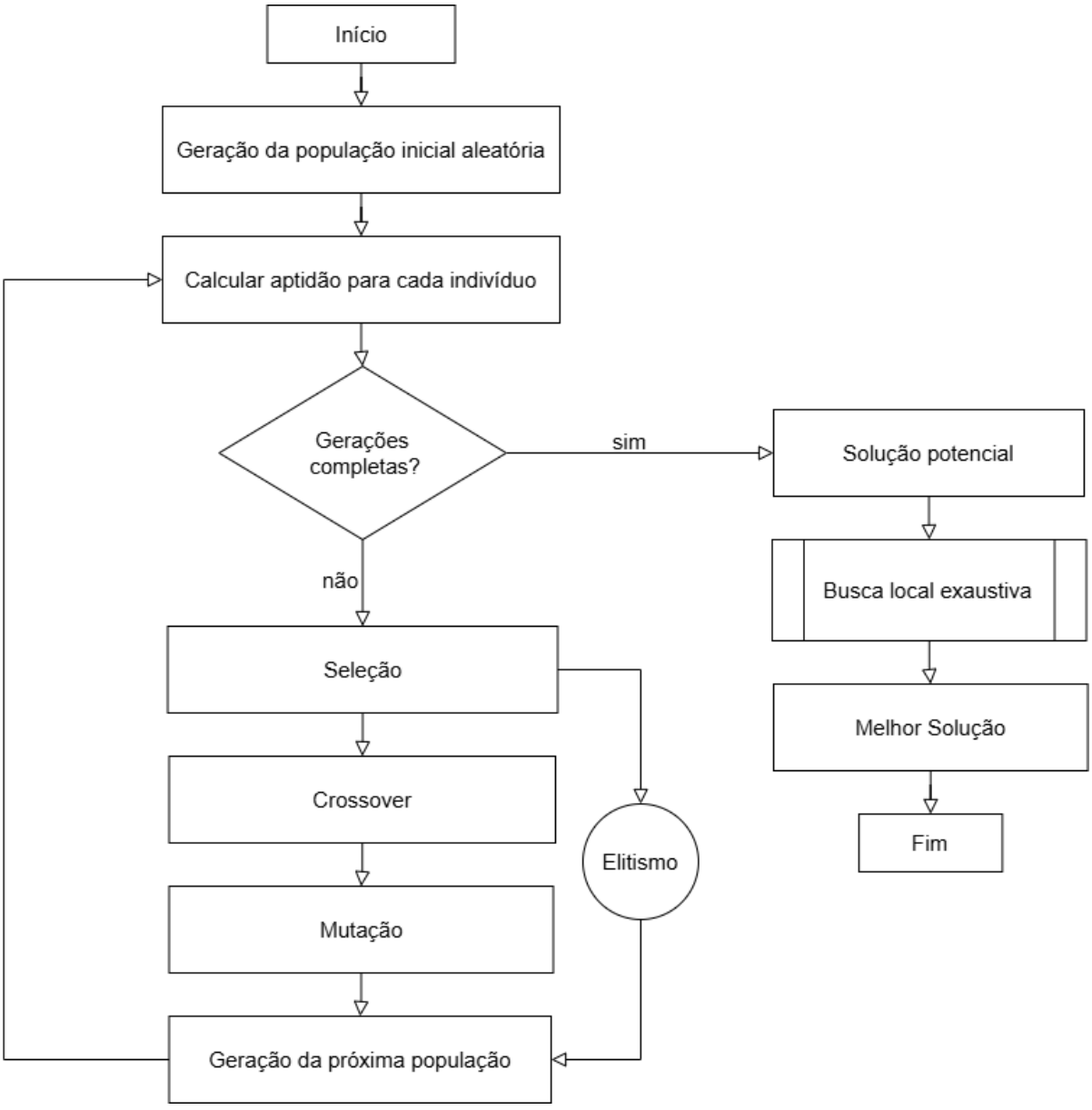
Na sequência, o *software* realiza uma análise estatística detalhada do perfil de demanda e consumo das instalações analisadas. Os resultados são apresentados por meio de tabelas e gráficos que destacam características típicas dos padrões de consumo.

Outro aspecto relevante do software é sua capacidade de diagnosticar a necessidade de correção do fator de potência da instalação, com base nos dados analisados. Para tal, ele implementa rotinas automatizadas que dimensionam bancos de capacitores em duas configurações: um banco fixo e outro com controle chaveado. O dimensionamento considera os requisitos técnicos e operacionais definidos pelo usuário. Os resultados dessa etapa são apresentados em gráficos e relatórios que indicam se os bancos projetados atendem aos critérios de desempenho e eficiência.

Além disso, o sistema incorpora um algoritmo de otimização evolutivo, projetado para identificar o contrato de demanda e a modalidade tarifária mais

vantajosa para a unidade consumidora. Esse processo visa minimizar o custo global relacionados à fatura de energia elétrica. A figura 3 ilustra o fluxograma simplificado da operação do algoritmo genético híbrido.

Figura 3. Fluxograma simplificado do algoritmo genético híbrido.



Fonte: Próprio Autor.

Inicialmente, o algoritmo gera uma população de indivíduos aleatórios, dentro de um intervalo determinado, onde cada indivíduo representa um contrato de demanda. Esses indivíduos iniciais representam candidatos a uma solução ótima e são avaliadas com base em sua performance na função objetivo, que mede a qualidade de cada solução.

A cada geração, o algoritmo seleciona os melhores candidatos para formar uma nova população. Isso é feito por meio de um processo de seleção, no qual os melhores indivíduos são escolhidos para produzir a próxima geração. Em seguida, os candidatos selecionados passam por um processo de recombinação, onde suas características são combinadas para criar novas soluções. Esse processo, conhecido como crossover, mistura os parâmetros dos indivíduos selecionados, gerando novos indivíduos que podem ter características favoráveis de ambos os pais. A probabilidade de ocorrer o crossover é controlada por um parâmetro, que define a chance de dois indivíduos se combinarem. Se o valor gerado aleatoriamente for menor que esse parâmetro, o crossover é realizado; caso contrário, os indivíduos permanecem inalterados.

Além disso, uma parte da nova população passa por mutação, onde os parâmetros dos indivíduos são ligeiramente alterados de forma aleatória. Isso ajuda a evitar que o algoritmo fique preso em soluções subótimas, permitindo que novas áreas do espaço de soluções sejam exploradas. A probabilidade de mutação é controlada por um parâmetro, garantindo que a diversidade genética da população seja mantida.

Outro aspecto importante do código é o uso de elitismo, onde os melhores indivíduos de uma geração são preservados intactos e incorporados diretamente à próxima geração, sem passar pelas etapas de crossover ou mutação. A quantidade de indivíduos que formam a elite é definida por um parâmetro, garantindo que as melhores soluções encontradas não sejam descartadas, mas transmitidas para as gerações subsequentes. Esse elitismo assegura que a qualidade da população não se deteriore, favorecendo uma evolução contínua em direção à solução ótima.

O processo de seleção, recombinação, mutação e elitismo é repetido ao longo de várias gerações, permitindo que a população evolua progressivamente em direção a soluções cada vez mais eficientes. Ao final do número predefinido de gerações, o algoritmo retorna uma solução potencial, que se encontra em uma região do espaço de busca muito próxima da melhor solução. Para refinar ainda mais esse resultado, o algoritmo utiliza a solução potencial obtida como ponto de partida em um segundo estágio. Nesse estágio, realiza-se uma busca local exaustiva, com base em um parâmetro pré-definido, ao redor da solução potencial encontrada, analisando as opções até encontrar a melhor solução.

A validação das análises foi conduzida comparando os resultados do software com os cenários conhecidos de contratos otimizados, assegurando a coerência e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Essa metodologia robusta permite que o software seja utilizado como uma ferramenta confiável para análise e gestão de energia, atendendo às exigências técnicas de instalações do grupo A e promovendo decisões fundamentadas para otimização de custos e desempenho energético.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, os resultados, e os respectivos comentários, advindos da execução do software.

5.1 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS REGISTROS DA MEMÓRIA DE MASSA

Primeiramente, em todas as análises apresentadas, a primeira etapa realizada pelo software consiste na importação dos dados armazenados na memória de massa. Como exemplo, a seguir, é exibido um registro extraído da memória de massa de uma das unidades consumidoras analisadas, disponibilizado em formato Excel (.xlsx) pela concessionária de energia elétrica CEMIG.

Figura 4. Exemplo de memória de massa de uma unidade consumidora conectada à rede elétrica da CEMIG.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	**Relatório de Memória de Massa**									
2	Descrição: **XXXXXXXXXXXX**									
3	Ponto de medição: XXXXXXX			Data da emissão: 22/03/2013 - 08:22						
4	Medidor: XXXXXXX			Data de leitura: 15/03/2013 - 00:00						
5	Data inicial: 15/02/2013 - 00:15			Data final: 15/03/2013 - 00:00						
6	Horário de ponta: 17:00 - 20:00			Demanda contratada: **1600 kW**						
7	**REG**	**Data do Registro**	**Hora do Registro**	**kW**	**kvar_Ind**	**kvar_Cap**	**Fator de Potência**	**Posto Horário**		
8	1	15/02/2013	0:15	514,08	173,04	0	0,95	Fora Ponta		
9	2	15/02/2013	0:30	517,43	174,72	0	0,95	Fora Ponta		
10	3	15/02/2013	0:45	512,40	179,76	0	0,94	Fora Ponta		
11	4	15/02/2013	1:00	509,04	174,72	0	0,95	Fora Ponta		
12	5	15/02/2013	1:15	500,64	169,67	0	0,95	Fora Ponta		
13	6	15/02/2013	1:30	493,92	162,96	0	0,95	Fora Ponta		
14	7	15/02/2013	1:45	498,96	159,60	0	0,95	Fora Ponta		
15	8	15/02/2013	2:00	495,59	162,96	0	0,95	Fora Ponta		
16	9	15/02/2013	2:15	492,23	166,32	0	0,95	Fora Ponta		
17	10	15/02/2013	2:30	492,23	171,36	0	0,94	Fora Ponta		
18	11	15/02/2013	2:45	488,88	166,32	0	0,95	Fora Ponta		
19	12	15/02/2013	3:00	488,87	166,32	0	0,95	Fora Ponta		
20	13	15/02/2013	3:15	480,48	157,92	0	0,95	Fora Ponta		
21	14	15/02/2013	3:30	483,84	157,92	0	0,95	Fora Ponta		
22	15	15/02/2013	3:45	485,52	161,28	0	0,95	Fora Ponta		
23	16	15/02/2013	4:00	488,87	161,28	0	0,95	Fora Ponta		
24	17	15/02/2013	4:15	493,92	164,64	0	0,95	Fora Ponta		
25	18	15/02/2013	4:30	505,68	171,36	0	0,95	Fora Ponta		
26	19	15/02/2013	4:45	512,40	178,08	0	0,94	Fora Ponta		
27	20	15/02/2013	5:00	524,16	181,43	0	0,94	Fora Ponta		
28	21	15/02/2013	5:15	544,32	184,79	0	0,95	Fora Ponta		

Fonte: Próprio Autor

O software, utilizando bibliotecas específicas para análise de dados, importa essa base no formato .xlsx e realiza um processo de tratamento prévio das informações. Esse tratamento organiza os dados em um formato adequado para

análises subsequentes, além de calcular parâmetros adicionais a partir das informações fornecidas. Entre as operações realizadas nesta etapa, destacam-se:

- Identificação do dia da semana correspondente a cada intervalo de 15 minutos registrado na base de dados;
- Cálculo da potência aparente, em kVA, para cada intervalo;
- Determinação do consumo energético, em kWh, a partir das medições fornecidas;
- Unificação das colunas relacionadas à potência reativa;
- Cálculo do ângulo do fator de potência, permitindo a caracterização da carga como indutiva (ângulo positivo) ou capacitiva (ângulo negativo).

Essas operações são fundamentais para preparar os dados de forma eficiente, garantindo a precisão e a integridade das análises. Abaixo, uma interface ilustrativa do software em operação durante a etapa de processamento de dados.

Figura 5. Dados da memória de massa importados e tratados pelo software.

data	posto_horario	dia	kva	kw	kvar	kwh	fp	angulo_fp
2013-02-15 00:15:00	Fora Ponta	sexta-feira	542.421504	514.08	173.04	128.5200	0.947750	18.603300
2013-02-15 00:30:00	Fora Ponta	sexta-feira	546.132661	517.43	174.72	129.3575	0.947444	18.658224
2013-02-15 00:45:00	Fora Ponta	sexta-feira	543.016959	512.40	179.76	128.1000	0.943617	19.331874
2013-02-15 01:00:00	Fora Ponta	sexta-feira	538.190301	509.04	174.72	127.2600	0.945836	18.943980
2013-02-15 01:15:00	Fora Ponta	sexta-feira	528.609798	500.64	169.67	125.1600	0.947088	18.721838
...	...	...	...	...	...	...	...	...
2013-03-14 23:00:00	Fora Ponta	quinta-feira	655.798496	616.56	223.44	154.1400	0.940167	19.920406
2013-03-14 23:15:00	Fora Ponta	quinta-feira	640.608365	599.75	225.12	149.9375	0.936219	20.573946
2013-03-14 23:30:00	Fora Ponta	quinta-feira	609.360803	569.52	216.72	142.3800	0.934619	20.833370
2013-03-14 23:45:00	Fora Ponta	quinta-feira	599.345739	559.44	215.04	139.8600	0.933418	21.025980
2013-03-15 00:00:00	Fora Ponta	sexta-feira	590.295918	551.04	211.67	137.7600	0.933498	21.013190

2688 rows × 8 columns

Fonte: Próprio Autor

O software permite a visualização detalhada da curva de carga da instalação, dividida em dois gráficos distintos, conforme ilustrado na Figura 6. O primeiro gráfico exibe o perfil completo de todo o conjunto de dados, fornecendo uma visão geral do consumo de energia ao longo do tempo. O segundo gráfico, localizado abaixo, foca em um *frame* específico, permitindo uma análise mais detalhada de um momento particular da curva de carga, conforme o interesse do profissional responsável pela análise. Esse frame pode representar diferentes intervalos de tempo, como uma

semana, um dia ou até um horário específico, proporcionando uma visão mais precisa do comportamento do consumo de energia durante os períodos selecionados.

Figura 6. Curva de Carga da unidade consumidora no período considerado.

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 1, são apresentados a demanda média, máxima e o fator de carga, determinados automaticamente pelo software, com base nos dados coletados da unidade consumidora analisada. No caso em questão, o fator de carga está distante de 100%, indicando baixa otimização do uso dos recursos da instalação elétrica. Esse resultado sinaliza para o gestor de energia sobre a necessidade de se implementar estratégias de gestão e eficiência energética. Dentre as possíveis ações, destacam-se:

- **Redução dos picos de demanda**, redistribuindo o uso dos equipamentos ao longo do dia para equilibrar o consumo e evitar demandas pontuais muito superiores à média.
- **Otimização do uso da infraestrutura elétrica existente**, mantendo a demanda constante, mas aumentando o consumo médio de energia.

Essa abordagem pode ser realizada por meio da ampliação dos períodos de operação dos equipamentos já instalados, sem necessidade de aquisição de novos ativos.

Tabela 1. Demanda média, máxima e fator de carga da unidade consumidora, no período considerado.

Demanda Média	878,54 kW
Demanda Máxima	1992,48 kW
Fator de Carga	44,09%

Fonte: Próprio Autor

A partir dos dados extraídos da memória de massa, o software realiza duas análises estatísticas destinadas a caracterizar o perfil de demanda e consumo da instalação elétrica no intervalo de 15 minutos, como mostra a Figura 7. A primeira análise classifica esses parâmetros de acordo com os postos tarifários ponta e fora de ponta, fornecendo uma visão detalhada da utilização de energia em cada posto tarifário.

Adicionalmente, o software é capaz de refinar essa análise, extrapolando-a para traçar o perfil típico de demanda e consumo da instalação para cada dia da semana, no intervalo de 15 minutos, como ilustra a Figura 8. Esse nível de detalhamento permite identificar padrões específicos de comportamento energético ao longo dos dias úteis e finais de semana, viabilizando a implementação de estratégias mais direcionadas de gestão e eficiência energética.

A execução do software, ilustrada nas Figuras 7 e 8, apresenta estatísticas descritivas para os dados analisados, organizadas por classe tarifária. No parâmetro **"count",** é exibida a quantidade total de intervalos de 15 minutos registrados para cada classe tarifária: 2.448 registros correspondem ao posto tarifário fora ponta, enquanto 240 registros correspondem ao posto tarifário ponta. Esses intervalos totalizam exatamente um mês de medições.

Para cada posto tarifário, o software apresenta as seguintes estatísticas:

- **"mean"**: a média da demanda e do consumo registrados em intervalos de 15 minutos;

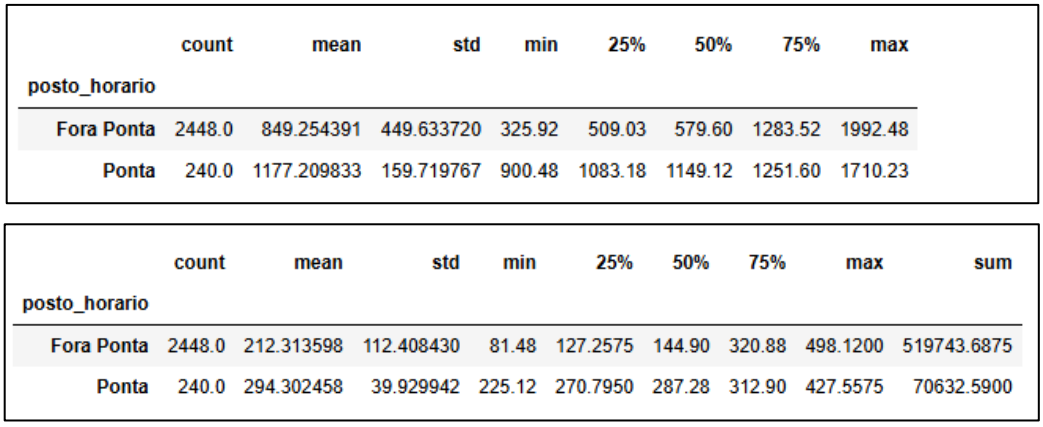
- **"std"**: o desvio padrão, que mede a dispersão dos valores em relação à média. Um desvio padrão alto indica maior variabilidade nos dados, enquanto um desvio padrão baixo sugere que os valores estão mais concentrados em torno da média;
- **"min"** e **"max"**: os valores mínimos e máximos de demanda e consumo registrados;
- **“sum”:** o total acumulado de energia ativa consumida em cada posto tarifário.

Além disso, o software calcula os valores dos quartis:

- **Primeiro quartil (25%)**: o valor abaixo do qual estão 25% dos dados;
- **Segundo quartil (50%)**: o valor mediano que divide os dados em duas metades;
- **Terceiro quartil (75%)**: o valor abaixo do qual estão 75% dos dados.

Essas informações são fundamentais para compreender a distribuição, a variabilidade e os padrões de consumo e demanda de cada posto tarifário ao longo do período analisado.

Figura 7. Perfil típico de demanda e consumo da instalação, em um intervalo de 15 minutos, para cada posto tarifário.



posto_horario	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Fora Ponta	2448.0	849.254391	449.633720	325.92	509.03	579.60	1283.52	1992.48
Ponta	240.0	1177.209833	159.719767	900.48	1083.18	1149.12	1251.60	1710.23

posto_horario	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max	sum
Fora Ponta	2448.0	212.313598	112.408430	81.48	127.2575	144.90	320.88	498.1200	519743.6875
Ponta	240.0	294.302458	39.929942	225.12	270.7950	287.28	312.90	427.5575	70632.5900

Fonte: Próprio Autor

Figura 8. Perfil típico de demanda e consumo da instalação, em um intervalo de 15 minutos, para cada dia da semana.

dia	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
domingo	384.0	462.007396	61.931239	325.92	414.9600	463.68	510.7125	586.32
quarta-feira	384.0	1085.462187	473.259152	500.64	561.9600	1106.28	1515.3600	1992.48
quinta-feira	384.0	1050.882266	430.134092	502.32	587.5800	1072.67	1443.9575	1824.48
segunda-feira	384.0	998.233906	431.530622	465.35	514.0800	1039.08	1349.4600	1806.00
sexta-feira	384.0	968.724375	393.639730	480.48	559.4400	926.52	1336.0200	1725.36
sábado	384.0	535.074271	52.356770	426.71	493.9200	527.52	568.6775	677.04
terça-feira	384.0	1049.368490	442.177972	475.44	559.0125	1083.60	1452.3525	1863.12

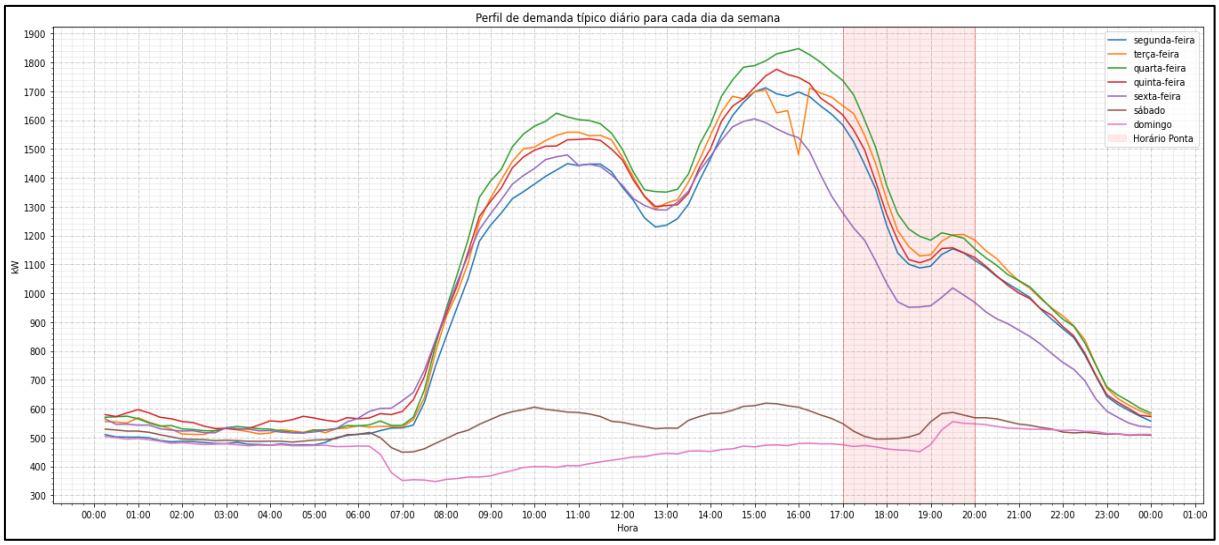
dia	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max	sum
domingo	384.0	115.501849	15.482810	81.4800	103.740000	115.9200	127.678125	146.58	44352.7100
quarta-feira	384.0	271.365547	118.314788	125.1600	140.490000	276.5700	378.840000	498.12	104204.3700
quinta-feira	384.0	262.720566	107.533523	125.5800	146.895000	268.1675	360.989375	456.12	100884.6975
segunda-feira	384.0	249.558477	107.882656	116.3375	128.520000	259.7700	337.365000	451.50	95830.4550
sexta-feira	384.0	242.181094	98.409933	120.1200	139.860000	231.6300	334.005000	431.34	92997.5400
sábado	384.0	133.768568	13.089193	106.6775	123.480000	131.8800	142.169375	169.26	51367.1300
terça-feira	384.0	262.342122	110.544493	118.8600	139.753125	270.9000	363.088125	465.78	100739.3750

Fonte: Próprio Autor

Com o objetivo de proporcionar uma análise visual dessas estatísticas, o software gera automaticamente um gráfico que ilustra o perfil de demanda típico diário da instalação, segmentado por dia da semana e destacando os períodos correspondentes ao posto tarifário ponta. Nota-se que a análise do perfil de demanda da unidade consumidora, ilustrada na Figura 9, evidencia que o posto tarifário ponta abrange o intervalo entre 17h e 20h, conforme estabelecido pelas regras da concessionária CEMIG.

Esse recurso é útil, visto que permite identificar de forma rápida os dias e horários com picos de consumo, além de verificar se há ocorrência de consumo e demanda de potência elevados durante o posto tarifário ponta. Essa análise visual fornece ao operador informações estratégicas cruciais, facilitando a identificação da necessidade de implementação de estratégias de eficiência energética. Ademais, ela destaca os momentos críticos em que essas estratégias devem ser aplicadas, permitindo ações direcionadas para a redução de custos e a otimização do uso da energia elétrica.

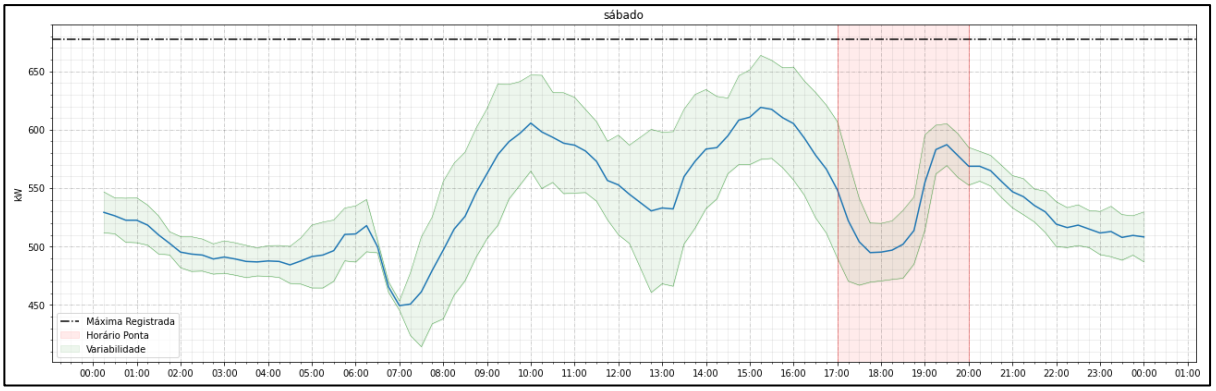
Figura 9. Perfil de demanda típico diário da instalação, para cada dia da semana.



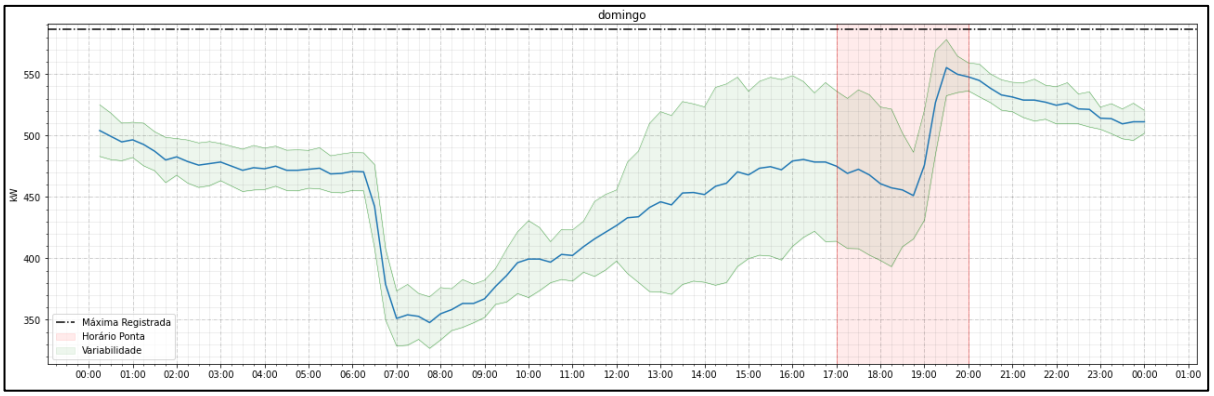
Fonte: Próprio Autor

O software também gera gráficos individuais dos perfis típicos de demanda para cada dia da semana, conforme ilustrados na Figura 10, que inclui uma região de probabilidade calculada com base no desvio padrão. Esse intervalo de confiança proporciona maior previsibilidade ao gestor, permitindo uma análise mais precisa e assertiva no planejamento de estratégias de eficiência energética.

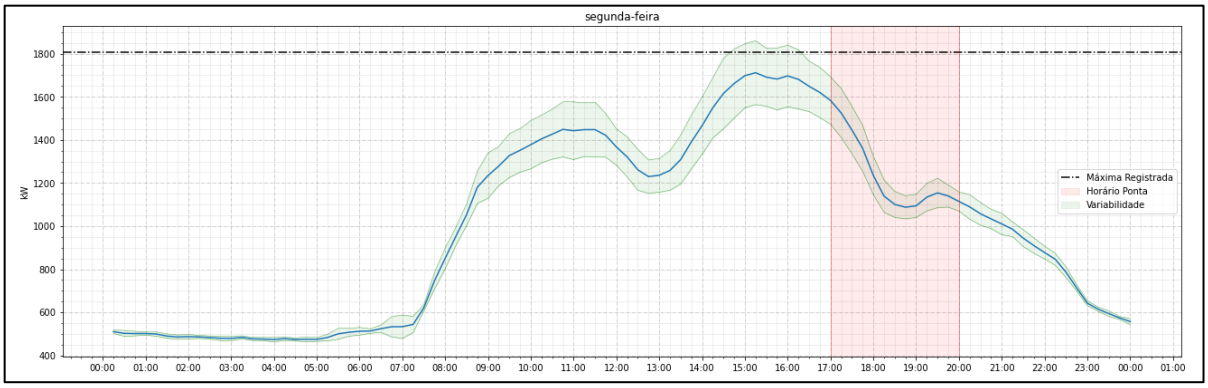
Figura 10. Perfil de demanda típico diário da instalação, com intervalo de confiança. (a) sábado, (b) domingo, (c) segunda, (d) terça, (e) quarta, (f) quinta e (g) sexta.



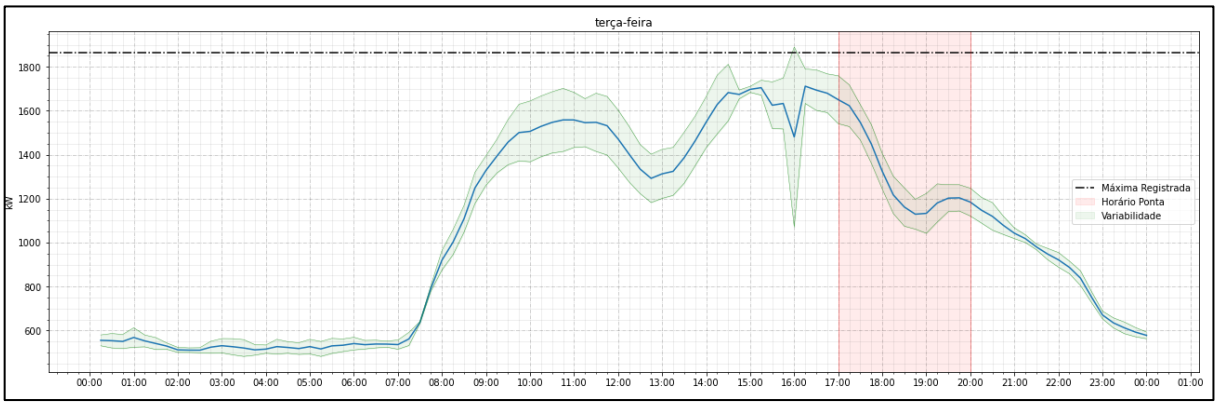
(a)


domingo
kW
Máxima Registrada
Horário Ponta
Variabilidade

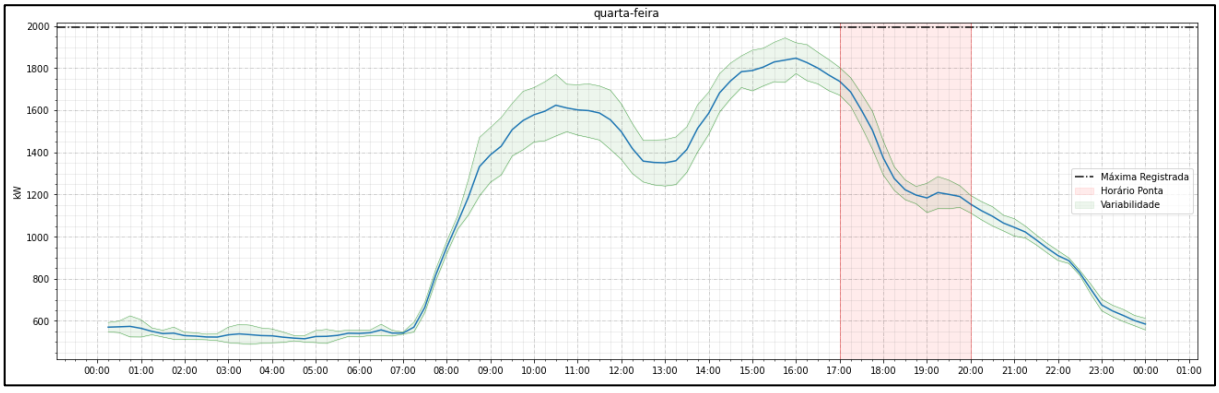
(b)


segunda-feira
kW
Máxima Registrada
Horário Ponta
Variabilidade

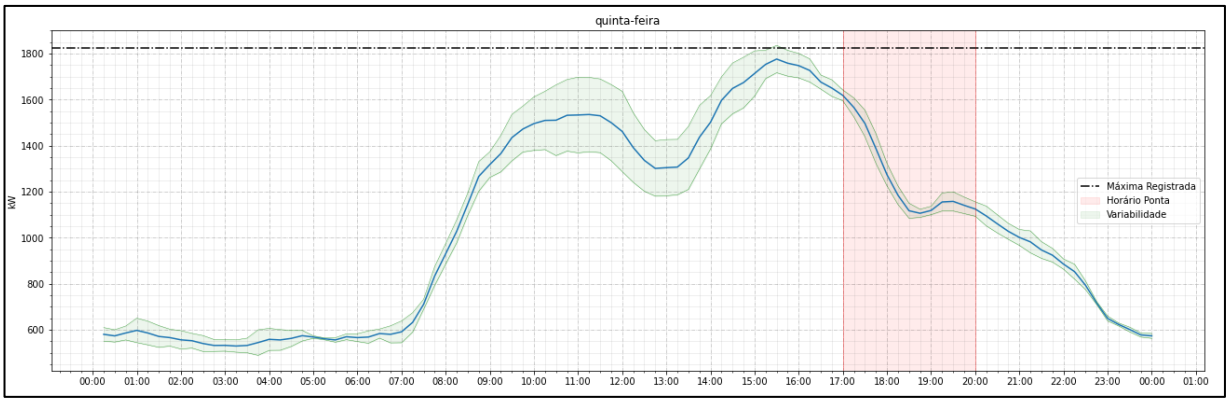
(c)


terça-feira
kW
Máxima Registrada
Horário Ponta
Variabilidade

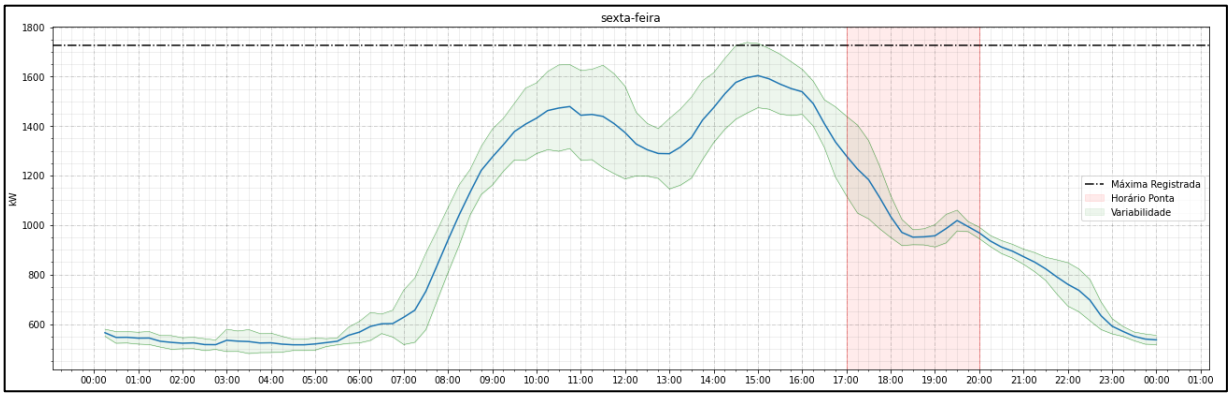
(d)


quarta-feira
kW
Máxima Registrada
Horário Ponta
Variabilidade

(e)



(f)



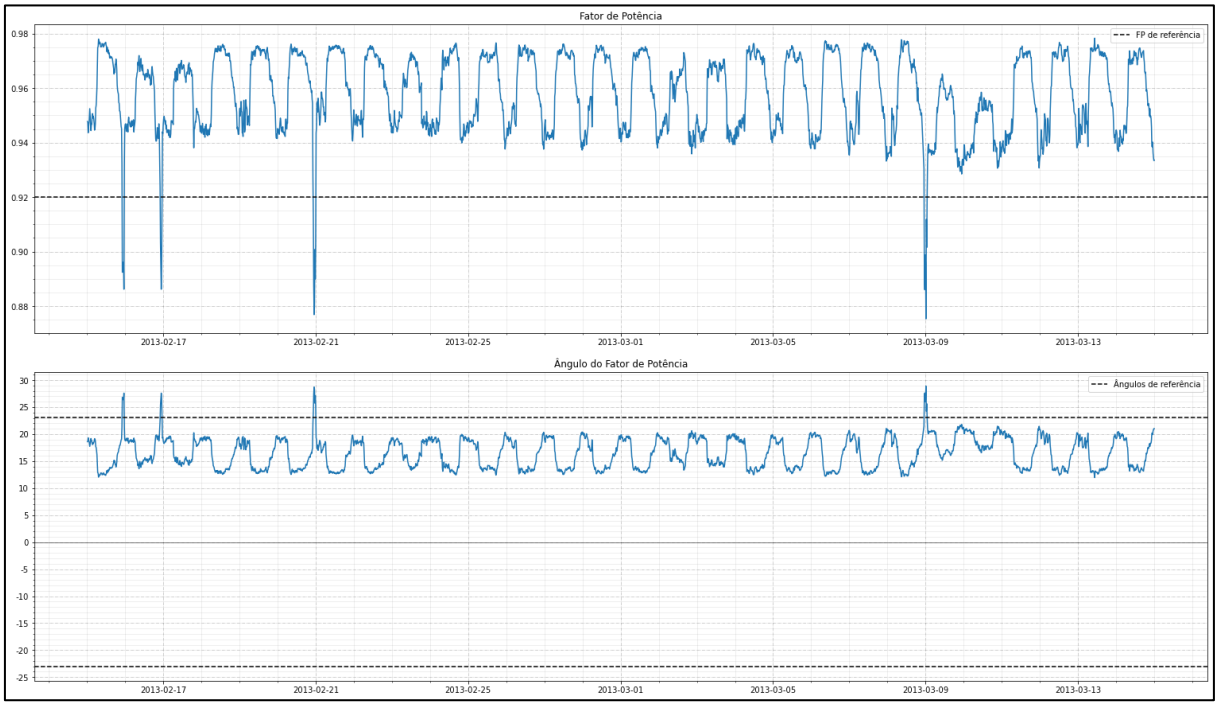
(g)

Fonte: Próprio Autor

5.2 ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA DA UNIDADE CONSUMIDORA

Utilizando os dados tratados oriundos da memória de massa da unidade consumidora, o software exibe o valor do fator de potência da instalação, juntamente com o ângulo correspondente, ao longo de todo o período analisado, conforme ilustrado na Figura 11. Os gráficos apresentados referem-se a uma unidade consumidora do grupo A, pertencente à área de concessão da CEMIG.

Figura 11. Fator de potência, e ângulo correspondente, da instalação.



Fonte: Próprio Autor

Ao analisar os gráficos apresentados, observa-se que todo o consumo de energia reativa da instalação tem característica indutiva, uma vez que o ângulo do fator de potência nunca é inferior a zero. Além disso, é possível verificar que a instalação não enfrenta um problema crônico de baixo fator de potência, com eventuais reduções ocorrendo apenas em momentos pontuais ao longo do período analisado.

Assim como realizado para o perfil de demanda, o software aplica uma análise estatística detalhada do fator de potência da instalação, considerando intervalos de 15 minutos segmentados por dia da semana, conforme apresentado na figura 12.

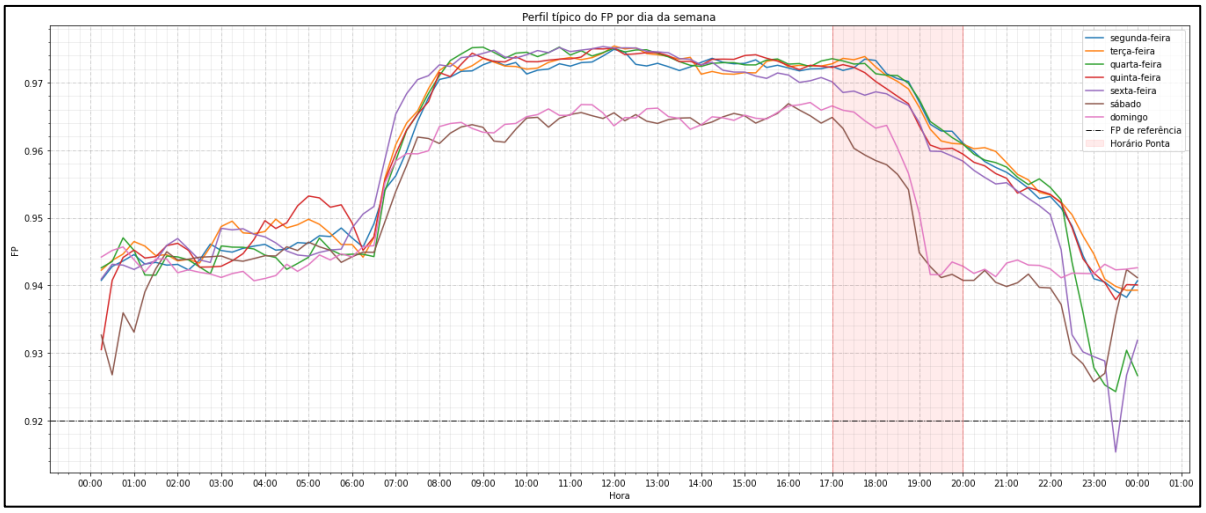
Figura 12. Perfil típico do fator de potência, em um intervalo de 15 minutos, para cada dia da semana.

dia	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
domingo	384.0	0.953689	0.012370	0.930613	0.943698	0.950386	0.966658	0.976533
quarta-feira	384.0	0.959658	0.016059	0.876872	0.944969	0.964224	0.973295	0.978313
quinta-feira	384.0	0.960515	0.013364	0.903303	0.948585	0.962216	0.973241	0.976555
segunda-feira	384.0	0.960117	0.013057	0.930686	0.946701	0.963668	0.972186	0.976589
sexta-feira	384.0	0.959180	0.016272	0.886006	0.947742	0.963172	0.972422	0.977979
sábado	384.0	0.951856	0.014355	0.875332	0.944042	0.950964	0.963876	0.973158
terça-feira	384.0	0.960931	0.012605	0.934443	0.948902	0.964380	0.972713	0.976756

Fonte: Próprio Autor

Além disso, o software gera uma análise visual dessa estatística, ilustrada na Figura 13, que mostra o perfil típico diário do fator de potência da unidade consumidora para cada dia da semana. Essa representação gráfica permite uma avaliação clara e prática do comportamento do fator de potência ao longo dos dias e horários.

Figura 13. Perfil típico do fator de potência diário da instalação, por dia da semana.



Fonte: Próprio Autor

Esse recurso facilita a identificação de possíveis problemas relacionados ao baixo fator de potência, evidenciando os dias e horários em que tais ocorrências são mais frequentes. Assim, fornece ao gestor informações estratégicas cruciais para o planejamento e implementação de estratégias de eficiência energética. Além disso,

destaca os momentos críticos nos quais essas estratégias podem ser mais eficazes, possibilitando uma gestão energética mais direcionada e assertiva.

O software oferece ao usuário a possibilidade de definir o valor mínimo desejado para o fator de potência da instalação. Após a definição do valor de referência, o software permite que o profissional visualize toda a base de dados da unidade consumidora, possibilitando uma análise detalhada dos registros da instalação. Essa funcionalidade é particularmente útil para identificar os momentos em que o fator de potência fica abaixo do limite estipulado.

O software destaca automaticamente, na tabela de dados, os intervalos em que o fator de potência está adequado, sinalizando-os em verde, e aqueles em que o fator não atende ao valor de referência, marcando-os em vermelho, como exemplificado no recorte da figura 14. Como exemplo, foi definido um fator de potência mínimo de 0,92.

Figura 14. Recorte da base de dados: instantes em que o fator de potência é menor que o valor de referência.

data	posto_horario	dia	kva	kw	kvar	kwh	fp	angulo_fp
2013-02-15 00:15:00	Fora Ponta	sexta-feira	542.421504	514.080000	173.040000	128.520000	0.947750	18.603300
2013-02-15 00:30:00	Fora Ponta	sexta-feira	546.132661	517.430000	174.720000	129.357500	0.947444	18.658224
2013-02-15 00:45:00	Fora Ponta	sexta-feira	543.016959	512.400000	179.760000	128.100000	0.943617	19.331874
2013-02-15 01:00:00	Fora Ponta	sexta-feira	538.190301	509.040000	174.720000	127.260000	0.945836	18.943980
2013-02-15 01:15:00	Fora Ponta	sexta-feira	528.609798	500.640000	169.670000	125.160000	0.947088	18.721838
⋮								
2013-02-15 21:30:00	Fora Ponta	sexta-feira	729.982715	690.480000	236.880000	172.620000	0.945885	18.935336
2013-02-15 21:45:00	Fora Ponta	sexta-feira	668.369795	631.680000	218.400000	157.920000	0.945106	19.072554
2013-02-15 22:00:00	Fora Ponta	sexta-feira	652.428692	608.160000	236.230000	152.040000	0.932148	21.227861
2013-02-15 22:15:00	Fora Ponta	sexta-feira	641.932264	572.880000	289.630000	143.220000	0.892431	26.819717
2013-02-15 22:30:00	Fora Ponta	sexta-feira	620.447446	554.400000	278.560000	138.600000	0.893549	26.677383
2013-02-15 22:45:00	Fora Ponta	sexta-feira	616.130651	551.040000	275.630000	137.760000	0.894356	26.574200
2013-02-15 23:00:00	Fora Ponta	sexta-feira	618.644155	554.400000	274.520000	138.600000	0.896153	26.343046
2013-02-15 23:15:00	Fora Ponta	sexta-feira	616.115008	546.000000	285.450000	136.500000	0.886198	27.600667
2013-02-15 23:30:00	Fora Ponta	sexta-feira	577.251091	537.600000	210.250000	134.400000	0.931310	21.359973
2013-02-15 23:45:00	Fora Ponta	sexta-feira	570.611697	539.280000	186.480000	134.820000	0.945091	19.075098
2013-02-16 00:00:00	Fora Ponta	sábado	562.616209	532.560000	181.430000	133.140000	0.946578	18.812705

Fonte: Próprio Autor

5.2.1 RESULTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES CHAVEADOS PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Com base no fator de potência mínimo definido pelo usuário, o sistema procede ao dimensionamento do banco de capacitores necessário para atender a essa exigência. Inicialmente, o software calcula, para cada registro de 15 minutos presente na base de dados da instalação, a potência reativa capacitiva requerida para que o fator de potência atinja, no mínimo, o valor de referência estipulado pelo usuário.

Figura 15. Recorte da base de dados: potência reativa capacitiva mínima necessária para corrigir o fator de potência para o valor de referência.

data	kw	kvar	angulo_fp	fp	qc_necessario
2013-02-20 21:30:00	939.12	277.20	16.445016	0.959092	0.000000
2013-02-20 21:45:00	907.19	278.88	17.087993	0.955855	0.000000
2013-02-20 22:00:00	887.04	277.20	17.354025	0.954480	0.000000
2013-02-20 22:15:00	833.28	336.32	21.979487	0.927318	0.000000
2013-02-20 22:30:00	769.44	345.58	24.186366	0.912218	17.799933
2013-02-20 22:45:00	705.60	365.69	27.396268	0.887845	65.105659
2013-02-20 23:00:00	675.36	370.25	28.732704	0.876872	82.547845
2013-02-20 23:15:00	653.52	352.27	28.326211	0.880260	73.871646
2013-02-20 23:30:00	624.96	301.25	25.735501	0.900808	35.018155
2013-02-20 23:45:00	609.84	312.56	27.136405	0.889923	52.769248
2013-02-21 00:00:00	609.84	289.63	25.404345	0.903303	29.839248
2013-02-21 00:15:00	598.07	210.00	19.347677	0.943526	0.000000
2013-02-21 00:30:00	594.71	204.96	19.015926	0.945428	0.000000
2013-02-21 00:45:00	660.24	206.64	17.378925	0.954350	0.000000
2013-02-21 01:00:00	655.19	203.28	17.237086	0.955087	0.000000

Fonte: Próprio Autor

Com base em um catálogo de unidades capacitivas, expressas em kVAr, integrado ao software e ilustrado na Figura 16, o sistema determina a quantidade mínima necessária de cada unidade capacitiva para corrigir o fator de potência no pior caso identificado na instalação, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 16. Catálogo de unidades capacitivas expressas em kVAr.

	kvar
0	5.0
1	7.5
2	10.0
3	12.5
4	15.0
5	20.0
6	22.5
7	25.0
8	30.0
9	45.0
10	50.0
11	60.0

Fonte: Próprio Autor

Figura 17. Opções de configuração disponíveis para cada unidade capacitiva.

	kvar	qtd	max_manobrado	excedente
9	45.0	2.0	90.0	7.452155
10	50.0	2.0	100.0	17.452155
11	60.0	2.0	120.0	37.452155
8	30.0	3.0	90.0	7.452155
6	22.5	4.0	90.0	7.452155
7	25.0	4.0	100.0	17.452155
5	20.0	5.0	100.0	17.452155
4	15.0	6.0	90.0	7.452155
3	12.5	7.0	87.5	4.952155
2	10.0	9.0	90.0	7.452155
1	7.5	12.0	90.0	7.452155
0	5.0	17.0	85.0	2.452155

Fonte: Próprio Autor

Dentre as possíveis combinações, o software seleciona automaticamente a melhor opção com base em critérios predefinidos. Ele prioriza configurações que exijam entre 6 e 12 unidades capacitivas, alinhando-se aos padrões comuns dos controladores de fator de potência, que frequentemente operam com 6 ou 12 estágios. Finalmente, o sistema refina as opções selecionadas, optando por aquela que gera o menor excedente de potência reativa, ou seja, a alternativa com menor sobredimensionamento. Para a unidade consumidora analisada como exemplo, o software identificou que a melhor configuração para corrigir o fator de potência seria um banco composto por 7 unidades capacitivas de 12,5 kVAr cada.

Após a definição da configuração do banco chaveado, o software disponibiliza diversas análises para avaliar se os efeitos da instalação do banco de capacitores serão satisfatórios. A primeira dessas análises é a própria base de dados, onde o software apresenta, para cada intervalo de 15 minutos registrado, o fator de potência atual e o fator de potência final após a manobra/inserção dos bancos de capacitores. Mantendo a mesma lógica de cores utilizada anteriormente, valores superiores ao fator de potência mínimo definido pelo usuário são destacados em verde, enquanto valores inferiores são destacados em vermelho.

Figura 18. Recorte da base de dados: efeito da instalação do banco de capacitores chaveados no fator de potência da unidade consumidora.

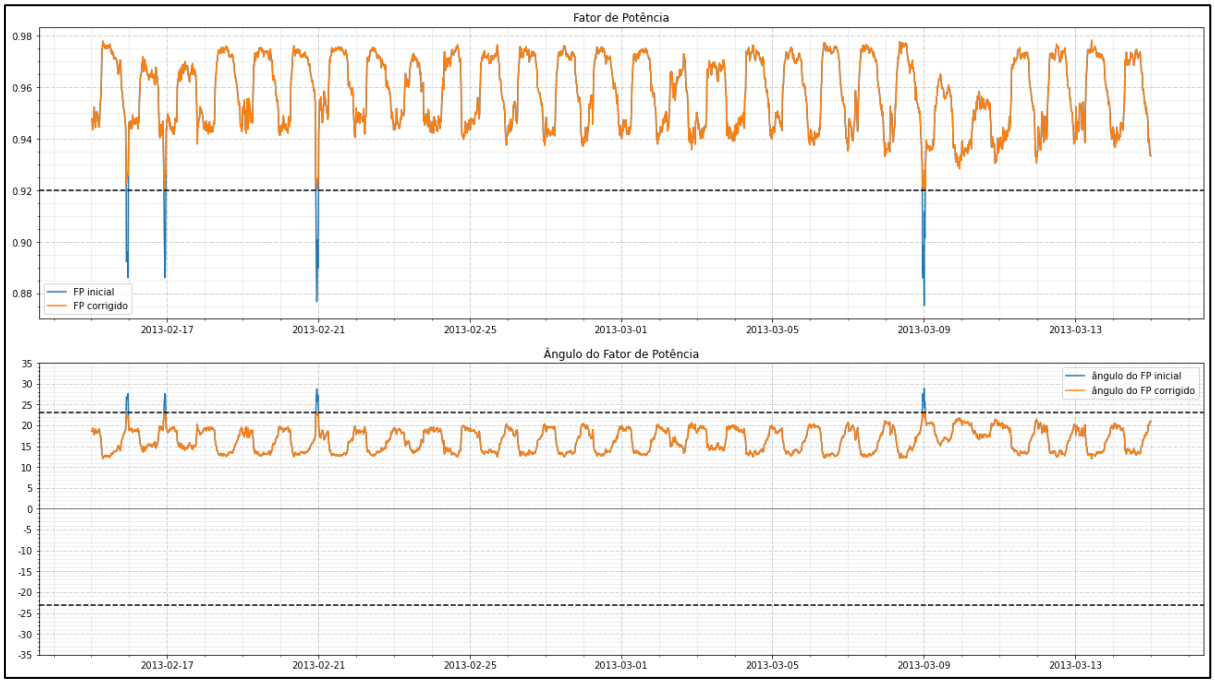
data	kw	kvar	angulo_fp	fp	qc_necessario	bancos	qtd_bancos	qc_manobrada	angulo_fp_final	fp_final
2013-02-15 00:15:00	514.080000	173.040000	18.603300	0.947750	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	18.603300	0.947750
2013-02-15 00:30:00	517.430000	174.720000	18.658224	0.947444	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	18.658224	0.947444
2013-02-15 00:45:00	512.400000	179.760000	19.331874	0.943617	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	19.331874	0.943617
2013-02-15 01:00:00	509.040000	174.720000	18.943980	0.945836	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	18.943980	0.945836
2013-02-15 01:15:00	500.640000	169.670000	18.721838	0.947088	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	18.721838	0.947088
⋮										
2013-02-15 21:30:00	690.480000	236.880000	18.935336	0.945885	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	18.935336	0.945885
2013-02-15 21:45:00	631.680000	218.400000	19.072554	0.945106	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	19.072554	0.945106
2013-02-15 22:00:00	608.160000	236.230000	21.227861	0.932148	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	21.227861	0.932148
2013-02-15 22:15:00	572.880000	289.630000	26.819717	0.892431	45.584142	3.646731	4.000000	50.000000	22.699073	0.922544
2013-02-15 22:30:00	554.400000	278.560000	26.677383	0.893549	42.386589	3.390927	4.000000	50.000000	22.404665	0.924515
2013-02-15 22:45:00	551.040000	275.630000	26.574200	0.894356	40.887943	3.271035	4.000000	50.000000	22.267240	0.925427
2013-02-15 23:00:00	554.400000	274.520000	26.343046	0.896153	38.346589	3.067727	4.000000	50.000000	22.046882	0.926877
2013-02-15 23:15:00	546.000000	285.450000	27.600667	0.886198	52.854974	4.228398	5.000000	62.500000	22.211831	0.925793
2013-02-15 23:30:00	537.600000	210.250000	21.359973	0.931310	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	21.359973	0.931310
2013-02-15 23:45:00	539.280000	186.480000	19.075098	0.945091	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	19.075098	0.945091

Fonte: Próprio Autor

Além disso, o software oferece uma análise visual do efeito da instalação do banco de capacitores chaveado no fator de potência, por meio de um gráfico comparativo entre os valores antes e depois da instalação. Esta análise está ilustrada na Figura 19, permitindo uma visualização clara dos impactos da correção no fator de potência ao longo do período analisado.

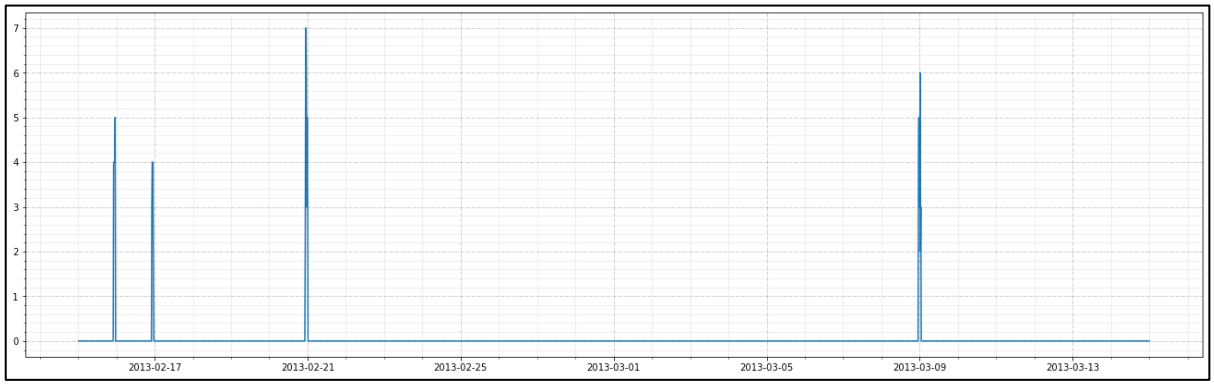
A Figura 20 ilustra o número de unidades capacitivas manobradas pelo controlador automático para cada instante, durante todo o período analisado. É possível observar que os momentos em que as unidades capacitivas são acionadas coincidem precisamente com os instantes em que o fator de potência da instalação fica abaixo do valor de referência definido pelo usuário.

Figura 19. Fator de potência, e ângulo correspondente, antes e depois da instalação do banco de capacitores chaveados.



Fonte: Próprio Autor

Figura 20. Dia e número de unidades capacitivas manobradas pelo controlador.

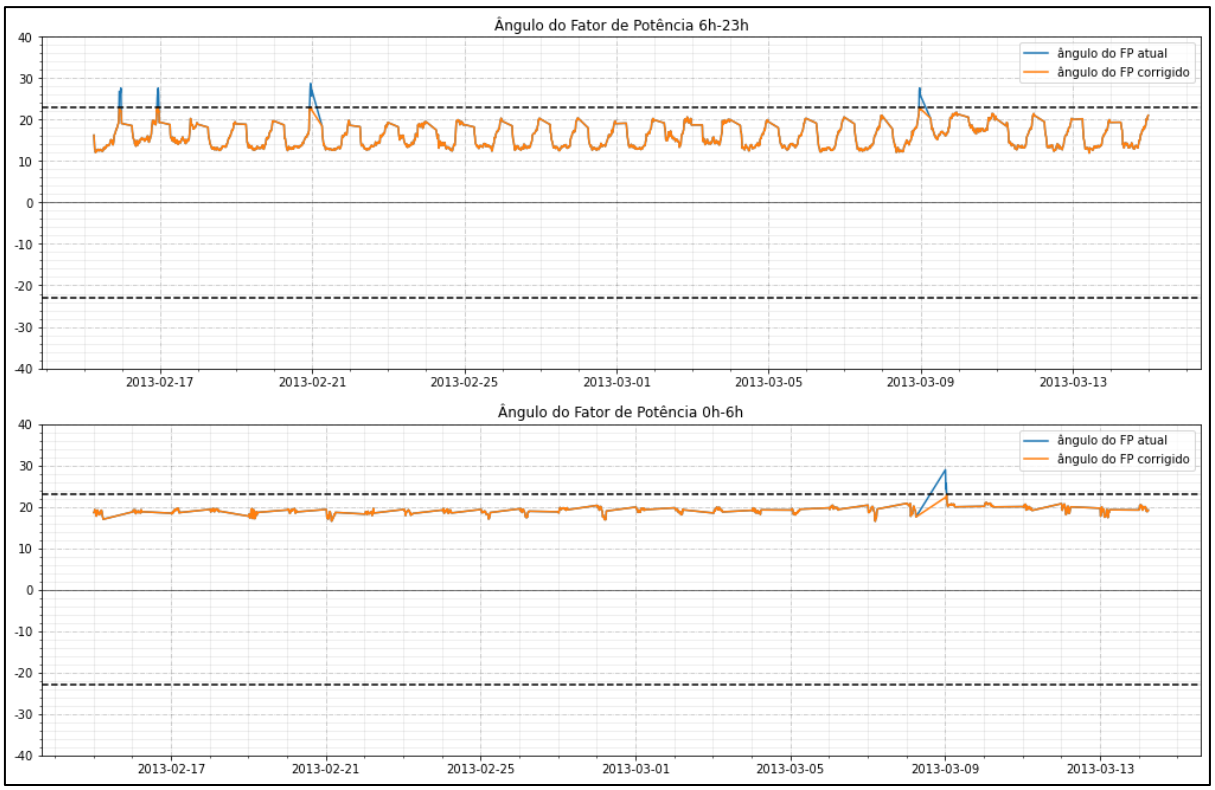


Fonte: Próprio Autor

Por fim, o software gera um conjunto de dois gráficos, apresentados na Figura 21, que representam o ângulo do fator de potência da unidade consumidora antes e depois da instalação do banco de capacitores chaveados, segmentados em intervalos distintos. O primeiro gráfico exibe o ângulo do fator de potência no período das 6h às 23h59, enquanto o segundo abrange o intervalo de 0h às 6h.

Essa segmentação é crucial para o profissional responsável pela análise, pois permite verificar, de forma visual, se o fator de potência – bem como sua natureza, indutiva ou capacitiva – permanece dentro dos limites esperados para cada período do dia. Isso é especialmente relevante para assegurar conformidade com os critérios estabelecidos na Resolução Normativa nº 1000 da ANEEL, evitando cobranças adicionais por excedente reativo.

Figura 21. Ângulo do fator de potência, antes e depois da instalação do banco de capacitores chaveados, por intervalo de cobrança diário.



Fonte: Próprio Autor

No exemplo da unidade consumidora analisada, observa-se que a correção do fator de potência por meio dos bancos de capacitores chaveados foi adequadamente dimensionada pelo software. Isso é demonstrado pela eliminação dos picos de fator de potência inadequado, ajustando o perfil para se manter dentro dos limites definidos pela Resolução Normativa nº 1000 da ANEEL.

5.2.2 RESULTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES FIXO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Para o dimensionamento do banco de capacitores fixo, o software segue as mesmas etapas iniciais aplicadas no processo de dimensionamento de bancos de capacitores chaveados. Primeiramente, o sistema calcula a potência reativa capacitiva máxima necessária para corrigir o menor fator de potência registrado na base de dados. Com base nesse cálculo, o software consulta o catálogo integrado de unidades capacitivas para determinar a configuração ideal do banco, utilizando o mesmo procedimento descrito nas Figuras 15, 16 e 17.

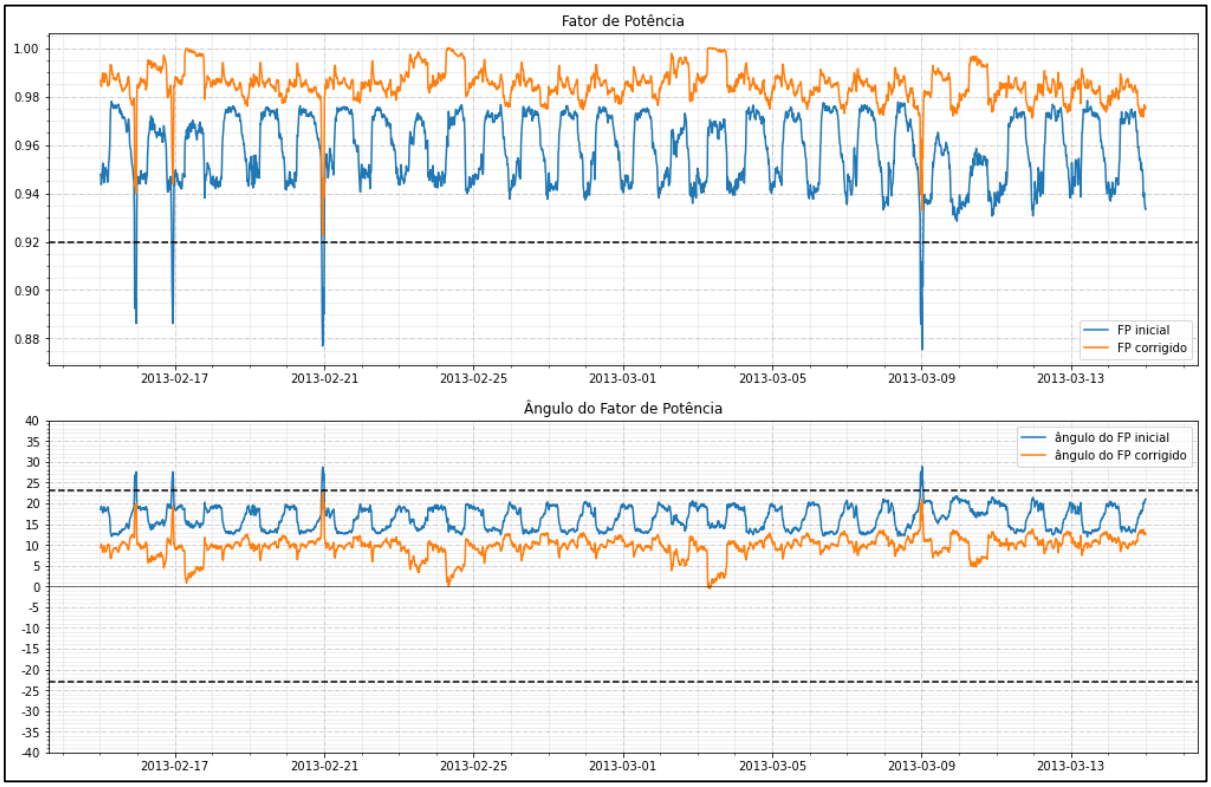
No caso da unidade consumidora analisada neste exemplo, o software definiu que o banco de capacitores fixo será composto por 7 unidades capacitivas de 12,5 kVAr, coincidindo com a configuração determinada anteriormente para o banco de capacitores chaveados. Entretanto, diferentemente do banco de capacitores chaveado, que ajusta dinamicamente a potência reativa capacitiva conforme a necessidade por meio de um controlador automático, o banco fixo fornece uma potência constante. Essa característica impacta de forma distinta o comportamento elétrico da instalação, resultando em um perfil final de fator de potência e de ângulo correspondente diferente daquele obtido com o banco chaveado. Esse impacto é evidenciado nas Figuras 22, 23 e 24.

Figura 22. Recorte da base de dados: efeito da instalação do banco de capacitores fixo no fator de potência da unidade consumidora.

data	kw	kvar	angulo_fp	fp	qc_necessario	qc_fixo	angulo_fp_final	fp_final
2013-02-15 00:15:00	514.080000	173.040000	18.603300	0.947750	0.000000	87.500000	9.447140	0.986437
2013-02-15 00:30:00	517.430000	174.720000	18.658224	0.947444	0.000000	87.500000	9.568053	0.986089
⋮								
2013-02-15 21:45:00	631.680000	218.400000	19.072554	0.945106	0.000000	87.500000	11.707424	0.979197
2013-02-15 22:00:00	608.160000	236.230000	21.227861	0.932148	0.000000	87.500000	13.742373	0.971374
2013-02-15 22:15:00	572.880000	289.630000	26.819717	0.892431	45.584142	87.500000	19.434437	0.943023
2013-02-15 22:30:00	554.400000	278.560000	26.677383	0.893549	42.386589	87.500000	19.015222	0.945432
2013-02-15 22:45:00	551.040000	275.630000	26.574200	0.894356	40.887943	87.500000	18.850365	0.946366
2013-02-15 23:00:00	554.400000	274.520000	26.343046	0.896153	38.346589	87.500000	18.641188	0.947539
2013-02-15 23:15:00	546.000000	285.450000	27.600667	0.886198	52.854974	87.500000	19.927899	0.940122
2013-02-15 23:30:00	537.600000	210.250000	21.359973	0.931310	0.000000	87.500000	12.861834	0.974910
2013-02-15 23:45:00	539.280000	186.480000	19.075098	0.945091	0.000000	87.500000	10.400370	0.983570

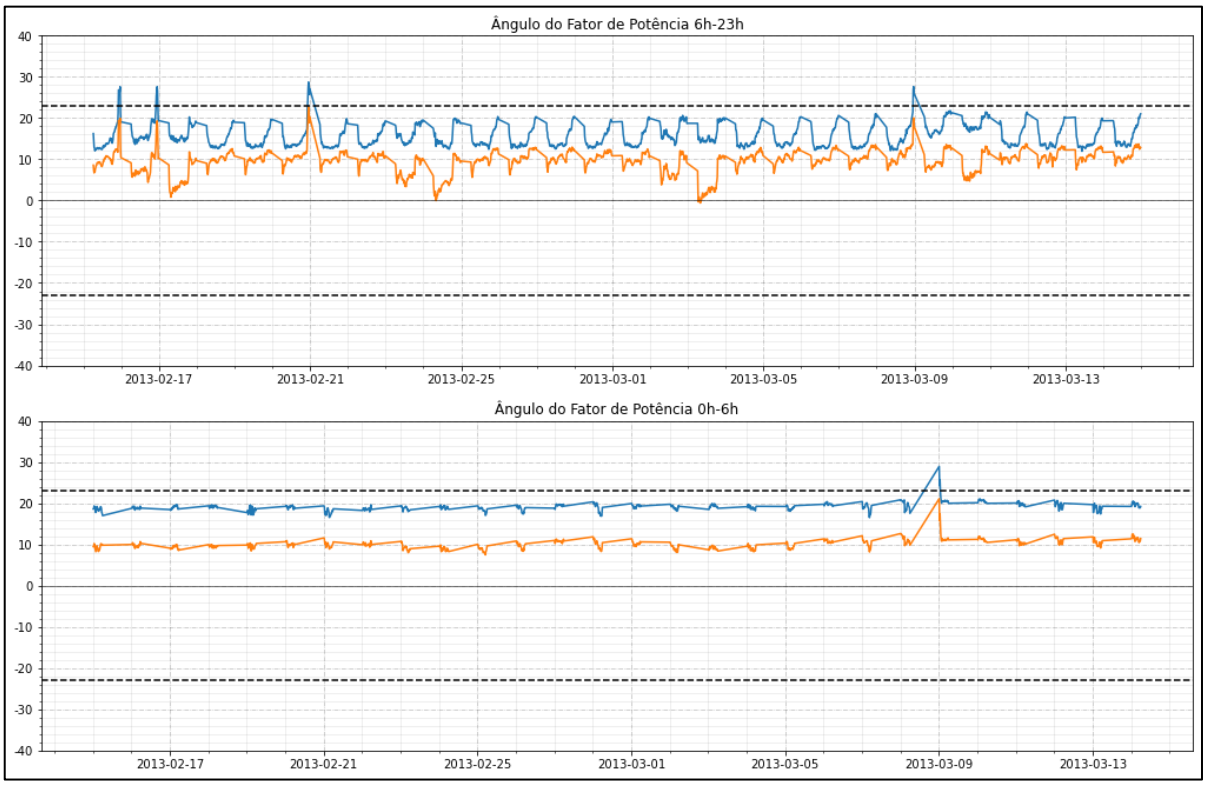
Fonte: Próprio Autor

Figura 23. Fator de potência, e ângulo correspondente, antes e depois da instalação do banco de capacitores fixo.



Fonte: Próprio Autor

Figura 24. Ângulo do fator de potência, antes e depois da instalação do banco de capacitores fixo, por intervalo de cobrança diário.



Fonte: Próprio Autor

No caso da unidade consumidora em análise, o dimensionamento do banco de capacitores fixo também demonstrou ser eficaz na correção do fator de potência. O software foi capaz de eliminar os períodos de fator de potência inadequado, ajustando o perfil para garantir que se mantivesse dentro dos limites estabelecidos pela Resolução Normativa nº 1000 da ANEEL. Isso comprova que, para a instalação em questão, tanto a solução com banco de capacitores chaveado quanto com banco fixo seriam alternativas viáveis.

5.3 RESULTADOS PARA A GESTÃO DE MODALIDADES TARIFÁRIAS E AJUSTE DE DEMANDA CONTRATADA

Para esta análise, foi utilizada uma memória de massa contendo o registro de três meses de operação de uma unidade consumidora pertencente à área de concessão da CPFL Piratininga. A unidade está atualmente enquadrada na modalidade tarifária horária verde, subgrupo A4, com demanda contratada de 420 kW. Dentro deste subgrupo, a unidade pode ajustar sua demanda contratada e, caso seja economicamente viável, migrar para a modalidade tarifária horária azul.

A primeira etapa do software para realizar a análise de viabilidade econômica consiste na importação da memória de massa e no tratamento dos dados, conforme ilustrado na Figura 25. Esse processo é semelhante às análises discutidas anteriormente.

Figura 25. Três meses de memória de massa importado e tratado pelo software.

	dia	hora	kwh	kvarh	kw	dia_da_semana	tipo_dia	posto_horario	cap_ou_ind	kvar	kva	fp	angulo_fp
2	01/07/2024	00:15:00	11.60	0.06	141.64	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	C	0.40	141.640565	0.999996	0.161806
5	01/07/2024	00:30:00	11.17	0.00	138.56	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	C	0.04	138.560006	1.000000	0.016540
8	01/07/2024	00:45:00	11.52	0.00	137.28	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	C	0.08	137.280023	1.000000	0.033389
11	01/07/2024	01:00:00	11.59	0.00	140.20	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	C	0.00	140.200000	1.000000	0.000000
14	01/07/2024	01:15:00	11.32	0.05	138.08	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	C	0.44	138.080701	0.999995	0.182576
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26483	30/09/2024	23:00:00	18.02	0.45	225.64	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	I	5.68	225.711480	0.999683	1.441993
26486	30/09/2024	23:15:00	16.92	0.50	210.08	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	I	5.92	210.163395	0.999603	1.614153
26489	30/09/2024	23:30:00	16.89	0.69	205.04	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	I	7.20	205.166375	0.999384	2.011121
26492	30/09/2024	23:45:00	17.00	1.03	207.36	segunda-feira	Dia útil	Fora Ponta	I	11.76	207.693205	0.998396	3.245936
26495	01/10/2024	00:00:00	17.08	0.86	203.04	terca-feira	Dia útil	Fora Ponta	I	10.56	203.314424	0.998650	2.977240

8832 rows × 13 columns

Fonte: Próprio Autor

Com os dados temporais da instalação, o software gera uma tabela adicional que resume a operação mensal da unidade consumidora, conforme ilustrado na Figura 26. Nesta tabela, são apresentados a demanda máxima registrada e o consumo total de energia elétrica da instalação, discriminados nos postos tarifários ponta e fora ponta. Os dados nela contidos serão utilizados como base para os algoritmos de otimização do software, que visam determinar o enquadramento tarifário mais vantajoso para o perfil de consumo da instalação.

Figura 26. Resumo dos registros mensais da instalação gerado pelo software.

	demanda_p	demanda_fp	consumo_p	consumo_fp
julho	246.16	241.44	4485.66	31076.34
agosto	496.88	418.08	6465.54	36087.06
setembro	559.48	503.28	9084.18	43825.58

Fonte: Próprio Autor

5.3.1 MODALIDADE TARIFÁRIA HORÁRIA VERDE

Inicialmente, o usuário deve inserir no software as tarifas vigentes praticadas pela concessionaria de energia elétrica local, conforme resolução homologatória, bem como os percentuais de ICMS, PIS e COFINS. Neste exemplo, como se trata do subgrupo A4 verde da concessionaria CPFL Piratininga, as tarifas, com impostos, são:

- Tarifa de consumo ponta: R$ 1,9188 /kWh
- Tarifa de consumo fora ponta: R$ 0,5254 /kWh
- Tarifa de demanda: R$ 16,4666 /kW
- Tarifa de ultrapassagem: R$ 32,9332 /kW

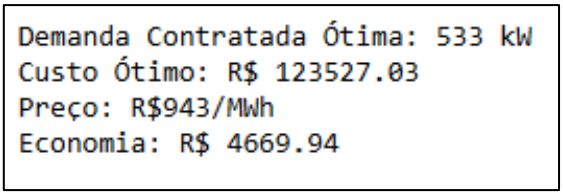
Considerando ICMS=18% e PIS+COFINS=5,5%

Para determinar o ajuste ideal da demanda contratada para o perfil de consumo analisado na modalidade tarifária horária verde, o software realiza uma busca exaustiva (força bruta) dentro de um intervalo definido pelo próprio algoritmo. Embora métodos baseados em força bruta sejam geralmente considerados ineficientes, neste

caso, a simplicidade do problema justifica sua aplicação. Trata-se de otimizar uma única variável inteira dentro de um intervalo restrito, o que torna desnecessária a implementação de algoritmos mais complexos ou sofisticados para redução do tempo de processamento.

Na Figura 27 é ilustrada a demanda contratada ideal calculada pelo software, juntamente com a projeção do custo total de energia elétrica para o período de três meses analisado, considerando a aplicação dessa nova demanda contratada. Além disso, são exibidas a métrica do custo médio por MWh consumido e a economia estimada em comparação com os custos associados à demanda contratada vigente.

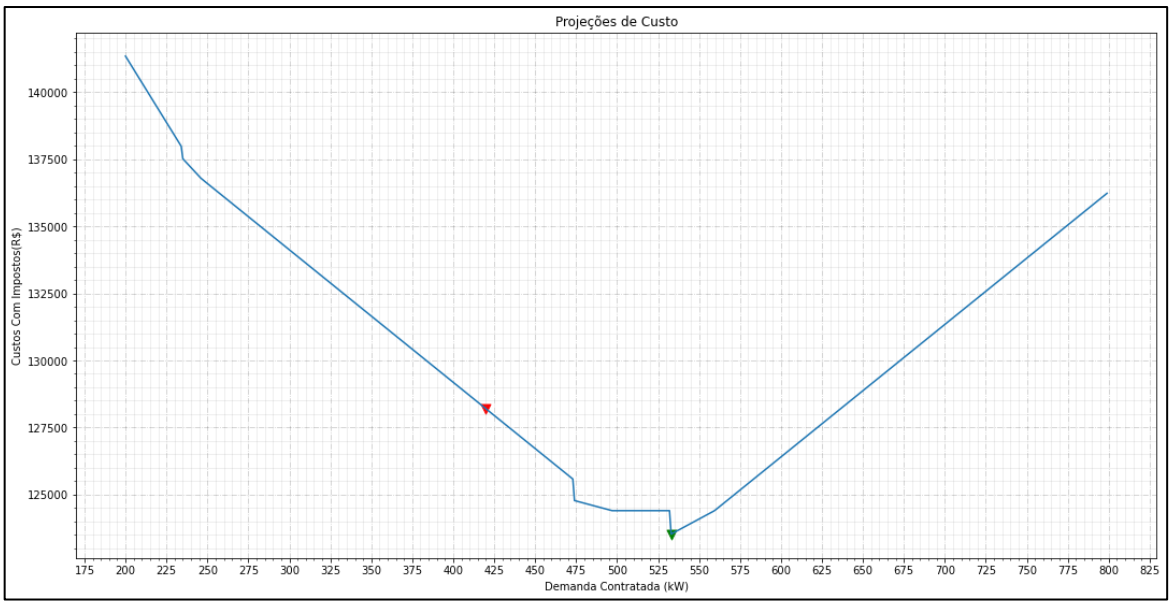
Figura 27. Contrato de demanda ótimo dentro da modalidade tarifária horária verde.



Fonte: Próprio Autor

O software também oferece uma análise visual das projeções de custo para cada demanda contratada simulada, conforme ilustrado na Figura 28. O gráfico evidencia que o sistema identifica corretamente a demanda contratada que resulta no menor custo total para a unidade consumidora.

Figura 28. Demanda contratada ótima dentro da modalidade tarifária horária verde.

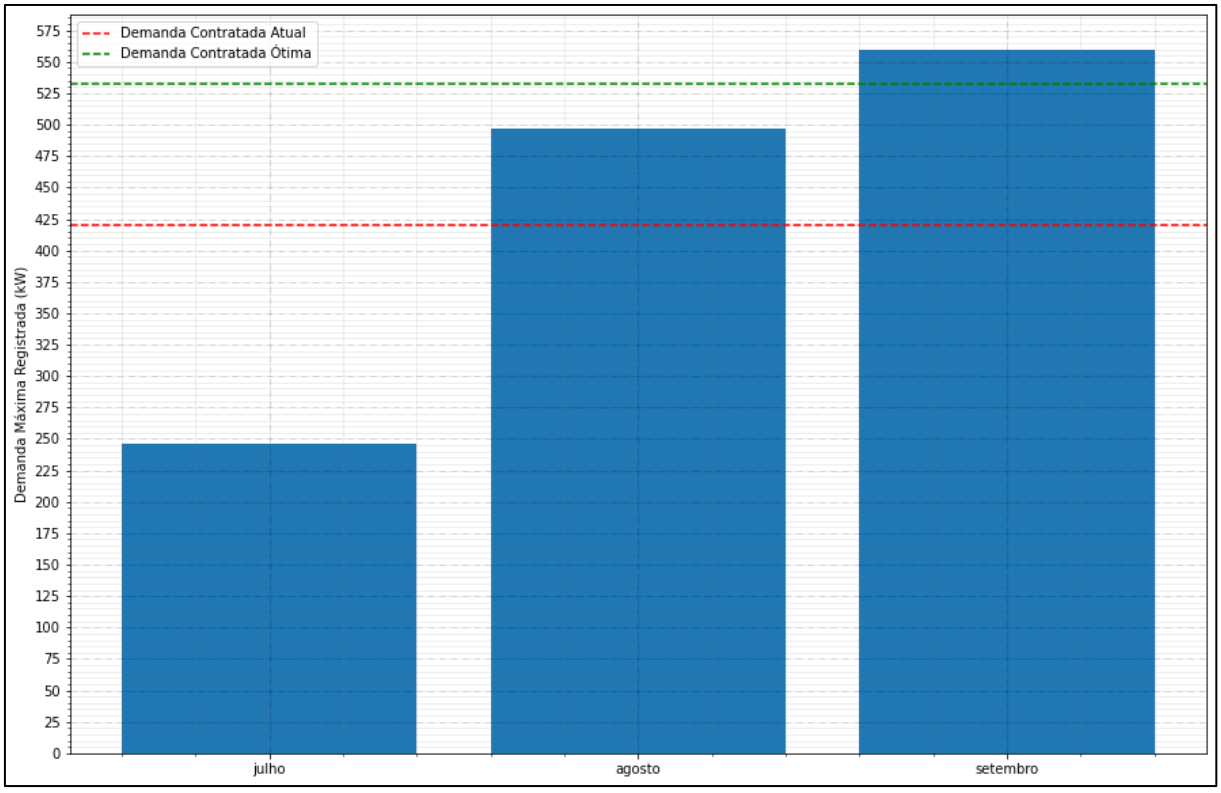


Fonte: Próprio Autor

Um aspecto interessante, e pouco intuitivo, é que a demanda contratada ótima determinada pelo sistema pode ser inferior a uma ou mais demandas máximas registradas em determinados meses e, ainda assim, representar o cenário de menor custo total. Isso ocorre porque, mesmo que a instalação esteja sujeita a cobranças por ultrapassagem de demanda nesses períodos, o custo global, considerando todos os meses analisados, é inferior em relação a outros ajustes possíveis. Além disso, há casos em que a demanda máxima registrada não excede 5% da demanda contratada, evitando penalidades por ultrapassagem.

Esse comportamento é exemplificado na Figura 29, onde a demanda contratada ótima de 533 kW está abaixo da demanda máxima registrada no mês de setembro. Apesar disso, o custo consolidado ao longo de todos os meses justifica a escolha como a alternativa economicamente mais viável.

Figura 29. Demanda contratada atual, ótima e demandas máximas registradas.



Fonte: Próprio Autor

5.3.2 MODALIDADE TARIFÁRIA HORÁRIA AZUL

De maneira semelhante ao procedimento descrito para a otimização do contrato de demanda na modalidade tarifária horária verde, no caso da modalidade tarifária horária azul, é necessário que o analista também insira no software as tarifas vigentes praticadas pela concessionária de energia elétrica. No presente exemplo, as tarifas com impostos, praticadas pela concessionaria CPFL Piratininga para o subgrupo A4 azul, são:

- Tarifa de consumo ponta: R$ 0,7716 /kWh
- Tarifa de consumo fora ponta: R$ 0,5254 /kWh
- Tarifa de demanda ponta: R$ 47,1028 /kW
- Tarifa de demanda fora ponta: R$ 16,4664 /kW
- Tarifa de ultrapassagem ponta: R$ 94,2057 /kW
- Tarifa de ultrapassagem fora ponta: R$ 32,9332 /kW

Considerando ICMS=18% e PIS+COFINS=5,5%

Conforme discutido em seções anteriores deste trabalho, a otimização do contrato na modalidade tarifária azul consiste em determinar o par de demandas contratadas — ponta e fora de ponta — que minimize o custo global associado às faturas de energia elétrica nos períodos analisados. Este problema caracteriza-se como uma otimização de duas variáveis, diferentemente da modalidade verde, que envolve apenas uma variável.

Tal característica torna o problema substancialmente mais complexo, pois o número de cenários possíveis cresce consideravelmente com o aumento das combinações possíveis de demandas contratadas. Dessa forma, a utilização de um método de força bruta para explorar todas as combinações de demandas contratadas torna-se inviável, pois exigiria um tempo excessivo para identificar a solução ótima, especialmente em contextos com grande volume de dados históricos.

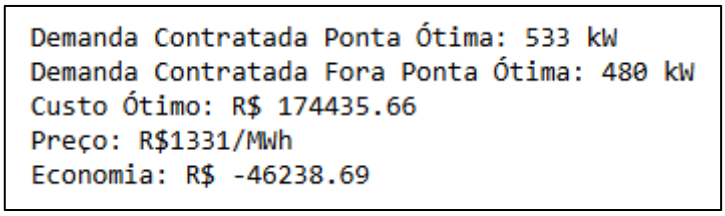
Para contornar essa limitação, foi implementado no software um algoritmo genético híbrido, projetado para identificar a solução ótima em conjunto de milhares de possibilidades com tempo de processamento reduzido. O algoritmo opera em dois estágios. No primeiro, ele funciona como um algoritmo genético convencional,

explorando o espaço de busca e apresentando a melhor solução encontrada ao término do número de gerações pré-determinado.

Entretanto, reconhecendo que a solução inicial pode ser apenas uma aproximação, o segundo estágio do algoritmo realiza uma busca local, utilizando força bruta, no entorno da solução obtida no primeiro estágio. Esse processo visa refinar a solução e determinar a solução ótima global. Embora o segundo estágio se baseie em uma busca local por força bruta, o espaço de busca a ser analisado é consideravelmente reduzido, devido à pré-seleção feita pelo algoritmo genético no estágio inicial. Essa abordagem combina a eficiência dos algoritmos genéticos para explorar e reduzir grandes espaços de busca com a precisão de métodos exatos na fase de refinamento, garantindo um equilíbrio entre desempenho computacional e qualidade dos resultados.

Na Figura 30 é ilustrado o contrato de demanda ideal, no contexto da modalidade tarifária horária azul, determinado pelo algoritmo híbrido, bem como a projeção do custo total de energia elétrica para o período de três meses analisados, considerando a implementação desse novo contrato. Adicionalmente, são apresentados o custo médio por MWh consumido e a economia estimada em relação aos custos associados à demanda contratada vigente de 420 kW, na modalidade verde.

Figura 30. Contrato de demanda ótimo dentro da modalidade tarifária horária azul.



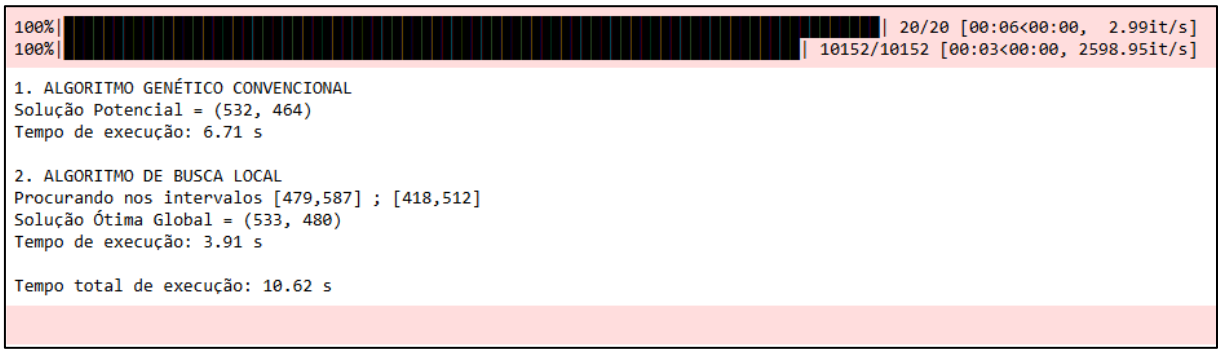
Fonte: Próprio Autor

Para o perfil de consumo analisado, o contrato de demanda ideal na modalidade azul para os postos fora de ponta e ponta foram determinados como 533 kW e 480 kW, respectivamente. Contudo, na Figura 19 destaca-se que a economia projetada é negativa, indicando que a migração para a modalidade azul não seria vantajosa economicamente. Assim, para este exemplo, conclui-se que a melhor alternativa seria manter a unidade consumidora na modalidade verde, ajustando a

demanda contratada para 533 kW, conforme discutido nas análises realizadas anteriormente.

A figura 31 apresenta a performance do algoritmo e evidencia as vantagens da hibridização.

Figura 31. Análise da performance do algoritmo genético híbrido.



Fonte: Próprio Autor

O algoritmo genético híbrido foi empregado para determinar o par ótimo de demanda contratada dentro do intervalo de [1, 800] kW, tanto para a demanda contratada ponta quanto a demanda contratada fora de ponta. Isso resultou em um espaço de busca de 640.000 possibilidades. A execução do algoritmo foi concluída após 20 gerações, utilizando uma população constante de 10 indivíduos em cada geração. O elitismo foi aplicado, preservando os 3 melhores indivíduos a cada iteração. As probabilidades de crossover e mutação foram fixadas em 80% e 25%, respectivamente.

No exemplo analisado, o primeiro estágio do algoritmo híbrido determinou uma solução potencialmente ótima para o par de demandas contratadas após as 20 gerações, com um tempo de execução de 6,71 segundos. Este estágio utilizou o algoritmo genético para explorar amplamente o espaço de busca, identificando uma solução inicial promissora.

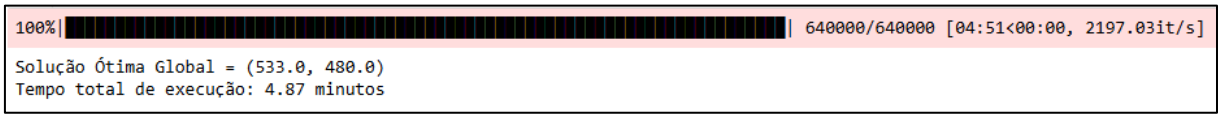
No segundo estágio, o algoritmo refinou essa solução inicial por meio de uma busca local, ajustando ambas as variáveis dentro de um intervalo de ±10% em relação aos valores obtidos no primeiro estágio. Para este exemplo, o espaço de busca para a demanda contratada no horário de ponta foi definido como [479, 587] kW, enquanto

para o horário fora de ponta foi [418, 512] kW. Portanto, esta etapa realizou 10.152 simulações, concluídas em 3,91 segundos, resultando na identificação da solução ótima global de (533, 480) kW para o par de demandas contratadas.

Assim, o algoritmo híbrido combinou a rápida redução do espaço de busca, característica dos algoritmos genéticos convencionais, com o refinamento minucioso proporcionado pela busca local, resultando em um tempo total de execução de 10,62 segundos. Essa abordagem garantiu um equilíbrio entre precisão e velocidade no processo de otimização.

As vantagens da hibridização tornam-se particularmente evidentes quando comparadas aos métodos convencionais de tentativa e erro, conforme ilustrado na Figura 32. A ausência de técnicas inteligentes de otimização faria com que a busca pela solução ótima, empregando tentativa e erro, consumisse 4,87 minutos para alcançar o mesmo resultado obtido pelo algoritmo híbrido em apenas 10,62 segundos.

Figura 32. Tempo de execução por método de tentativa e erro.



Fonte: Próprio Autor

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvido um software voltado à consultoria energética, destinado a profissionais do setor, com o objetivo de realizar a gestão eficiente de energia e implementar estratégias de otimização energética para unidades consumidoras do grupo A. O software é capaz de executar análises estatísticas detalhadas sobre o perfil de consumo da instalação, identificar a necessidade de correção do fator de potência e, quando necessário, dimensionar o banco de capacitores mais adequado. Além disso, determina a melhor modalidade tarifária e o ajuste ideal da demanda contratada, visando minimizar os custos para o cliente. A ferramenta demonstrou-se eficaz e precisa, apresentando resultados consistentes, que foram validados tanto com base na literatura de referência quanto a partir de dados pré-conhecidos. O software realizou, de maneira satisfatória, a análise estatística dos registros de memória de massa da instalação, permitindo traçar o perfil típico de consumo e demanda da unidade consumidora em diferentes momentos do dia, dias da semana e postos tarifários (ponta e fora ponta), como proposto inicialmente. Adicionalmente, o software mostrou alto desempenho na identificação da necessidade de correção do fator de potência e no dimensionamento de bancos de capacitores, tanto fixos quanto chaveados, para atender a essa demanda. O impacto do banco dimensionado sobre o perfil de fator de potência foi calculado com eficiência, permitindo verificar a conformidade do perfil resultante com as exigências da Resolução Normativa nº 1000 da ANEEL, assegurando a adequação regulatória da instalação. Os algoritmos de otimização do contrato de demanda, desenvolvidos para o projeto, também apresentaram excelente performance. Eles foram capazes de determinar soluções corretas e otimizadas, validadas por meio de simulações adicionais, em tempos de execução significativamente inferiores aos métodos tradicionais de força bruta, reafirmando a eficiência do sistema.

Para futuros aprimoramentos, propõe-se a inclusão de funcionalidades que ampliem as capacidades analíticas do software, oferecendo soluções ainda mais abrangentes para a gestão energética de unidades consumidoras do grupo A. Entre as propostas, destaca-se a realização de estudos de viabilidade econômica para migração ao mercado livre de energia, além do dimensionamento e análise de viabilidade econômica de geradores a diesel para atender à demanda no posto horário de ponta. Outra funcionalidade relevante seria a avaliação de sistemas de

armazenamento de energia, isolados ou integrados a plantas fotovoltaicas, voltados para estratégias de arbitragem e atendimento da demanda em períodos de maior custo. Por fim, recomenda-se incorporar uma funcionalidade para analisar a viabilidade técnica e econômica da instalação de controladores de demanda, consolidando o software como uma ferramenta completa para otimização energética e redução de custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2021. ***Resolução Normativa nº 1000***. 7 de dezembro de 2021. 56

[2]DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. ***Electrical Power Systems Quality***. 3. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2012.

[3]SODRÉ, Igor. ***Gestão de modalidade tarifária: um estudo de caso aplicado em uma indústria catarinense***. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

[4]BUSSAB, Wilton de Oliveira; MORETTIN, Pedro A. ***Estatística Básica***. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

[5]AFANAS'EV, V. V.; KOVALEV, V. G.; TARASOVA, V. V. et al. ***The use of statistical methods to analyze electric-energy consumption by budget institutions***. *Russian Electrical Engineering*, v. 88, n. 7, p. 443-447, 2017. DOI: 10.3103/S1068371217070045.

[6]CREDER, H. Instalações Elétricas. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

[7]WEG. **Manual para Correção do Fator de Potência.** 2009, 40p. Disponível em:<https://www.eletrica.ufpr.br/sebastiao/wa_files/Aula%2021%20-%20Manual%20correcao-do-fator-de-potencia%20WEG.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2024

[8]AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica**.

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

[10]COTRIM, A. A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009

[11]COGO, J. R.; SIQUEIRA, J. **Capacitores de potência e filtros de harmônicos**. Ciência Moderna, São Paulo, 2018.

[12]MAMEDE, J. F. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 5. ed. [S.l.]: LTC, 2019.

[13]ALEXANDER, Charles K. **Fundamentos de circuitos elétricos**. Porto Alegre: Amgh, 2013.

[14]GOLDBERG, D. E. ***Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning***. Addison-Wesley, 1989.

[15]MITCHELL, M. ***An Introduction to Genetic Algorithms***. MIT Press, 1996.

[16]DAVIS, L. ***Handbook of Genetic Algorithms***. Van Nostrand Reinhold, 1991.

[17]EL-MIHOUB, Tarek A.; HOPGOOD, Adrian A.; NOLLE, L.; BATTERSBY, A. **Hybrid genetic algorithms: a review**. *Engineering Letters*, v. 13, n. 2, p. 124-137, 2006.

[18]LUTZ, Mark. ***Learning Python***. 5. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2013.

[19]VANDERPLAS, J. ***Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data***. O'Reilly Media, 2016.

[20]JUPYTER. ***Project Jupyter Documentation***. Disponível em: <https://jupyter.org/>. Acesso em: 26 nov. 2024.

[21]ANACONDA INC. ***Anaconda Distribution Documentation***. Disponível em: https://www.anaconda.com. Acesso em: 3 nov. 2024.