

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

YAN ADEMAR INVERNIZZI

Avaliação experimental da modelagem de cargas residenciais utilizando a
representação ZIP em estudos de fluxo de potência em sistemas de distribuição

UBERLÂNDIA/MG

2026

YAN ADEMAR INVERNIZZI

Avaliação experimental da modelagem de cargas residenciais utilizando a representação ZIP em estudos de fluxo de potência em sistemas de distribuição

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Distribuição de Energia Elétrica

Orientador: José Rubens Macedo Junior

UBERLÂNDIA/MG

2026

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha família, aos meus amigos, e a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Paulo e Sandra, que sempre me apoiaram, aconselharam e motivaram ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Agradeço pela paciência, pelo carinho e pelo suporte incondicional nos mais diversos momentos vividos até aqui. Vocês são a minha maior inspiração e o motivo pelo qual sigo, todos os dias, trilhando meu caminho com honestidade e determinação.

À minha avó, Deolinda, pelo constante apoio e incentivo durante esta jornada. Nossas ligações semanais, especialmente aos sábados, foram de grande importância para mim e sempre me trouxeram conforto e motivação.

À minha irmã, Lohany, por estar ao meu lado em todas as fases da minha vida. Sou grato pelo apoio, pela paciência e pelo carinho, especialmente nos momentos de dúvidas, crises e reflexões.

Aos meus amigos, Maria de Fátima e Natan, pela parceria, pelos conselhos e pelos ensinamentos ao longo desta caminhada. Agradeço profundamente pelo companheirismo e pelo apoio constante. Desejo a ambos uma trajetória repleta de conquistas e realizações.

Ao Prof. Dr. Pedro Henrique, por ter me proporcionado a oportunidade de ingressar no Laboratório de Distribuição de Energia (LADEE) e pela orientação durante minha primeira iniciação científica. Sou grato pelos ensinamentos, pela confiança, pelas oportunidades e pela amizade. Sua contribuição foi essencial para a minha formação.

Ao Prof. Dr. José Rubens, por quem sempre tive grande admiração no meio acadêmico, admiração essa que se fortaleceu ainda mais após conhecê-lo pessoalmente. Agradeço pelo apoio, pela confiança, pelos conselhos e pelas oportunidades concedidas. Sua influência foi determinante na construção do caminho que sigo hoje, e espero que continue inspirando e contribuindo com a formação de inúmeros alunos e com o avanço da ciência.

Aos meus familiares de Sertãozinho, pelo apoio constante ao longo dessa trajetória. Agradeço pelas conversas, pelos momentos compartilhados durante as férias e por toda a ajuda nos deslocamentos entre Sertãozinho e Uberlândia.

Aos meus amigos de Sertãozinho que, mesmo com a distância, se mantiveram presentes nos momentos importantes. Desejo que sigam suas jornadas com alegria e conquistem tudo aquilo que almejam.

À Universidade Federal de Uberlândia, por me proporcionar a oportunidade de trilhar uma trajetória tão rica em aprendizados, experiências, encontros e oportunidades. Levarei comigo, por toda a vida, o orgulho de ter feito parte desta instituição. Espero que as futuras gerações reconheçam e valorizem sua importância, e que eu possa honrar seu nome por onde quer que eu siga.

*“Há muitas pessoas de visão perfeita que nada veem. O ato de ver não é coisa natural. Precisa ser aprendido.”
(Rubens Alves)*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO.....	13
1. INTRODUÇÃO:	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (MODELOS DE CARGA):	19
2.1 Modelo de impedância constante	21
2.2 Modelo de potência constante:	27
2.3 Modelo de corrente constante:	29
2.4 Exemplo de Fluxo de potência utilizando diferentes modelos de carga:	33
2.4.1) Solução considerando carga como impedância constante:	35
2.4.2) Solução considerando carga como potência constante:	41
2.4.3) Solução considerando carga como corrente constante:	49
2.4.4) Conclusões e interpretações acerca das resoluções realizadas:	51
2.5 Modelo polinomial (ZIP):	53
3. OPENDSS:	57
3.1 O que é? Oque permite realizar?:	57
3.2 Modelos de cargas disponíveis:	59
3.3 Metodologias de fluxo de potência:	67
5. OPORTUNIDADE DE MELHORIA NA ATUAL METODOLOGIA EMPREGADA PELO MODULO 7 PARA CÁLCULO DE PERDAS:	71
5.1 Modelo atualmente utilizado:	73
5.3 Obtenção das composições zip para equipamentos tipicamente presentes nas residências brasileiras:.....	79
5.5 Resultados:	109
6. CONCLUSÃO:.....	111
7. REFERÊNCIAS:	117
8. APENDICE:	119

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 - Triângulo de potências (A) e triângulo de impedâncias (B).....	23
Fig. 2 - Relação corrente e tensão (modelo de carga – impedância constante)	25
Fig. 3 - Relação potências (ativa e reativa) e tensão (modelo de carga – impedância constante).....	26
Fig. 4 - Relação corrente e tensão (modelo de carga – Potência Constante).....	28
Fig. 5 - Relação potência e tensão (modelo de carga – Potência Constante)	29
Fig. 6 - Relação potência e tensão (modelo de carga – Corrente Constante)	31
Fig. 7 - Relação corrente e tensão (modelo de carga – Corrente Constante)	31
Fig. 8 - Circuito simplificado para aplicação dos modelos de carga.....	33
Fig. 9 - Circuito simplificado para aplicação dos modelos de carga.....	34
Fig. 10 - Progressão dos erros ao longo das iterações realizadas para o método de Gauss.	48
Fig. 11 - Modelo típico representativo de um elemento “Power Delivery Elements”	59
Fig. 12 - Modelo típico representativo de um elemento “Power Conversion Elements”. ..	60
Fig. 13: Modelo dos elementos PCs visualizado pelo software.	61
Fig. 14 - Visualização do comportamento completo de uma carga com as variáveis V_{minPU} , V_{maxPU} , V_{lowPU}	65
Fig. 15: Definição de carga.....	66
Fig. 16 - Definição de Carga, modelo ZIP.....	67
Fig. 17 - Circuito secundário trabalhado, referenciado de forma geográfica.	70
Fig 18 - Definição de carga para a metodologia atual.....	73
Fig. 19 - Definição de carga para a metodologia Sugerida (Modelo 8).	74
Fig. 20 - Fonte Controlada utilizada no devido experimento.	80
Fig. 21 - Circuito Medidor utilizado no devido experimento.	81
Fig. 22 - Bancada utilizada para aferição de resultados e realização experimental.....	83
Fig. 23 - Conexão medidor e computador após medição.....	83
Fig. 24 - Area de realização dos experimentos.....	84
Fig. 25 - Software que permite a configuração da fonte utilizada.....	84
Fig 26 - Dispositivos em momento de medição.	85
Fig 27 - Software utilizado para exportação das medições realizadas - Sapphire.....	86
Fig 28 - Arquivo Excel com informações exportadas.	86
Fig. 29 - Potência ativa do equipamento Geladeira.	87
Fig. 30 - Potência ativa com a aplicação da metodologia.	88

Fig. 31 - Variações das variáveis cabíveis a tratamento.....	89
Fig. 32 - Comportamentos obtidos - PT 1.	90
Fig. 33 - Comportamentos obtidos - PT 2.	90
Fig. 34 - Comportamentos obtidos - PT 3.	91
Fig. 35 - Comportamentos obtidos - PT 4.	91
Fig. 36 - Comportamentos obtidos - PT 5.	92
Fig. 37 - Comportamentos obtidos PT - 6.	92
Fig. 38 - Comportamentos obtidos PT - 7.	93
Fig. 39 - Comportamentos obtidos PT - 7.	93
Fig. 40 - Estrutura de medição adaptada ao quadro residencial.	95
Fig. 41 - Comportamento e coeficientes ZIP, chuveiro eletrônico, PT - 1.....	96
Fig. 42 - Comportamento e coeficientes ZIP, chuveiro eletrônico, PT - 2.....	96
Fig. 43 - Exemplo de variação de tensão aplicada ao chuveiro.	97
Fig. 44 - Ciclos de variação de tensão aplicados a máquina de lavar.	98
Fig. 45 - Modelo de variação implementado em cada ciclo.	98
Fig. 46 - Modelo comportamental, ciclo 1.	99
Fig. 47 - Modelo comportamental, ciclo 2 e 3.	99
Fig. 48 - Modelo comportamental, ciclo 4.	99
Fig. 49 - Modelo comportamental - Geladeira inverter.	101
Fig. 50 - Modelo comportamental – Ar-condicionado.	101
Fig. 51- Exemplos climáticos (Pressão x Umidade)	120
Fig. 52 - Regressão linear (Pressão x Umidade)	121
Fig. 53 - Regressão polinomial (Pressão x Umidade)	122
Fig. 54 - Valor médio obtido para cálculo da variação dos pontos experimentalmente obtidos em relação a seu valor médio.	124
Fig. 55 - Valor médio obtido para cálculo da variação dos pontos experimentalmente obtidos em relação ao valores obtidos pela curva estimada pela regressão realizada.	125
Fig. 56 - QR-CODE	129

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Resposta método iterativo de Gauss	47
Tabela II: iterações modelo de carga corrente constante	50
Tabela III - Comparativo entre modelos	51
Tabela IV - Resultados Obtidos utilizando metodologia ANEEL(Modelos 2 e 3).....	78
Tabela V - Resultados Obtidos utilizando metodologia recomendada (Modelo 8).	78
Tabela VI - Equipamentos Analisados.....	82
Tabela VII - Coeficientes ZIPs obtidos.....	93
Tabela VIII: Indicadores qualitativos das regressões realizadas	94
Tabela IX - Coeficientes ZIP, Máquina de lavar	100
Tabela X - Índices Qualitativos, Máquina de lavar.....	100
Tabela XI - Modelo ZIP, Geladeira Inverter e Ar-Condicionado	102
Tabela XII - Índices Qualitativos, Geladeira Inverter e Ar-Condicionado	102
Tabela XIII - Modelos ZIP dos equipamentos utilizados para o modelo final	104
Tabela XIV - Informações acerca do consumo anual dos equipamentos utilizados.....	106
Tabela XV - Modelo equivalente ZIP obtido	107
Tabela XVI - Modelo equivalente variante	108
Tabela XVII - Comparação de resultados	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
OpenDSS	<i>Open-Source Distribution System Simulator</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo propor uma modelagem de cargas residenciais mais aderente à realidade, com base na representação ZIP implementada no modelo 8 do *software* OpenDSS. O modelo ZIP é composto por três parcelas associadas aos comportamentos de impedância constante, potência constante e corrente constante, as quais definem a relação entre a potência elétrica ativa e reativa e a variação da tensão aplicada à carga.

Para a obtenção de uma composição representativa, são analisados experimentalmente os comportamentos $P \times V$ e $Q \times V$ de equipamentos comumente presentes nas residências brasileiras, permitindo não apenas verificar a aderência desses equipamentos aos modelos clássicos de carga ZIP, mas também quantificar o grau de participação associado a cada componente do modelo (impedância constante, corrente constante e potência constante) sempre que tal aderência for comprovada.

A partir dos resultados experimentais obtidos, foi proposta uma modelagem agregada de carga mais aderente às características reais do consumo residencial brasileiro, incorporando de forma explícita a contribuição predominante de cada componente ZIP observada nos diferentes equipamentos analisados. Essa abordagem permite não apenas aprimorar a representação elétrica das cargas em estudos computacionais, mas também avaliar de forma crítica os impactos da modelagem adotada nos resultados de cálculo das perdas técnicas em sistemas de distribuição.

Por fim, a modelagem proposta é comparada à abordagem atualmente adotada pela ANEEL no processo de cálculo das perdas técnicas da distribuição [módulo 7 do PRODIST], evidenciando algumas limitações existentes na abordagem regulatória, tais como a utilização de composições genéricas de carga e a maior complexidade associada à sua implementação. Os resultados obtidos demonstram que o modelo proposto apresenta maior representatividade do comportamento real das cargas, além de menor esforço computacional, configurando-se, portanto, como uma alternativa mais adequada e eficiente para estudos de perdas em sistemas de distribuição.

Palavras-chave: Modelos de carga. Unidades consumidoras residenciais. Modelos de carga ZIP. OpenDSS. Perdas Técnicas. ANEEL.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to propose a residential load modeling approach more closely aligned with real-world conditions, based on the ZIP representation implemented in Model 8 of the OpenDSS software. The ZIP model is composed of three components associated with constant impedance, constant power, and constant current behaviors, which define the relationship between active and reactive electrical power and the variation of the voltage applied to the load.

In order to obtain a representative composition, the $P \times V$ and $Q \times V$ behaviors of equipment commonly found in Brazilian households are experimentally analyzed, allowing not only the verification of the adherence of such equipment to classical ZIP load models, but also the quantification of the degree of participation associated with each model component (constant impedance, constant current, and constant power) whenever such adherence is confirmed.

Based on the experimental results obtained, an aggregated load model more representative of the actual characteristics of Brazilian residential consumption was proposed, explicitly incorporating the predominant contribution of each ZIP component observed in the different analyzed devices. This approach not only improves the electrical representation of loads in computational studies, but also enables a critical assessment of the impacts of the adopted modeling on the calculation results of technical losses in distribution systems.

Finally, the proposed modeling approach is compared with the methodology currently adopted by ANEEL in the process of calculating technical losses in distribution systems [Module 7 of PRODIST], highlighting some limitations of the regulatory approach, such as the use of generic load compositions and the greater complexity associated with its implementation. The obtained results demonstrate that the proposed model provides a more representative characterization of actual load behavior while requiring lower computational effort, thus constituting a more suitable and efficient alternative for technical loss studies in distribution systems.

Keywords: Load models. Residential consumer units. ZIP load models. OpenDSS. Technical losses. ANEEL.

1. INTRODUÇÃO:

Uma representação adequada das cargas presentes em um sistema elétrico é de fundamental importância para a correta determinação de suas características operacionais. Dentre essas características, destacam-se os níveis de tensão, as análises de perdas técnicas, as correntes de linha nos diversos elementos da rede e, conseqüentemente, as potências ativas e reativa circulantes pelo sistema como um todo.

Diante do exposto, é possível afirmar que a utilização de modelos de carga simplificados ou não representativos da realidade pode introduzir imprecisões significativas nas análises realizadas, afetando diretamente os resultados dos parâmetros anteriormente mencionados. Além disso, tais imprecisões podem acarretar dificuldades de convergência nos métodos de fluxo de potência adotados em alguns estudos, a exemplo do cálculo das perdas técnicas da distribuição, bem como levar a interpretações equivocadas sobre o comportamento dos sistemas analisados.

Ao longo dos anos, a definição de um modelo único para a representação das diversas cargas presentes nos sistemas elétricos tornou-se praticamente inviável. Isso se deve não apenas à elevada diversidade de cargas, mas também à variação de seus perfis de operação ao longo do dia. Soma-se a esse cenário a crescente presença de dispositivos baseados em eletrônica de potência, como lâmpadas LED e fontes de alimentação de equipamentos eletrônicos, os quais introduzem comportamentos significativamente não lineares no sistema. Ademais, é importante destacar que cada unidade consumidora apresenta um perfil de carga próprio, o qual, em muitos casos, não pode ser completamente caracterizado nem mesmo por meio de campanhas de medição.

Em suma, observa-se que a escolha do modelo de carga a ser adotado deve ser realizada de forma criteriosa, a fim de evitar a introdução de vieses ou imprecisões nos resultados, especialmente em estudos de fluxo de potência para análise de perdas técnicas. Dessa forma, busca-se garantir resultados fidedignos e com um nível adequado de consistência e confiabilidade, compatíveis com as condições reais de operação das cargas reais conectadas aos sistemas de distribuição de energia elétrica em baixa tensão.

Nesse contexto, atualmente, o modelo de carga clássico do tipo ZIP é amplamente adotado em estudos de fluxo de carga, uma vez que possibilita a representação de diferentes comportamentos para uma mesma carga, por meio da combinação de parcelas de impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P). Tal

característica o torna compatível com a natureza heterogênea das cargas presentes em uma mesma unidade consumidora. No contexto regulatório brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica, por meio do Módulo 7 do PRODIST, recomenda, para sistemas de distribuição em média e baixa tensão, a adoção de uma modelagem de carga em que a potência reativa seja integralmente representada como impedância constante, enquanto a potência ativa seja composta por 50% de potência constante e 50% de impedância constante.

Nesse contexto, o presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo analisar o modelo de carga atualmente adotado no cálculo das perdas técnicas da distribuição, bem como discutir possíveis melhorias nos modelos utilizados.

Para esse propósito, serão realizados ensaios de laboratório com o objetivo de confirmar a aderência de diferentes cargas domésticas aos modelos clássicos do tipo ZIP, assim como quantificar, quando pertinente, as características dessas cargas a cada componente do modelo (impedância constante, corrente constante e potência constante).

A partir dos resultados obtidos, será proposta uma nova composição do modelo ZIP, com o intuito de representar de forma mais realista o comportamento das unidades consumidoras residenciais. Por fim, a organização deste trabalho está estruturada da seguinte forma: A seção 2 apresenta uma fundamentação teórica acerca dos modelos estáticos de cargas e o modelo de carga ZIP utilizado atualmente pela ANEEL. A seção 3 apresenta o software OpenDSS atualmente utilizado pela ANEEL em seus cálculos de perdas e também tomado como referência neste documento para a obtenção de resultados. A seção 4 traz um panorama geral do circuito secundário de baixa tensão, localizado na cidade de Palmas-TO, modelado em arquivos DSS, que foi utilizado como referência para obtenção dos resultados alcançados neste documento. A seção 5 discorre sobre as melhorias sugeridas por este trabalho relacionada a modelagem das cargas utilizando o então modelo ZIP anteriormente discorrido nas seções anteriores e disponível no software OpenDSS e sua composição. Por fim, a seção 6 inicialmente resume toda motivação e processos realizados nas atividades percorridas nas seções anteriores, apresenta resultados e conclui o trabalho realizado. Além disso, a seção 7, direcionada aos apêndices deste documento, aborda algumas conceitualizações estatísticas utilizadas ao longo do trabalho como regressão polinomial e seus indicadores qualitativos além de trazer um QR-CODE que direciona o leitor a um repositório do Github com todos os códigos e arquivos utilizados ao longo deste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (MODELOS DE CARGA):

A fundamentação teórica necessária para o adequado entendimento deste trabalho baseia-se nos chamados modelos clássicos de carga, amplamente utilizados nos sistemas elétricos de potência. Esses modelos são, basicamente:

- Modelo de impedância constante.
- Modelo de potência constante.
- Modelo de corrente constante.

Esses três modelos clássicos apresentam diferentes formas de dependência entre as grandezas elétricas e a tensão aplicada à carga. De modo geral, o modelo de impedância constante caracteriza cargas que estabelecem uma relação linear entre tensão e corrente. Além disso, quando analisadas as potências ativa e reativa, ambas variam quadraticamente com a tensão aplicada. No modelo de potência constante, como o próprio nome sugere, a potência se mantém constante independentemente da variação da tensão, desde que esta permaneça dentro de determinados limites operacionais definidos. Cargas dessa natureza normalmente incorporam mecanismos de controle para garantir essa relação entre as grandezas elétricas. Por fim, o modelo de corrente constante é caracterizado pela manutenção praticamente constante da corrente absorvida pela carga frente a variações da tensão de alimentação. Nessas condições, as potências ativa e reativa passam a variar aproximadamente de forma linear com a tensão aplicada. Esse comportamento é frequentemente associado a equipamentos eletrônicos e dispositivos dotados de controle parcial da corrente de entrada.

Embora simplificados, esses três modelos constituem a base para o entendimento de representações mais complexas, como o modelo ZIP, anteriormente citado, e o modelo exponencial. A seguir, será realizada uma análise matemática mais detalhada de cada um desses modelos, ressaltando suas particularidades e as relações entre as grandezas elétricas envolvidas.

2.1 Modelo de impedância constante

O modelo de impedância constante, como o próprio nome sugere, representa a carga por meio de uma impedância fixa, independentemente da tensão aplicada, sendo adequado para descrever cargas lineares, como resistores, capacitores e indutores.

Do ponto de vista prático, esse modelo apresenta boa aplicabilidade na representação de cargas predominantemente resistivas, amplamente presentes em equipamentos como fornos elétricos, chuveiros elétricos e aquecedores.

Nesse contexto, a impedância associada a cargas dessa natureza pode ser expressa por:

$$\hat{Z} = R \pm jX = Z \angle \phi \quad (1)$$

Onde,

$\hat{Z}$ = Impedância complexa, expressa em Ω (ohms).

R = Resistência, expressa em Ω (ohms).

X = Reatância (indutiva ou capacitiva), expressa em Ω (ohms).

Z = Amplitude da impedância, expressa em Ω (ohms).

ϕ = Ângulo de fase da impedância, em graus.

Para a obtenção de seus parâmetros elétricos (corrente, tensão e potência), cargas modeladas segundo essa abordagem podem ser analisadas de forma direta, sem a necessidade de formulações complexas.

Assim, considerando uma tensão eficaz aplicada à carga, a corrente por ela absorvida pode ser determinada por meio da Lei de Ohm. Ressalta-se que todas as análises são realizadas no domínio da frequência e utilizando valores eficazes:

$$\hat{I} = \frac{\hat{V}}{\hat{Z}} \quad (2)$$

Ou, de maneira mais explícita, tem-se:

$$I = \frac{V \angle \phi}{Z \angle \phi} = \frac{V}{Z} \angle (\theta - \phi) \quad (3)$$

A equação (3) demonstra que, conforme discutido anteriormente, o módulo da corrente apresenta uma relação diretamente proporcional ao módulo da tensão, considerando uma impedância constante.

Além disso, como a impedância permanece constante, de modo que a defasagem entre a tensão e a corrente define o ângulo de fase da carga, conclui-se que, para essa modelagem, a defasagem entre essas grandezas também permanece constante, sendo igual ao ângulo da impedância da carga.

Essa relação pode ser evidenciada pela equação a seguir:

$$\angle V - \angle I = \theta - (\theta - \phi) = \phi \quad (4)$$

Buscando uma relação entre a tensão e a potência complexo da carga, temos:

$$\hat{S} = P + jQ = \dot{V} \times \dot{I}^* \quad (5)$$

Substituindo a equação de corrente obtida anteriormente (3) na equação (5), temos:

$$\hat{S} = \dot{V} \times \dot{I}^* = \dot{V} \times \frac{\dot{V}^*}{\hat{Z}^*} \quad (6)$$

Prosseguindo com a demonstração, ainda é possível obter:

$$\hat{S} = \dot{V} \times \frac{\dot{V}^*}{\hat{Z}^*} = V \angle \theta \times \frac{V}{\hat{Z}} \angle (-\theta + \phi) = \frac{V^2}{\hat{Z}} \angle \phi \quad (7)$$

Logo, sabendo que $\hat{Z}^*$ é igual a $(R - jX)$, é também possível obter:

$$\hat{S} = \frac{V^2}{\hat{Z}^*} = \frac{V^2}{R - jX} \quad (8)$$

A equação (7) demonstra que o módulo da potência aparente, a qual relaciona as potências ativa e reativa consumidas pela carga, varia proporcionalmente ao quadrado da tensão aplicada, conforme mencionado na introdução deste tópico, mantendo um ângulo de potência constante, igual ao ângulo característico da carga (ϕ).

A fim de separar as componentes de potência ativa e reativa a partir de (8), utiliza-se o triângulo de potências(A)/impedâncias(B) apresentado a seguir:

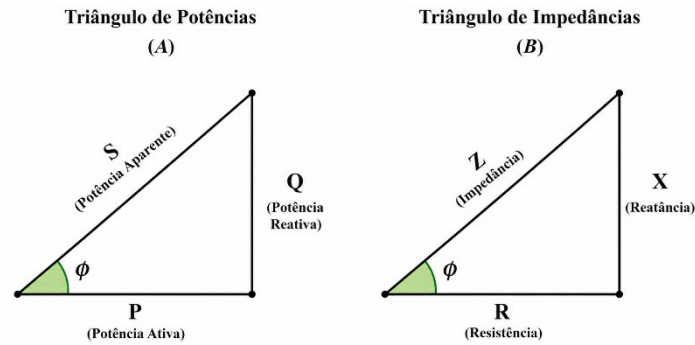


Fig. 1 - Triângulo de potências (A) e triângulo de impedâncias (B)

Sabendo o valor da amplitude da potência aparente (7), e do ângulo de potência determinado pela carga, pode-se chegar, por meio de expressões trigonométricas, nas expressões abaixo que relacionam potência ativa e reativa com as variáveis conhecidas:

$$\cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (9)$$

$$\sen(\phi) = \frac{Q}{S} \quad (10)$$

Isolando-se P e Q e substituindo-se em (8) é possível obter:

$$P = S \times \cos(\phi) = \frac{V^2}{|R - jX|} \times \cos(\phi) \quad (11)$$

$$Q = S \times \sen(\phi) = \frac{V^2}{|R - jX|} \times \sen(\phi) \quad (12)$$

A fim de transformar a equação de potência ativa e reativa obtida anteriormente somente em função de resistência, reatância e tensão é se substituído os valores de $\cos(\phi)$ e $\sen(\phi)$ pelas suas igualdades obtidas pela manipulação, também trigonométrica, do triângulo agora de impedâncias [Fig. 1(B)].

Com a manipulação trigonométrica do triângulo de impedâncias observado na Figura 1 deste documento é possível obter que o $\cos(\phi)$ e $\sen(\phi)$ valem:

$$\cos(\phi) = \frac{R}{|Z|} = \frac{R}{|R - jX|} \quad (13)$$

$$\sen(\phi) = \frac{X}{|Z|} = \frac{X}{|R - jX|} \quad (14)$$

Substituindo-se (13) e (14) nas equações (11) e (12), tem-se:

$$P = \frac{V^2}{|R - jX|} \times \cos(\phi) = \frac{V^2}{|R - jX|} \times \frac{R}{|R - jX|} = \frac{V^2 \times R}{|Z|^2} \quad (15)$$

$$Q = \frac{V^2}{|R - jX|} \times \sin(\phi) = \frac{V^2}{|R - jX|} \times \frac{X}{|R - jX|} = \frac{V^2 \times X}{|Z|^2} \quad (16)$$

Resultando,

$$P = \frac{V^2 \times R}{|Z|^2} = \frac{V^2 \times R}{R^2 + X^2} \quad (17)$$

$$Q = \frac{V^2 \times X}{|Z|^2} = \frac{V^2 \times X}{R^2 + X^2} \quad (18)$$

Assim, a partir das expressões obtidas, observa-se que ambas as potências, ativa e reativa, associadas a cargas modeladas como impedância constante apresentam uma relação quadrática com a tensão aplicada.

Em síntese, o modelo de carga de impedância constante fornece uma representação matemática simples e numericamente robusta para a caracterização de cargas lineares em regime permanente. Essa tipologia, em sua essência, estabelece relações bem definidas entre as grandezas elétricas envolvidas: a corrente varia proporcionalmente à tensão, enquanto as potências ativa e reativa apresentam dependência quadrática em relação à tensão, conforme demonstrado anteriormente.

A fim de fornecer uma representação visual dos comportamentos anteriormente descritos, foi desenvolvido um código em Python que, ao ser executado, seleciona valores aleatórios de resistência e reatância, sendo esta última considerada, no presente caso, como indutiva. A resistência varia entre 10 Ω e 100 Ω , enquanto a reatância assume valores entre 5 Ω e 50 Ω , compondo, ao final, uma impedância equivalente. A partir dessa impedância, são obtidas as relações entre corrente e potência (ativa e reativa) em função da variação da tensão.

Para a simulação da variação da tensão, foi definido um vetor com 100 pontos, distribuídos no intervalo de 0 a 220 V.

Para a implementação do código, utilizou-se a biblioteca *NumPy*, um pacote de código aberto amplamente empregado em computação numérica na linguagem Python, que oferece diversas funcionalidades, como manipulação eficiente de vetores, geração de números aleatórios e operações de álgebra linear. Destaca-se que seu desempenho é elevado devido à otimização interna em linguagem C.

Adicionalmente, para fins de visualização dos resultados, foi utilizada a biblioteca *Matplotlib*, a qual permite a criação de diferentes tipos de gráficos estáticos, animados e interativos.

O código relativo a esta ação pode ser acessado no QR-CODE presente nos apêndices deste documento.

Adotando um valor de resistência igual a $87,91\ \Omega$, reatância igual a $29,50\ \Omega$, foi obtido os seguintes gráficos comportamentais:

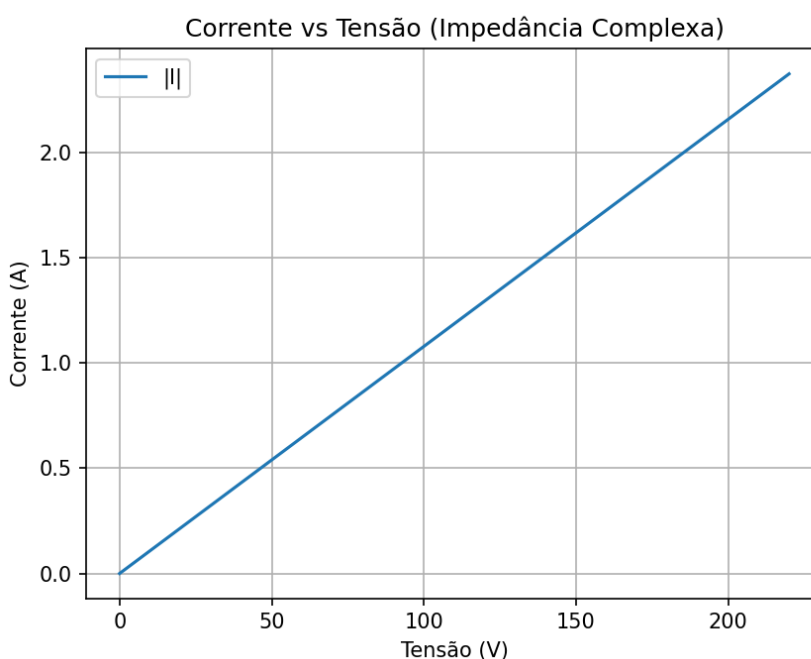


Fig. 2 - Relação corrente e tensão (modelo de carga – impedância constante)

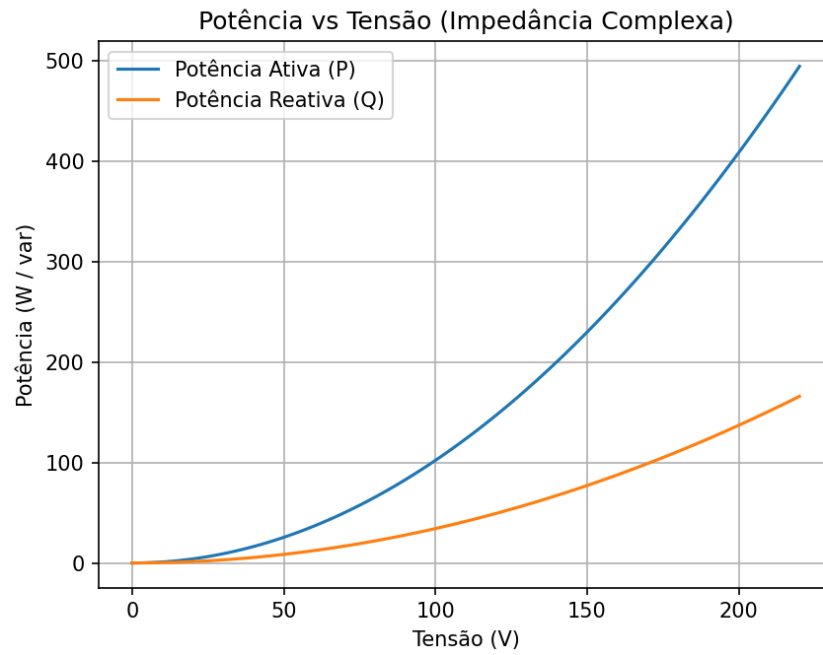


Fig. 3 - Relação potências (ativa e reativa) e tensão (modelo de carga – impedância constante)

2.2 Modelo de potência constante:

Como o próprio nome sugere, diferentemente do modelo anterior, no qual a impedância é mantida constante, neste modelo a variável que permanece invariável é a potência complexa associada à carga. Conforme estabelecido na teoria básica de circuitos elétricos, a potência complexa é dada por:

$$\hat{S} = P + jQ = S \angle \phi \quad (19)$$

Sabendo que a potência complexa, conforme já discutido anteriormente, pode ser expressa por:

$$\hat{S} = \dot{V} \times \dot{I}^* \quad (20)$$

Adotando uma tensão genérica representada por $\dot{V} = V \angle \theta$ e isolando a corrente a partir da equação (número), obtém-se:

$$\dot{I} = \frac{\hat{S}^*}{\dot{V}^*} = \frac{S \angle \phi}{V \angle \theta} = \frac{S}{V} \angle (\theta - \phi) \quad (21)$$

A equação (21) demonstra que, para cargas modeladas com potência complexa constante, a corrente varia de forma inversamente proporcional à tensão. Além disso, assim como no modelo anterior, a potência complexa constante implica a manutenção do ângulo de potência característico da carga, ou seja, a defasagem entre tensão e corrente permanece constante.

Esse modelo pode ser utilizado para representar determinados tipos de cargas presentes nos sistemas atuais, como motores operando sob carga constante e dispositivos eletrônicos baseados em fontes chaveadas, advindos de estudos da área de eletrônica de potência.

A seguir, assim como realizado para o modelo anterior, com o objetivo de fornecer uma visualização do comportamento das grandezas elétricas (potência e corrente) em função da tensão, utiliza-se a linguagem Python em conjunto com as bibliotecas NumPy e Matplotlib. O código desenvolvido simula um motor de médio porte, considerando uma potência ativa nominal de 10 kW e fator de potência igual a 0,85 indutivo, resultando em uma potência complexa dada por:

$$\tan^{-1}(\phi) = \frac{Q}{P} \quad (22)$$

Isolando Q, temos:

$$Q = P \times \tan^{-1}(\phi) = 10kW \times \tan^{-1}(\phi) \quad (23)$$

Sabendo que $\phi = \cos^{-1}(fp)$, temos:

$$\phi = \cos^{-1}(0,85) = 31,79 \quad (24)$$

$$Q = 10kW \times \tan^{-1}(31,79) = 6,2 \text{ kvar} \quad (25)$$

Resulta-se, portanto, em uma potência complexa constante, considerando a operação do motor sob carga nominal, igual a $10 \text{ kW} + j6,2 \text{ kvar}$. Diante disso, apresenta-se, a seguir, o comportamento das grandezas elétricas, potência e corrente, em função da variação da tensão para o caso em análise.

O código relativo a esta ação pode ser acessado no QR-CODE presente nos apêndices deste documento.

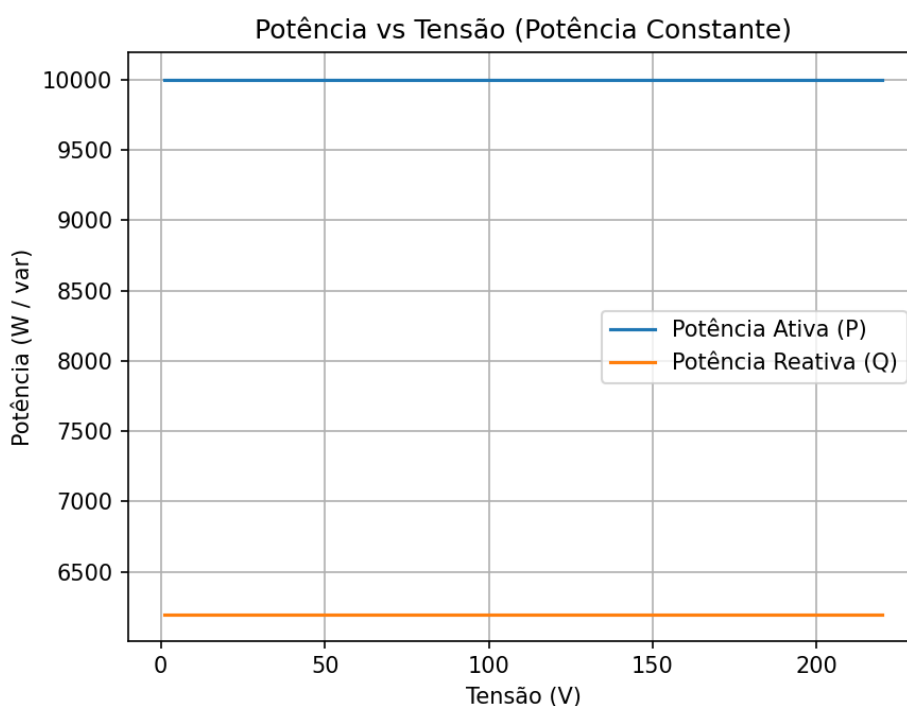


Fig. 4 - Relação corrente e tensão (modelo de carga – Potência Constante)

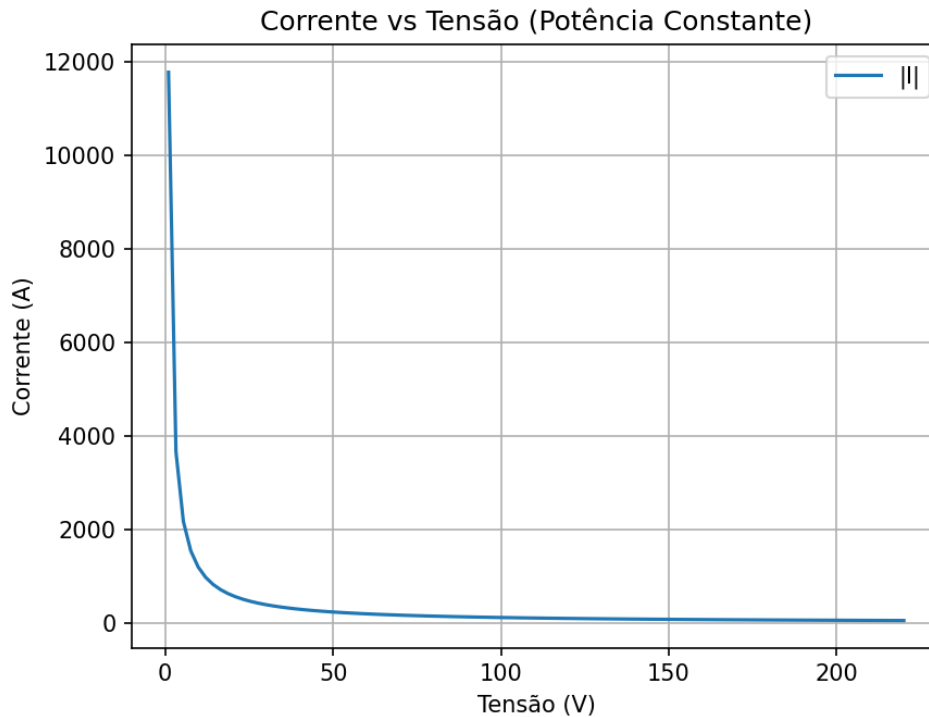


Fig. 5 - Relação potência e tensão (modelo de carga – Potência Constante)

2.3 Modelo de corrente constante:

O modelo agora apresentado diferencia-se dos anteriores por considerar que a magnitude da corrente absorvida pela carga permanece constante, ou aproximadamente constante, independentemente da tensão aplicada pela rede, desde que respeitados os limites operacionais especificados pelo fabricante.

Assim como no modelo anterior, cargas representadas por essa abordagem são, em geral, dotadas de fontes internas com controle eletrônico, como retificadores controlados e fontes chaveadas de diferentes naturezas.

Dessa forma, considerando uma corrente constante e uma tensão genérica representada por $\vec{V} = V\angle\theta$, obtém-se, a partir da equação da potência aparente (20), a expressão da corrente ao se realizar o devido isolamento:

$$\vec{i} = \frac{\hat{S}^*}{\vec{V}} = \frac{S\angle -\phi}{V\angle -\theta} = \frac{S}{V}\angle(\theta - \phi) = I\angle(\theta - \phi) \quad (26)$$

Ressalta-se que, no modelo em questão, ao se afirmar que a corrente é constante, tal consideração aplica-se apenas ao seu módulo. Nesse caso, como a impedância e a potência tornam-se variáveis, o ângulo de potência também passa a variar continuamente,

seja em função dos mecanismos de controle eletrônico responsáveis por manter a característica da carga, seja devido a variações no ponto de operação da tensão aplicada.

Para fins de análise em regime permanente, adotando-se uma defasagem constante entre tensão e corrente, a potência complexa, nesse caso, pode ser expressa por:

$$\hat{S} = \dot{V} \times I^* = V \angle \theta \times I \angle -(\theta - \phi) = (V \times I) \angle \phi \quad (27)$$

As equações (26) e (27), anteriormente desenvolvidas para esse modelo, demonstram que, para que a condição de corrente constante seja atendida, o módulo da potência deve variar linearmente com a tensão aplicada.

Assim como nos casos anteriores, foi desenvolvido um código em linguagem Python com o objetivo de demonstrar o comportamento das grandezas elétricas da carga (corrente e potência) em função da variação da tensão. No presente caso, contudo, surge um desafio adicional que dificulta uma representação mais realista dessa tipologia: a variação contínua do ângulo de potência em função da tensão aplicada, conforme discutido anteriormente, decorrente dos mecanismos de controle eletrônico associados à carga.

Com o intuito de viabilizar uma análise mais simplificada, adotou-se, neste estudo, um fator de potência constante igual a 0,85 e uma corrente fixa de 50 A. A seguir, apresentam-se as representações gráficas do comportamento da corrente e das potências ativa e reativa em função da variação da tensão, utilizando as mesmas bibliotecas dos casos anteriores.

O código relativo a esta ação pode ser acessado no QR-CODE presente nos apêndices deste documento.

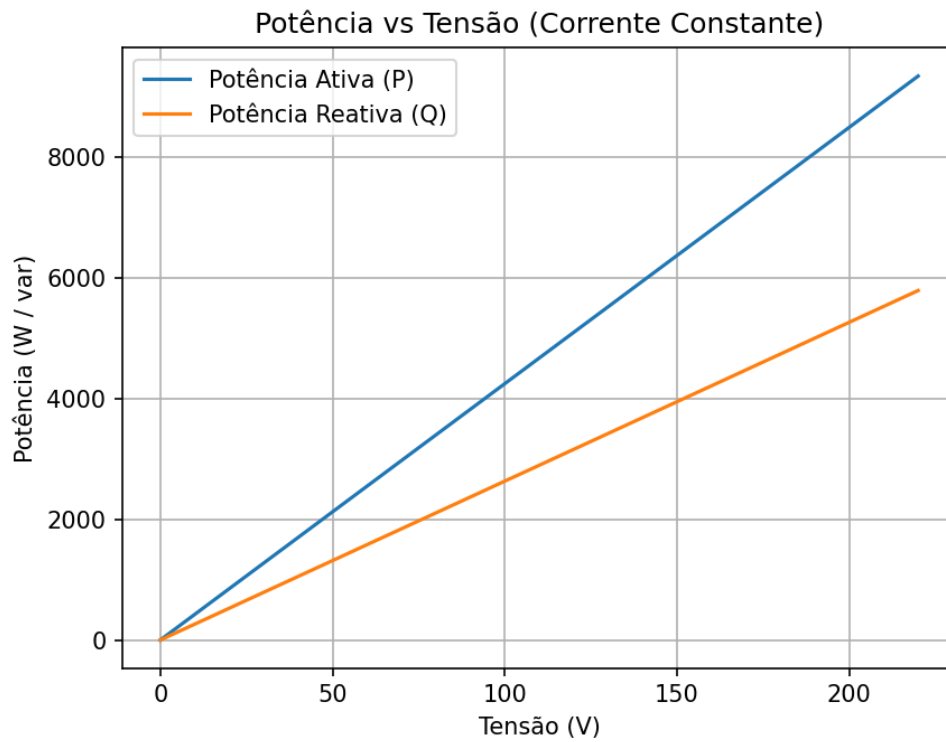


Fig. 6 - Relação potência e tensão (modelo de carga – Corrente Constante)

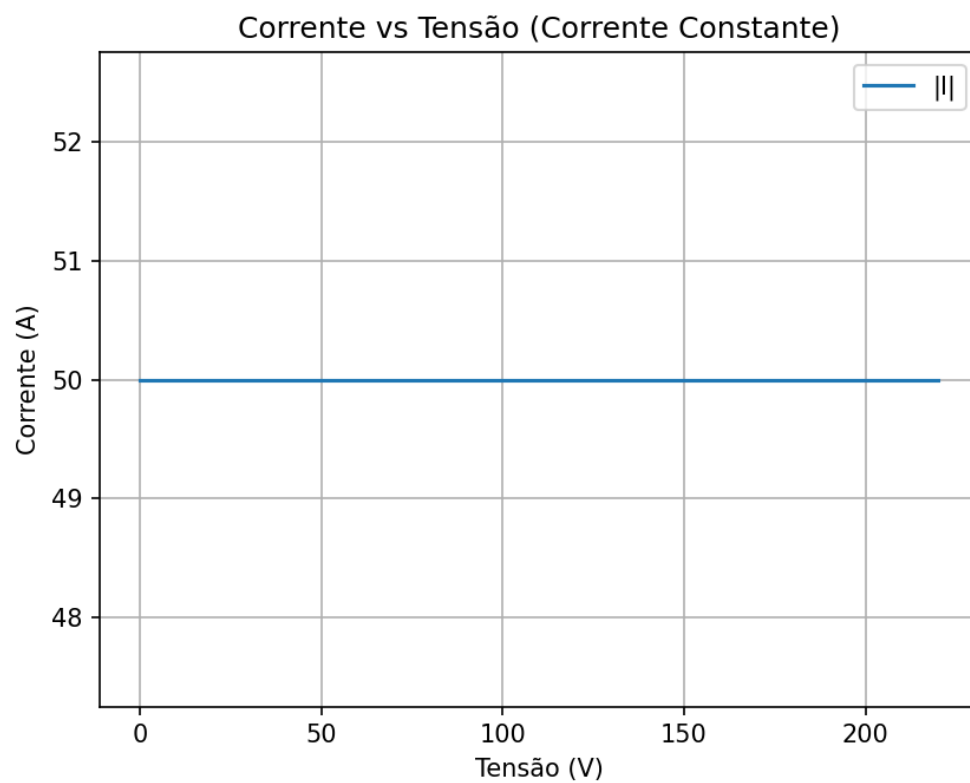


Fig. 7 - Relação corrente e tensão (modelo de carga – Corrente Constante)

2.4 Exemplo de Fluxo de potência utilizando diferentes modelos de carga:

A fim de trazer a teoria anteriormente apresentada para um contexto mais prático, este subtópico tem como objetivo demonstrar a obtenção das diversas grandezas presentes em um circuito elétrico (correntes, potências, perdas técnicas e tensões), a partir da variação do modelo representativo do comportamento da carga nele alocada (impedância constante, potência constante e corrente constante). Essa abordagem permitirá evidenciar, além das diferenças nas formas de solução impostas por cada modelo, os impactos dessas modelagens nos valores das grandezas que compõem o sistema.

Desse modo, apresenta-se a seguir um circuito secundário de distribuição simplificado, contendo apenas uma carga, com finalidade didática. De forma mais detalhada, o circuito é inicialmente representado por um equivalente de sistema, modelado como uma fonte com tensão nominal de 13,8 kV e frequência de 60 Hz. Em seguida, tem-se um transformador abaixador, com potência nominal de 10 kva, cuja função é converter o nível de tensão mais elevado para um valor usual no consumo, adotado neste caso como 220 V.

Na sequência, considera-se a impedância da linha que interliga o secundário do transformador à carga, com valor em pu igual a $0,02 + j0,05$. Por fim, conectada à barra 3, encontra-se a carga, caracterizada por tensão nominal de 220 V, potência aparente nominal de 10 kVA e fator de potência igual a 0,92 indutivo, respeitando os critérios de cálculo de perdas estabelecidos pelo Módulo 7 do PRODIST.

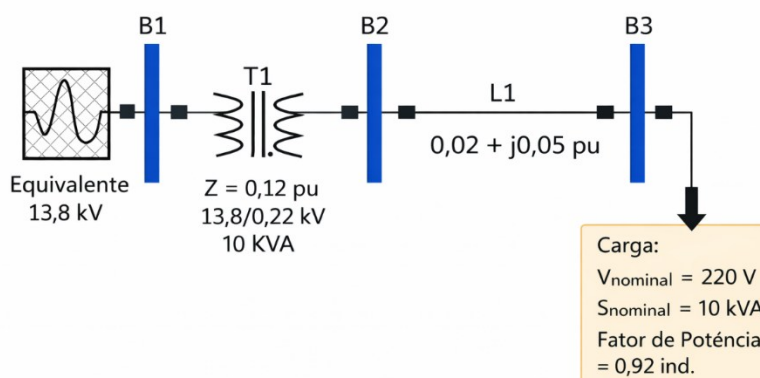


Fig. 8 - Circuito simplificado para aplicação dos modelos de carga.

O circuito mostrado na Fig. 8 pode ser simplificado por meio da associação em série das impedâncias do transformador T1 e da linha L1. A partir dessa equivalência, o sistema

passa a ser representado por apenas duas barras, o que possibilita uma representação mais compacta, conforme ilustrado na figura a seguir.

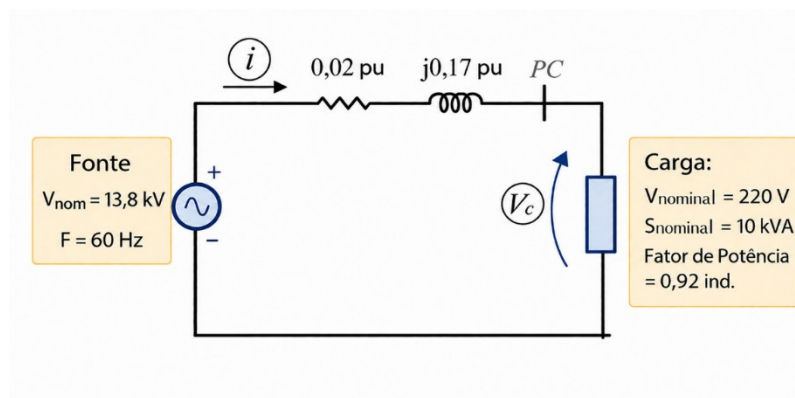


Fig. 9 - Circuito simplificado para aplicação dos modelos de carga.

Diante disso, apresenta-se a seguir as memórias de cálculo das grandezas considerando as diferentes modelagens de cargas anteriormente apresentadas.

2.4.1) Solução considerando carga como impedância constante:

Inicialmente, é importante destacar que toda a solução desenvolvida será realizada tomando como base valores em “por unidade” (pu). A análise de circuitos por meio desse sistema, especialmente aqueles que envolvem transformadores, é amplamente recomendada devido à significativa simplificação que proporciona na representação de grandezas como impedância, tensão e corrente, sendo necessário apenas multiplicar pelos valores de base adequadamente definidos para o lado do circuito em análise.

Outra vantagem que pode ser ressaltada é a universalidade da metodologia, uma vez que a forma de resolução permanece inalterada independentemente de o circuito ser monofásico, bifásico ou trifásico.

Desse modo, o passo inicial para a resolução do circuito apresentado nas Figuras 17 e 18 consiste na determinação das grandezas elétricas de base para todas as barras do sistema. Adota-se como potência base um valor de 10 kVA, de forma a manter compatibilidade com a potência nominal do transformador presente no circuito.

Para a barra 1, define-se uma tensão base de 13,8 kV. Já para as barras 2 e 3, localizadas no lado secundário do sistema, adota-se uma tensão base de 220 V, em conformidade com os valores nominais estabelecidos pelo próprio equipamento.

Com os valores base de duas grandezas definidos, torna-se possível determinar as demais, corrente base e impedância base, por meio de relações oriundas das formulações elétricas já consolidadas. A seguir, são apresentados os valores de corrente e impedância base considerando, para o presente caso, um circuito trifásico equilibrado.

Adotando-se como padrão a ligação em estrela para o sistema trifásico, tem-se que o módulo da potência aparente de uma carga pode ser determinado por:

$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \quad (28)$$

Adicionalmente, tem-se que:

$$V_F = Z \times I_L = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

Isolando-se a corrente na Equação (29) e substituindo-a na Equação (28), obtém-se:

$$I_L = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z} \quad (30)$$

$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L = \sqrt{3} \times V_L \times \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z} = \frac{V_L^2}{Z} \quad (31)$$

Isolando-se a impedância Z , conclui-se que:

$$Z = \frac{V_L^2}{S} \quad (32)$$

A fórmula obtida na Equação (32) é de extrema importância, pois será utilizada para a determinação dos valores de impedância base das barras do circuito em análise. Ressalta-se que essa expressão também é válida para sistemas monofásicos e bifásicos.

No caso de sistemas trifásicos, quando a ligação da carga é realizada em configuração delta, amplamente empregada na prática, deve-se considerar, para adequação da tipologia de ligação, a presença do fator $\sqrt{3}$.

Dessa forma, obtêm-se as impedâncias base:

$$Z_{base1} = \frac{V_L^2}{S} = \frac{13.800^2}{10.000} = 19,094 \, \Omega \quad (33)$$

$$Z_{base2/3} = \frac{V_L^2}{S} = \frac{220^2}{10.000} = 4,84 \, \Omega \quad (34)$$

Adicionalmente, é possível determinar as correntes base por meio da Equação (30):

$$I_{L(base-1)} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base-1}} = \frac{10.000}{\sqrt{3} \times 13.800} = 0,4183 \, A \quad (35)$$

$$I_{L(base-2)} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base-1}} = \frac{10.000}{\sqrt{3} \times 220} = 26,243 \, A \quad (36)$$

Com os valores base devidamente determinados, torna-se possível iniciar a resolução do exercício, considerando inicialmente o circuito em sua forma simplificada, conforme

apresentado na Fig. 9, na qual o transformador é representado por uma reatância indutiva equivalente, associada à impedância da linha previamente conectada entre as barras 2 e 3.

Como esta primeira análise é realizada considerando o modelo de impedância constante, sua resolução ocorre de forma direta, sem a necessidade de processos iterativos ou cálculos mais complexos.

Uma vez que, para qualquer circuito elétrico, as leis de Ohm e de Kirchhoff (tensões e correntes) são válidas, é possível, por meio delas, determinar:

Lei de Kirchhoff das tensões:

$$-\dot{V}_{Source} + (0,02 + j0,17) \times \dot{I}_{Load} + \dot{V}_{Load} = 0 \quad (37)$$

Isolando a tensão da carga:

$$\dot{V}_{Load} = \dot{V}_{Source} - (0,02 + j0,17) \times \dot{I}_{Load} \quad (38)$$

Lei de Ohm:

$$\dot{V}_{Load} = \hat{Z}_{Load} \times \dot{I}_{Load} \quad (39)$$

Como a carga adotada apresenta comportamento de impedância constante, conforme já destacado anteriormente, é necessário, inicialmente, determinar o valor que a caracteriza. Para isso, utiliza-se a expressão do módulo da potência aparente que relaciona impedância e tensão, empregando-se os valores nominais fornecidos pelo enunciado do exercício.

$$|\hat{S}_{nom}| = \frac{|V_{nom}^2|}{|\hat{Z}|} \quad (40)$$

Isolando-se o módulo da impedância e considerando-se as bases previamente adotadas, obtém-se:

$$|\hat{Z}| = \frac{\left(\frac{|\dot{V}_{nom}|}{V_{base-2}}\right)^2}{\left(\frac{|\hat{S}_{nom}|}{S_{base}}\right)} = \frac{\left(\frac{220}{220}\right)^2}{\left(\frac{10.000}{10.000}\right)} = \frac{(1)^2}{(1)} = 1 \text{ pu} \quad (41)$$

Adicionalmente, para a determinação do ângulo da impedância, utiliza-se o fato de que o fator de potência de uma carga é dado pelo cosseno do ângulo de potência. Assim, aplica-

se a função inversa do cosseno para a obtenção do ângulo, em graus, conforme apresentado a seguir:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\phi) \quad (42)$$

Considerando que o fator de potência é igual a 0,92:

$$\phi = \cos^{-1}(0,92) = 23,07391^\circ \quad (43)$$

Obtém-se, portanto, uma impedância igual a $1,0 \angle 23,073^\circ [pu]$ ou, em sua forma retangular, $0,92 + j0,391918 [pu]$. Ao multiplicar esse valor pela respectiva impedância base previamente determinada, obtém-se uma impedância em ohms igual a $4,428 + j1,89688$.

De posse do valor da impedância, retorna-se à Equação (37), oriunda da Lei de Kirchhoff das Tensões, a qual permite determinar a corrente que percorre a carga e, conseqüentemente, o sistema.

$$-\dot{V}_{Source} + (0,02 + j0,17) \times \dot{I}_{Load} + \dot{V}_{Load} = 0 \quad (44)$$

Substituindo-se $\dot{V}_{Load}$ pela expressão oriunda da Lei de Ohm, que define a tensão em função da impedância e da corrente que a atravessa, obtém-se:

$$\begin{aligned} -\dot{V}_{Source} + (0,02 + j0,17) \times \dot{I}_{Load} + (0,92 + j0,3919) \times \dot{I}_{Load} &= 0 \\ -\dot{V}_{Source} + (0,02 + j0,17) \times \dot{I}_{Load} + (0,92 &+ j0,3919) \times \dot{I}_{Load} = 0 \end{aligned} \quad (45)$$

Isolando-se $\dot{I}_{Load}$ e adotando-se a tensão da fonte como referência (defasagem igual a zero), tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Load} &= \frac{\dot{V}_{Source}}{(0,94 + j0,5619)} = \frac{1 \angle 0}{(0,94 + j0,5619)} = 0,91311 \angle -30,8703 \\ \dot{I}_{Load} &= \frac{\dot{V}_{Source}}{(0,94 + j0,5619)} = \frac{1 \angle 0}{(0,94 + j0,5619)} \\ &= 0,91311 \angle -30,8703 \end{aligned} \quad (46)$$

Com a corrente determinada, retorna-se à Lei de Ohm aplicada à carga, obtendo-se, por fim, a tensão em seus terminais.

$$\dot{V}_{Load} = \hat{Z}_{Load} \times \dot{I}_{Load} = (0,92 + j0,3919) \times (0,91311 \angle -30,8703)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_{Load} &= \hat{Z}_{Load} \times \dot{I}_{Load} \\ &= (0,92 + j0,3919) \\ &\times (0,91311\angle -30,8703)\end{aligned}\quad (47)$$

$$\dot{V}_{Load} = 0,91311\angle -7,7969 \quad (48)$$

Ao multiplicar o valor obtido pela base de tensão previamente definida (220 V), tem-se que a tensão, agora expressa em volts, é igual a 200,8858 V.

Com as grandezas fundamentais devidamente determinadas, torna-se possível, a partir delas, obter diversos outros indicadores do circuito, tais como a potência fornecida pela fonte, o consumo da carga e as perdas técnicas associadas ao sistema. A seguir, apresenta-se a determinação dessas grandezas, bem como suas respectivas interpretações.

$$\hat{S}_{Load} = \dot{V}_{Load} \times \dot{I}_{Load}^* = 0,9131\angle(-7,796^\circ) \times 0,9131\angle(30,870^\circ)$$

$$\begin{aligned}\hat{S}_{Load} &= \dot{V}_{Load} \times \dot{I}_{Load}^* \\ &= 0,9131\angle(-7,796^\circ) \times 0,9131\angle(30,870^\circ)\end{aligned}\quad (49)$$

$$\hat{S}_{Load} = (0,767089 + j0,32677) \quad (50)$$

Multiplicando-se essa potência complexa pela potência aparente base determinada (10 kVA), obtêm-se seus valores em kW e kvar, proporcionando uma melhor interpretação dos resultados.

$$\hat{S}_{Load(kW/kVar)} = (0,767089 + j0,32677) \times 10.000 \quad (51)$$

$$\hat{S}_{Load(kW/kvvar)} = (7,670kW + j3,2677kVar) \quad (52)$$

Realizando-se a mesma análise para a fonte, tem-se:

$$\hat{S}_{Source} = \dot{V}_{Source} \times \dot{I}_{Load}^* = 1\angle(0^\circ) \times 0,9131\angle(30,870^\circ) \quad (53)$$

$$\hat{S}_{Source} = (0,7837 + j0,4685) \quad (54)$$

Multiplicando-se novamente essa potência complexa pela potência aparente base (10 kVA), obtém-se:

$$\hat{S}_{Source(kW/kVar)} = (0,7837 + j0,4685) \times 10kVa \quad (55)$$

$$\hat{S}_{Source(kW/kVar)} = (7,837kW + j4,685kVar) \quad (56)$$

Subtraindo-se $\hat{S}_{Load}$ de $\hat{S}_{Source}$, obtém-se a potência complexa associada ao transporte de energia até a carga. A parcela real desse valor corresponde às perdas técnicas do circuito para a modelagem adotada:

$$\begin{aligned} \hat{S}_{losses} &= \hat{S}_{Source(kW/kVar)} - \hat{S}_{Load(kW/kVar)} \\ &= (0,167kW + j1,4173kVar) \end{aligned} \quad (57)$$

2.4.2) Solução considerando carga como potência constante:

Circuitos com cargas modeladas como potência constante, comumente encontrados em estudos de fluxo de potência em sistemas elétricos, exigem, na maioria dos casos, a utilização de métodos numéricos, como Gauss-Seidel e Newton-Raphson, para sua resolução. Isso se justifica pelo fato de que problemas dessa natureza apresentam características não lineares que, devido à sua complexidade, demandam o uso de algoritmos iterativos para a obtenção de soluções.

No presente caso, como o circuito em análise é relativamente simples e foi estruturado com finalidade didática, demonstra-se a possibilidade de sua resolução sem o emprego de ferramentas numéricas. Tal abordagem permite evidenciar as diferenças em relação ao procedimento anteriormente adotado para cargas modeladas como impedância constante, bem como reforçar a importância dos métodos numéricos na resolução de problemas mais gerais dessa natureza.

Retomando o processo de resolução a partir da Fig. 18, destaca-se que as leis de Kirchhoff e de Ohm permanecem válidas independentemente do modelo de carga adotado. Dessa forma, ao aplicar a Lei de Ohm à impedância de linha, composta pela associação da impedância do transformador e da linha a jusante, tem-se:

$$\dot{V}_{Source} - \dot{V}_{Load} = \hat{Z}_{Line} \times \dot{I}_{Load} = (0,02 + j0,17) \times \dot{I}_{Load} \quad (58)$$

Sabe-se que a corrente da carga pode ser determinada por:

$$\hat{S}_{Load} = \dot{V}_{Load} \times \dot{I}^*_{Load} \quad (59)$$

$$\dot{I} = \frac{\hat{S}^*_{Load}}{\dot{V}^*_{Load}} \quad (60)$$

Substituindo-se a Equação (60) na variável representativa da corrente apresentada na Equação (58), obtém-se:

$$\dot{V}_{Source} - \dot{V}_{Load} = (0,02 + j0,17) \times \frac{\hat{S}^*_{Load}}{\dot{V}^*_{Load}} \quad (61)$$

Adotando-se novamente a tensão do circuito equivalente como referência do sistema (defasagem igual a zero) e considerando que a potência complexa permanece constante e igual aos valores nominais da carga, tem-se:

$$Fp = \cos(\phi) = 0,92 \quad (62)$$

$$\cos^{-1}(0,92) = \phi = 23,0739^\circ \quad (63)$$

$$S_{Base} = \frac{S_{Nom}}{S_{Base}} = \frac{10kVa}{10kVa} = 1 \text{ pu} \quad (64)$$

$$V_{Source} = \frac{V_{Source}}{V_{Base_1}} = \frac{13,8kV}{13,8kV} = 1 \text{ pu} \quad (65)$$

$$(1\angle 0^\circ) - \dot{V}_{Load} = (0,02 + j0,17) \times \frac{(1\angle -23,073^\circ)}{\dot{V} *_{Load}} \quad (66)$$

Desenvolvendo-se a Equação (66), obtém-se:

$$1\angle 0^\circ = \frac{0,171172\angle 60,2162^\circ}{\dot{V} *_{Load}} + \dot{V}_{Load} \quad (67)$$

A Equação (67) demonstra o comportamento de uma relação não linear, na qual a variável de interesse no presente caso, a tensão na carga, depende de si própria para ser determinada. Esse aspecto, conforme já destacado anteriormente, torna a resolução do problema mais complexa, de modo que a abordagem mais usual consiste na adoção de métodos numéricos previamente desenvolvidos para esse tipo de equação.

No entanto, para o caso em análise e com fins didáticos, dá-se continuidade à resolução analítica, a fim de evidenciar diferentes abordagens para o problema.

Para contornar essa dificuldade, assume-se que a tensão na carga ($\dot{V}_{Load}$) pode ser representada de forma genérica por $V_{Load}\angle\delta$. A partir dessa hipótese, multiplica-se ambos os lados da Equação (67) por $1\angle -\delta$, obtendo-se:

$$\begin{aligned} (1\angle 0^\circ) \times (1\angle -\delta^\circ) &= \left(\frac{0,171172\angle 60,2162^\circ}{V_{Load}\angle -\delta^\circ} + V_{Load}\angle\delta^\circ \right) \\ &\times (1\angle -\delta^\circ) \end{aligned} \quad (68)$$

$$(1\angle -\delta^\circ) = \left(\frac{0,171172\angle 60,2162^\circ}{V_{Load}\angle 0^\circ} + V_{Load}\angle 0^\circ \right) \quad (69)$$

$$(1\angle -\delta^\circ) = \left(\frac{0,171172}{V_{Load}}\angle 60,2162^\circ + V_{Load}\angle 0^\circ \right) \quad (70)$$

Sabe-se que um número complexo, em sua forma polar, pode ser convertido para a forma retangular por meio da expressão:

$$A\angle\theta = A \times \cos\theta + j(A \times \sin\theta) \quad (71)$$

Separa-se a Equação (70) em duas componentes, correspondentes às partes real e imaginária, utilizando-se a conversão de forma dada pela Equação (71). Dessa forma, obtém-se:

Parte real:

$$1 \times \cos(-\delta^\circ) = \frac{0,171172}{V_{Load}} \times \cos(60,2162)^\circ + V_{Load} \times \cos(0)^\circ \quad (72)$$

$$\cos(-\delta^\circ) = \frac{0,085026}{V_{Load}} + V_{Load} \quad (73)$$

Parte Imaginaria:

$$1 \times \sin(-\delta^\circ) = \frac{0,171172}{V_{Load}} \times \sin(60,2162)^\circ + V_{Load} \times \sin(0)^\circ$$

$$1 \times \sin(-\delta^\circ) = \frac{0,171172}{V_{Load}} \times \sin(60,2162)^\circ + V_{Load} \times \sin(0)^\circ \quad (74)$$

$$\sin(-\delta^\circ) = \frac{0,148561}{V_{Load}} \quad (75)$$

A partir das propriedades trigonométricas $\cos(-\delta) = \cos(\delta)$ e $\sin(-\delta) = -\sin(\delta)$, obtém-se:

Parte real:

$$\cos(\delta^\circ) = \frac{0,085026}{V_{Load}} + V_{Load} \quad (76)$$

Parte Imaginaria:

$$-\sin(\delta^\circ) = \frac{0,148561}{V_{Load}} \quad (77)$$

Somando-se os termos anteriormente obtidos, após elevá-los ao quadrado, é possível igualar a expressão a 1, conforme a identidade trigonométrica a seguir:

Por definição, tem-se:

$$\cos(\delta)^2 + \sin(\delta)^2 = 1 \quad (78)$$

Logo, para o caso em análise, obtém-se:

$$\left(\frac{0,085026}{V_{Load}} + V_{Load}\right)^2 + \left(\frac{0,148561}{V_{Load}}\right)^2 = 1 \quad (79)$$

Desenvolvendo-se a expressão por meio de produtos notáveis, obtém-se:

$$1 \times V_{Load}^4 - 0,823948 \times V_{Load}^2 + 0,02929979 = 0 \quad (80)$$

Adotando-se a substituição $V_{Load}^2 = X$, é possível reduzir a expressão a uma equação de segundo grau:

$$1 \times X^2 - 0,823948 \times X + 0,02929979 = 0 \quad (81)$$

Resolvendo-se essa equação, obtém-se que X é igual a:

$$X = 0,03724 \quad (82)$$

Ou

$$X = 0,78670 \quad (83)$$

Extraíndo-se a raiz dos valores obtidos, com o objetivo de determinar as possíveis soluções para a tensão (considerando-se apenas valores positivos), obtém-se:

$$V_{Load} = 0,192873 \text{ pu ou } V_{Load} = 0,886622 \text{ pu} \quad (84)$$

Dentre os valores obtidos, observa-se que o primeiro não é condizente com a realidade, uma vez que, em condições de regime permanente, são esperados valores próximos ao nominal (1 pu). Com base nessa análise, adota-se $V_{Load} = 0,886622$ pu, o qual, ao ser multiplicado por sua respectiva base, resulta em uma tensão de 195,05 V.

Além disso, com o valor da tensão já determinado, é possível retornar à Equação (77) para obter sua defasagem:

$$-\text{sen}(\delta^\circ) = \frac{0,148561}{V_{Load}} \quad (85)$$

$$\text{sen}(\delta^\circ) = -\frac{0,148561}{0,886622} = -0,16755 \quad (86)$$

$$\delta^\circ = \text{sen}^{-1}(-0,16755) = -9,64593^\circ \quad (87)$$

Com as informações obtidas, torna-se possível determinar a corrente drenada pela carga, bem como as demais variáveis analisadas no modelo anteriormente resolvido. A corrente que percorre o circuito pode ser obtida por diferentes abordagens; contudo, neste caso, opta-se pela utilização da Equação (66), que representa a Lei de Ohm aplicada à impedância equivalente entre a fonte e a carga, a partir da qual se iniciou a resolução do problema.

$$\dot{V}_{Source} - \dot{V}_{Load} = \hat{Z}_{Line} \times \dot{I}_{Load} \quad (88)$$

Isolando-se a corrente na Equação (88), obtém-se:

$$\begin{aligned} I_{Load} &= \frac{\dot{V}_{Source} - \dot{V}_{Load}}{\hat{Z}_{Line}} = \frac{1 \angle 0 - 0,8866 \angle -9,64593^\circ}{(0,02 + j0,17)} = 1,137697 \angle -33,5730^\circ \\ \dot{I}_{Load} &= \frac{\dot{V}_{Source} - \dot{V}_{Load}}{\hat{Z}_{Line}} = \frac{1 \angle 0 - 0,8866 \angle -9,64593^\circ}{(0,02 + j0,17)} \\ &= 1,137697 \angle -33,5730^\circ \end{aligned} \quad (89)$$

Dessa forma, é possível determinar a potência complexa fornecida pela fonte, bem como as perdas técnicas associadas ao modelo.

$$\hat{S}_{Source} = \dot{V}_{Source} \times \dot{I}_{Load}^* = 1 \angle 0 \times 1,137697 \angle 33,5730^\circ = 1,137697 \angle -33,5730^\circ$$

$$\begin{aligned}\hat{S}_{Source} &= \dot{V}_{Source} \times \dot{I}^*_{Load} = 1 \angle 0 \times 1,137697 \angle 33,5730^\circ \\ &= 1,137697 \angle -33,5730^\circ\end{aligned}\quad (90)$$

Convertendo para a forma retangular, obtém-se:

$$\hat{S}_{Source_{pu}} = 0,94790 + j0,62914 \quad (91)$$

$$\begin{aligned}\hat{S}_{Source} &= (0,94790 + j0,62914) \times S_{Base} = 9,479kW + j6,291kvar \\ \hat{S}_{Source} &= (0,94790 + j0,62914) \times S_{Base} \\ &= 9,479kW + j6,291kvar\end{aligned}\quad (92)$$

Com a potência complexa da fonte determinada, pode-se calcular a potência consumida pela linha, cuja parcela real corresponde às perdas técnicas do circuito

$$\begin{aligned}\hat{S}_{Load} &= 1 \angle 23,073^\circ = 0,92 + j0,39191 = 9,2kW + j3,9191kvar \\ \hat{S}_{Load} &= 1 \angle 23,073^\circ = 0,92 + j0,39191 \\ &= 9,2kW + j3,9191kvar\end{aligned}\quad (93)$$

$$\begin{aligned}\hat{S}_{Losses} &= \hat{S}_{Source} - \hat{S}_{Load} = (9,479kW + j6,291kvar) - (9,2kW + j3,9191kvar) \\ \hat{S}_{Losses} &= \hat{S}_{Source} - \hat{S}_{Load} \\ &= (9,479kW + j6,291kvar) \\ &\quad - (9,2kW + j3,9191kvar)\end{aligned}\quad (94)$$

$$\hat{S}_{Losses} = 279,0914W + j2,3722kvar \quad (95)$$

O resultado expresso pela Equação (95) demonstra que o circuito em análise apresenta perdas técnicas de 279,091 W, enquanto sua reatância indutiva troca com o sistema aproximadamente 2,3722 kvar de potência reativa.

Conforme mencionado anteriormente, essa resolução poderia ser realizada de forma mais simplificada por meio de métodos numéricos. Assim, com o objetivo de comparar as diferentes abordagens de solução, apresenta-se a seguir o método numérico clássico conhecido como método de Gauss.

Dentre os métodos numéricos disponíveis, o método de Gauss é considerado um dos mais simples e intuitivos. Entretanto, apesar dessa vantagem, não é o mais eficiente do ponto

de vista computacional, motivo pelo qual não é amplamente utilizado em aplicações modernas ou em softwares de fluxo de potência.

Esse método baseia-se em um processo iterativo para a resolução de equações não lineares, seguindo uma sequência de passos pré-estabelecida, conforme descrito a seguir.

Considerando uma função não linear, tem-se:

$$x^{(k)} = f(x^{(k-1)})$$

1. **Arbitra-se** um valor inicial para x , ou, no presente caso, para V_{Load} .
2. **Substitui-se** o valor inicial na equação, obtendo-se uma nova estimativa para a variável x
3. **Calcula-se** o erro como a diferença entre o valor obtido na iteração atual e o valor da iteração anterior.
4. **Verifica-se** o critério de convergência:
 - Se o erro for menor que um valor previamente estabelecido (tolerância), considera-se que a solução foi alcançada, sendo o último valor obtido adotado como resposta.
 - Caso contrário, retorna-se ao passo 2, utilizando-se como nova estimativa o valor obtido na iteração anterior.

$$Erro = |x^{(k)} - x^{(k-1)}|$$

Para o caso em análise, a equação não linear a ser resolvida por meio dessa sequência de passos já foi determinada na Equação (67). Manipulando-a de forma a obter uma expressão mais explícita, tem-se:

$$\dot{V}_{Load} = 1\angle 0^\circ - \frac{0,171172\angle 60,2162^\circ}{\dot{V} *_{Load}} \quad (96)$$

Arbitra-se como valor inicial (chute) a magnitude nominal de tensão, isto é, 1 pu, com defasagem nula. A seguir, apresenta-se uma tabela na qual cada linha representa uma iteração, até a obtenção de um erro da ordem de 10^{-5}

Tabela I - Resposta método iterativo de Gauss

Iteração	Tensão na Carga ($\dot{V}_{Load}$)	Erro
0 ^a	1 $\angle 0^\circ$ (Chute Inicial)	-----
2 ^a	0,92695 $\angle -9,2224^\circ$	0,171172
3 ^a	0,89534 $\angle -9,2224^\circ$	0,031608

4 ^a	$0,89212\angle - 9,5858^\circ$	0,006519
5 ^a	$0,89073\angle - 9,5858^\circ$	0,001397
6 ^a	$0,89058\angle - 9,6026^\circ$	0,000300
7 ^a	$0,89051\angle - 9,6026^\circ$	0,000064

De forma visual, a evolução das 7 iterações e seus respectivos erros pode ser representada por:

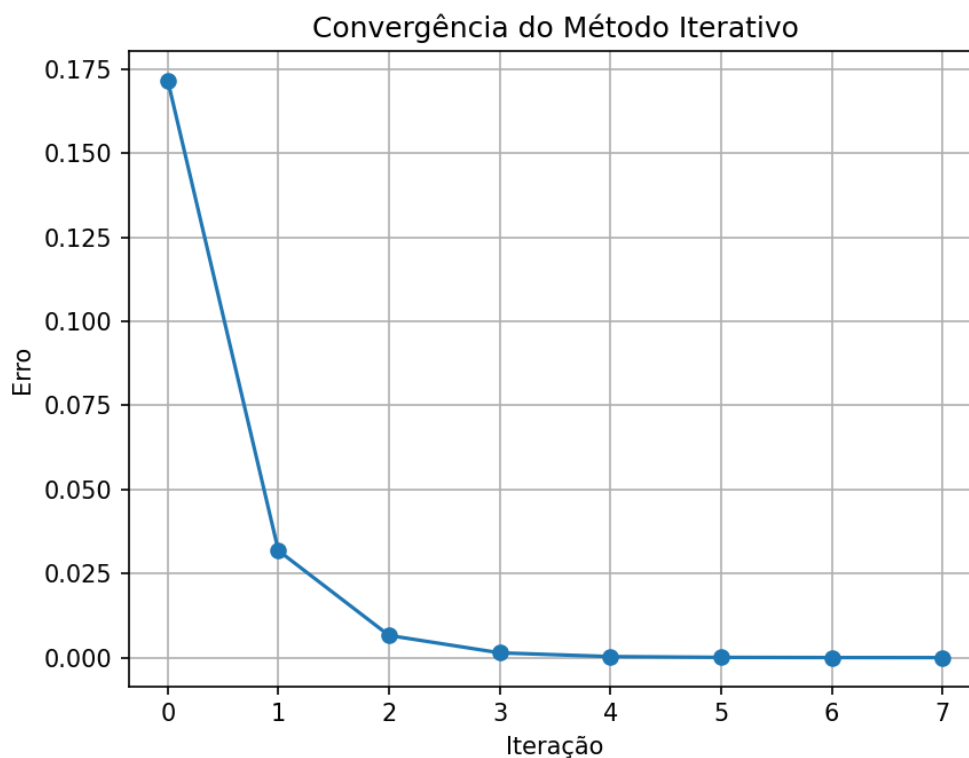


Fig. 10 - Progressão dos erros ao longo das iterações realizadas para o método de Gauss.

Deste modo, adotando como valor final de tensão na carga ($\dot{V}_{Load}$) o valor obtido durante última iteração realizada cujo qual cumpriu a condição de estabelecimento de um erro menor ou igual a 10^{-5} temos que $\dot{V}_{Load} = 0,89051\angle - 9,6026^\circ$.

É possível, comparando os valores obtidos durante as duas metodologias, observar uma discreta diferença entre os valores obtidos de tensão cuja magnitude qual não prejudicaria ou levaria a interpretações equivocadas escolhendo um método ou outro. Por demais é se claramente notado a extrema simplicidade e rapidez que adoção de métodos numéricos trazem em sua solução justificando assim o fato de serem preferencialmente adotados.

2.4.3) Solução considerando carga como corrente constante:

Assim como na resolução do circuito contendo cargas modeladas como potência constante, a análise de circuitos com cargas de corrente constante não pode ser realizada de forma direta, uma vez que a tensão nos terminais da carga é inicialmente desconhecida. Entretanto, esse modelo apresenta um grau adicional de complexidade, pois, além da tensão, também são desconhecidos a potência complexa, a impedância equivalente e, conseqüentemente, a defasagem entre tensão e corrente da carga. Em razão desse conjunto de variáveis desconhecidas, a obtenção de uma solução analítica torna-se inviável, sendo necessária a adoção de um procedimento iterativo.

Dessa forma, para a resolução do problema proposto, assume-se inicialmente que o fator de potência da carga, ou, de maneira equivalente, seu ângulo de carga, permanece constante e igual ao seu valor nominal. No presente exemplo, considera-se um fator de potência de 0,92, correspondente a um ângulo de carga de $23,0739^\circ$. A partir dessa premissa, inicia-se um processo iterativo análogo ao empregado para as cargas de potência constante, adotando-se como estimativa inicial para a tensão na carga o valor de $1\angle 0^\circ \text{ p.u.}$

A seguir, é detalhado o procedimento correspondente à primeira iteração. As etapas subsequentes são omitidas por apresentarem exatamente a mesma sequência de cálculos, evitando-se, assim, repetições desnecessárias.

Conforme a hipótese inicial, considera-se uma tensão na carga igual a $1\angle 0^\circ \text{ p.u.}$, enquanto a magnitude da corrente permanece constante e igual ao seu valor nominal, ou seja, 1 p.u. Conhecendo-se o fator de potência da carga e admitindo-se seu ângulo constante em $23,0739^\circ$, torna-se possível determinar o ângulo da corrente e, conseqüentemente, calcular um novo valor para a magnitude e a fase da tensão na carga. O procedimento descrito é apresentado a seguir por meio das equações correspondentes, de forma a facilitar a compreensão do processo iterativo.

$$\dot{I}_{1^{\text{a}} \text{ iteração}} = 1\angle(\theta_{\text{tensão}} - \theta_{\text{nominal}}) = 1\angle(0^\circ - 23,0739^\circ) = 1\angle(-23,0739^\circ)$$

Aplicando a Lei das Tensões de Kirchhoff ao circuito apresentado na Figura 9, obtém-se a equação que permite determinar um novo valor para a tensão nos terminais da carga a partir da corrente calculada na iteração corrente. Em seguida, esse novo valor é

comparado com a tensão obtida na iteração anterior, dando continuidade ao processo iterativo.

O procedimento é repetido sucessivamente até que a diferença entre as tensões de duas iterações consecutivas seja inferior a uma tolerância previamente estabelecida pelo usuário. Em aplicações práticas, é comum adotar como critério de convergência valores da ordem de 10^{-5} , tolerância que também será utilizada ao longo deste trabalho.

$$\dot{V}_{Carga} = 1\angle 0^\circ - (0,02 + j0,17) \times \dot{I}_{\text{iteração atual}}$$

Como anteriormente ressaltado, a corrente pré-estabelecida para a inicial iteração foi-se dada por $1\angle(-23,0739^\circ)$, desta forma, temos:

$$\dot{V}_{Carga} = 1\angle 0^\circ - (0,02 + j0,17) \times 1\angle(-23,0739^\circ)$$

$$\dot{V}_{Carga} = 0,92956\angle -9,33346^\circ$$

Comparando-se a estimativa inicial da tensão, igual a $1\angle 0^\circ$ p.u., com o valor obtido ao final da primeira iteração, $0,92956\angle -9,33346^\circ$ p.u., observa-se que as diferenças tanto na magnitude quanto no ângulo são superiores à tolerância de convergência previamente estabelecida. Dessa forma, conclui-se que o processo iterativo ainda não convergiu, sendo necessário prosseguir com as iterações até que o critério de convergência seja satisfeito.

A Tabela II resume a evolução das iterações realizadas até a obtenção da solução final.

Tabela II: iterações modelo de carga corrente constante

Iteração	Tensão(V)	Desasagem(°)	Erro(Magnitude)	Erro(Defasagem)
2	0,962123	-8,478935	0,035167	0,7435321
3	0,904644	-8,549655	-0,057479	-0,07072
4	0,903861	-8,543008	-0,000783	0,006647
5	0,903878	-8,543634	1,7E-05	-0,000626
6	0,903878	-8,543575	0,0	5,9E-05

Observando os resultados apresentados na Tabela II, verifica-se que o critério de convergência é atendido para uma tensão na carga de $0,903878\angle -8,543575^\circ$ p.u., valor adotado como solução do processo iterativo.

A partir dessa solução, torna-se possível determinar, de maneira análoga ao procedimento realizado para os modelos de carga anteriormente apresentados, a potência fornecida pela fonte e a potência consumida pela carga. A diferença entre essas grandezas corresponde

às perdas elétricas no circuito, permitindo a completa caracterização do sistema para essa condição de operação.

$$\hat{S}_{Fonte} = (\dot{V}_{Fonte} \times \dot{I}_{Circuito}^*) \times S_{base} = (1\angle 0^\circ \times 1\angle 31,616926^\circ) \times 10.000$$

$$\hat{S}_{Fonte} = 8500,66 W + j5242,4680 var$$

$$\hat{S}_{Carga} = (\dot{V}_{Carga} \times \dot{I}_{Circuito}^*) \times S_{base}$$

$$= (0,903878\angle -8,543575^\circ \times 1\angle 31,616926^\circ) \times 10.000$$

$$\hat{S}_{Carga} = 8315,6637 W + j3540,4680 var$$

$$\hat{S}_{Perdas} = \hat{S}_{Fonte} - \hat{S}_{Carga} = 200 W + j1700 var$$

Dessa maneira, de acordo com as equações acima, é se possível chegar a um valor de 200W de perdas para este modelo diferenciando, assim como esperado, dos valores obtidos para os modelos anteriormente realizados.

2.4.4) Conclusões e interpretações acerca das resoluções realizadas:

A tabela abaixo apresenta, de forma condensada, os principais resultados obtidos durante a resolução dos três modelos anteriores:

Tabela III - Comparativo entre modelos

Modelo de carga	Tensão na Carga (p.u)	Corrente na Carga (p.u)	Perdas(W)
Impedância Constante	0,9113	0,9113	167
Potência Constante	0,8866	1,134	279,091
Corrente Constante	0,9038	1	200

Em síntese, ao analisar os resultados apresentados na Tabela II para cada um dos modelos considerados (impedância constante, potência constante e corrente constante), observa-se claramente que a forma como a carga é modelada impacta significativamente os resultados obtidos, com destaque para as perdas técnicas. Enquanto o modelo de impedância constante pode ser resolvido diretamente por meio das leis básicas de

circuitos elétricos, os demais modelos requerem, na maioria dos casos, procedimentos iterativos, devido à presença de equações não lineares em sua formulação.

Dessa forma, para uma representação mais adequada do sistema em simulações, como por exemplo na metodologia atualmente adotada para a obtenção das perdas elétricas, torna-se fundamental a utilização de um modelo que represente de maneira fidedigna o comportamento das cargas presentes, a fim de se obter resultados o mais coerentes possível com a realidade.

Ainda com base na análise dos resultados obtidos, destaca-se a predominância de maiores valores de perdas técnicas no modelo de potência constante em relação aos demais, especialmente em situações de tensão abaixo do valor nominal (quedas de tensão). Esse comportamento é esperado, uma vez que, conforme já discutido, suas grandezas (tensão e corrente) variam de forma inversa para a manutenção da potência complexa constante na carga.

Assim, quando a tensão se encontra abaixo do valor nominal, seja de forma temporária ou permanente, a corrente demandada pela carga tende a aumentar para compensar essa redução. Considerando que as perdas técnicas são, de forma geral, proporcionais ao quadrado da corrente, conforme expresso por $P_{perdas} = R \cdot I^2$, sendo R representativa das resistências dos diversos equipamentos alocados entre fonte e cargas do sistema, é natural que o aumento da corrente resulte na elevação das perdas.

2.5 Modelo polinomial (ZIP):

Na atualidade, o modelo polinomial, também conhecido como modelo ZIP, é amplamente considerado o mais completo e, ao mesmo tempo, simplificado para a representação das atuais cargas elétricas que constituem os sistemas de potência.

Com o passar dos anos, a determinação do comportamento das cargas tornou-se um desafio crescente. Isso se deve, principalmente, à elevada sazonalidade no funcionamento dos equipamentos ao longo do dia, fazendo com que cada carga apresente características próprias e, muitas vezes, desconhecidas.

Soma-se a isso o fato de que, a cada ano, aumenta a diversidade de equipamentos com diferentes respostas às variações de tensão, coexistindo dentro de uma mesma carga. Esses equipamentos, como já mencionado, entram e saem de operação ao longo do dia, contribuindo para a complexidade da modelagem.

Dessa forma, o modelo polinomial (ZIP) permite a combinação, em uma única equação, dos três modelos clássicos que podem representar uma carga elétrica.

Isso possibilita uma representação mais fiel do comportamento real das cargas em um sistema elétrico, desde que os coeficientes do modelo sejam devidamente estimados. Tal abordagem torna-se especialmente relevante, uma vez que dificilmente uma carga real é adequadamente representada por apenas um dos modelos individuais como considerado, de maneira simplória, nos anteriores exemplos resolvidos que tomavam como base o circuito instituído pela Fig. 18.

Com o objetivo de modelar separadamente o comportamento das potências ativa e reativa de uma determinada carga, o modelo é expresso por meio de duas equações distintas, cada uma associada a uma dessas componentes, conforme apresentado a seguir:

$$P(t) = P_0 \left[Z_P \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_P \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_p \right] \quad (97)$$

$$Q(t) = Q_0 \left[Z_P \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_P \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_p \right] \quad (98)$$

Em que:

$P(t)$ = Potência Ativa ao longo do tempo T

$Q(t)$ = Potência Reativa ao longo do tempo T

P_0 = Potência Ativa quando a carga é submetida a tensão nominal V_0 .

Q_0 = Potência Reativa quando a carga é submetida a tensão nominal V_0 .

Z_* = Parcela da carga representada pelo modelo de impedância constante.

I_* = Parcela da carga representada pelo modelo de corrente constante.

P_* = Parcela da carga representada pelo modelo de potência constante.

* $\in$ P, Q.

As equações (97 e 98) modelam, conforme anteriormente discutido, o comportamento da potência associada a uma determinada carga, considerando a contribuição proporcional dos modelos previamente desenvolvidos.

Observa-se que o coeficiente Z_* representa a parcela da carga que se comporta como impedância constante, cuja característica principal é a variação quadrática da potência em função da tensão. O coeficiente I_* , por sua vez, modela a fração da carga com comportamento de corrente constante, para a qual a potência varia linearmente com a tensão. Por fim, o coeficiente P_* representa a parcela da carga que se comporta como potência constante, não apresentando variação com a tensão, o que justifica o fato de essa componente não estar associada a nenhum termo dependente da tensão.

Como o modelo é constituído pela combinação de diferentes parcelas, a soma dos coeficientes deve, necessariamente, ser igual à unidade, ou, em termos percentuais, a 100%, ou seja:

$$Z_P + I_P + P_P = 1$$

$$Z_Q + I_Q + P_Q = 1$$

No âmbito prático, para a modelagem utilizando o modelo ZIP, as variáveis necessárias correspondem às três proporções associadas a cada tipo de potência (ativa e reativa).

A obtenção desses coeficientes para uma carga específica requer a realização de ensaios experimentais, utilizando equipamentos capazes de variar a tensão aplicada à carga de forma controlada, bem como medir os respectivos valores de potência ativa e reativa.

A partir dos pontos obtidos de potência em função da tensão, aplica-se, tipicamente, uma metodologia de regressão polinomial de segundo grau, por meio da qual são estimados os seis coeficientes necessários para uma modelagem mais representativa do comportamento real da carga.

Como já ressaltado, mesmo com a aplicação dessa metodologia prática para a obtenção dos coeficientes, ao se considerar o conjunto de cargas presentes em um sistema, bem como a variação dos equipamentos em operação ao longo do dia, torna-se inviável modelar um comportamento que seja integralmente condizente com a realidade.

Dessa forma, a abordagem mais adotada na prática consiste na utilização de proporções fixas para os coeficientes do modelo, com o objetivo de representar o comportamento médio das cargas ao longo do tempo.

Atualmente, de forma generalizada, busca-se adotar uma combinação de modelos que represente tanto parcelas de potência dependentes da tensão, como no modelo de impedância constante, quanto parcelas independentes da tensão, como no modelo de potência constante.

Nesse contexto, documentos normativos, como o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede, instituído pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), voltado a simulações de estabilidade eletromecânica, e o Módulo 7 do PRODIST, que apresenta recomendações para o cálculo de perdas técnicas, indicam, cada um em seu respectivo escopo, a utilização do modelo polinomial (ZIP).

De maneira geral, essas recomendações adotam, para a potência ativa, coeficientes de 50% para o modelo de impedância constante e 50% para o modelo de potência constante. Para a potência reativa, por sua vez, considera-se, tipicamente, uma modelagem com 100% de contribuição do modelo de impedância constante.

No que se refere ao cálculo de perdas, destaca-se que a composição recomendada pelo Módulo 7 do PRODIST mostra-se estrategicamente adequada, uma vez que combina um modelo que tende a elevar as perdas, correspondente à potência constante, com outro que resulta em níveis de perdas mais reduzidos, associado à impedância constante. Dessa forma, obtém-se uma representação equilibrada, que evita a predominância de comportamentos extremos e se estabelece como uma aproximação média entre essas duas características.

De todo modo, o objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso consiste na obtenção de coeficientes mais adequados para o modelo polinomial, de forma que as cargas modeladas apresentem um comportamento mais condizente com a realidade com isso sendo apresentado em capítulos posteriores deste documento.

3. OPENDSS:

O OpenDSS é um software desenvolvido para atender a uma ampla variedade de simulações e aplicações, fornecendo resultados confiáveis e representativos da realidade. Atualmente, consolidou-se como uma referência mundial na análise de sistemas elétricos de distribuição, sendo amplamente utilizado no meio acadêmico para o desenvolvimento de novas metodologias, equipamentos e melhorias no setor. Além disso, é adotado como ferramenta de referência pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na determinação de perdas técnicas e não técnicas, bem como em análises associadas ao fluxo de potência. Nos próximos subcapítulos, serão apresentados aspectos mais detalhados sobre sua criação, formas de utilização, métodos de cálculo de fluxo de potência e os modelos de carga disponíveis para a modelagem.

3.1 O que é? O que permite realizar?:

O desenvolvimento do OpenDSS teve início em abril de 1997, sob a liderança de Roger Dugan, que, à época, atuava na empresa *Electrotek Concepts*, ainda em operação nos dias atuais. Inicialmente, o software não possuía a denominação atual, sendo conhecido apenas como DSS (*Distribution System Simulator*). Em 2004, o software foi adquirido pela EPRI Solutions, que posteriormente se integrou ao Electric Power Research Institute (EPRI) em 2007. A partir desse processo, o OpenDSS passou a ser disponibilizado como uma ferramenta de código aberto, adotando o nome atual, com o objetivo de fomentar o desenvolvimento de novas tecnologias e promover avanços no setor de sistemas elétricos de distribuição.

O OpenDSS (Open Distribution System Simulator) consolidou-se como uma referência entre os simuladores voltados à análise no domínio da frequência. Além de fornecer resultados usuais desse tipo de simulação, como tensões, correntes, perdas e potências, o software incorpora funcionalidades que permitem a avaliação de diversos aspectos dos sistemas de distribuição, incluindo análise de harmônicos, integração de geração distribuída e estudos de eficiência energética. Adicionalmente, disponibiliza recursos e elementos voltados à modelagem de tecnologias ainda não amplamente inseridas nos sistemas elétricos atuais, servindo como base para estudos e desenvolvimento de soluções futuras, como sistemas de armazenamento de energia e microrredes.

Algumas das diversas possíveis aplicações são:

- Planejamento e análise de sistemas de distribuição.
- Simulação comportamental de sistemas fotovoltaicos e eólicos.
- Proteção do Sistema.
- Análise harmônica e Inter harmônica.
- Modelagem de sistemas de armazenamento.

O OpenDSS foi concebido com o propósito de atender a uma ampla gama de necessidades e aplicações propostas por seus usuários. Entretanto, mesmo sendo uma ferramenta de código aberto, não é possível aos desenvolvedores antecipar todas as demandas e funcionalidades requeridas. Nesse contexto, foi implementada a interface COM (*Component Object Model*), que possibilita a integração do software com linguagens de programação como Python, MATLAB e R. Essa integração amplia significativamente o poder computacional disponível aos usuários, expandindo as possibilidades de modelagem, análise e desenvolvimento de soluções.

De forma mais detalhada, essa interface permite que todas as funcionalidades e resultados anteriormente acessados por meio do executável do software passem a ser manipulados diretamente nas linguagens externas mencionadas. Dessa maneira, ao combinar os recursos do OpenDSS com as capacidades dessas linguagens como bibliotecas especializadas, ferramentas de análise de dados e visualização, o usuário passa a dispor de um ambiente altamente flexível e robusto para a implementação e avaliação de suas propostas.

No presente trabalho, para a realização das análises abordadas nos tópicos subsequentes, será empregada a integração entre o OpenDSS e o Python. Por meio da biblioteca *py_dss_interface*, torna-se possível estabelecer a conexão com arquivos no formato “.dss”, permitindo explorar, de forma ampliada, os resultados obtidos. Essa integração possibilita o uso das diversas ferramentas e bibliotecas disponíveis em Python, contribuindo tanto para a análise dos dados quanto para a implementação de novas abordagens e tipologias de estudo.

3.2 Modelos de cargas disponíveis:

O OpenDSS é estruturado a partir de três principais categorias de elementos: barras, *Power Delivery Elements* (PD) e *Power Conversion Elements* (PC). As barras constituem os pontos de conexão do sistema, sendo responsáveis por intermediar todas as ligações existentes no circuito elétrico.

Os *Power Delivery Elements* (PD) correspondem aos elementos responsáveis pela transferência de energia entre diferentes pontos do sistema, sendo, em geral, caracterizados pela presença de mais de um terminal. Exemplos típicos incluem linhas de distribuição, transformadores e elementos puramente reativos, como capacitores e indutores.

Por fim, os *Power Conversion Elements* (PC) são aqueles destinados à conversão de energia elétrica em outras formas de energia, ou vice-versa. Nessa categoria enquadram-se elementos como cargas, fontes, baterias e diferentes tipos de geração distribuída. De modo geral, esses componentes são modelados com um único terminal de conexão.

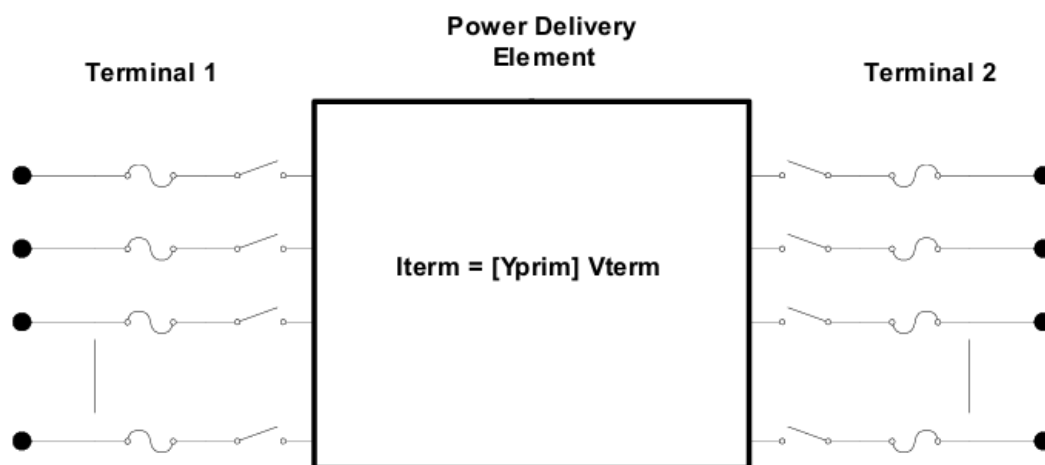


Fig. 11 - Modelo típico representativo de um elemento "Power Delivery Elements"

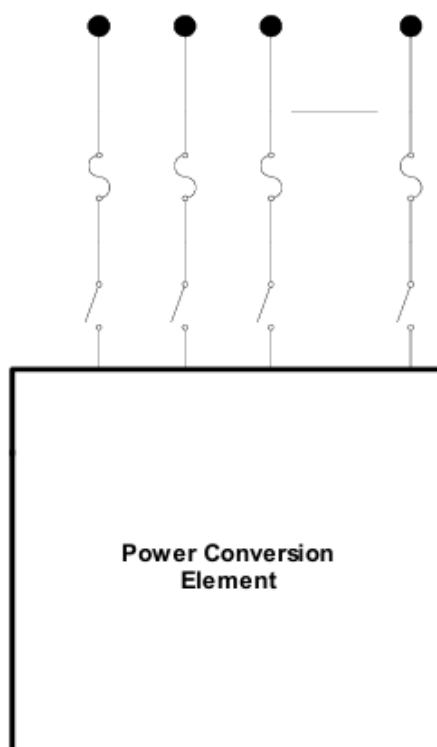


Fig. 12 - Modelo típico representativo de um elemento “Power Conversion Elements”.

Enquanto os elementos do tipo *Power Delivery* (PD) são modelados por meio de matrizes de admitância constantes, os *Power Conversion Elements* (PC) podem apresentar comportamentos mais complexos, frequentemente caracterizados como não lineares.

Direcionando o foco para o objetivo deste subcapítulo, que consiste no estudo das cargas classificadas como elementos do tipo PC no OpenDSS, observa-se que esses componentes são modelados, no software, a partir de equivalentes de Norton. Nesse modelo, a impedância em paralelo representa a parcela linear do comportamento da carga, enquanto a fonte de corrente associada é responsável por incorporar as não linearidades do equipamento.

Essa representação é empregada nos cálculos de fluxo de potência realizados pelo OpenDSS, os quais serão brevemente discutidos nas seções subsequentes deste capítulo.

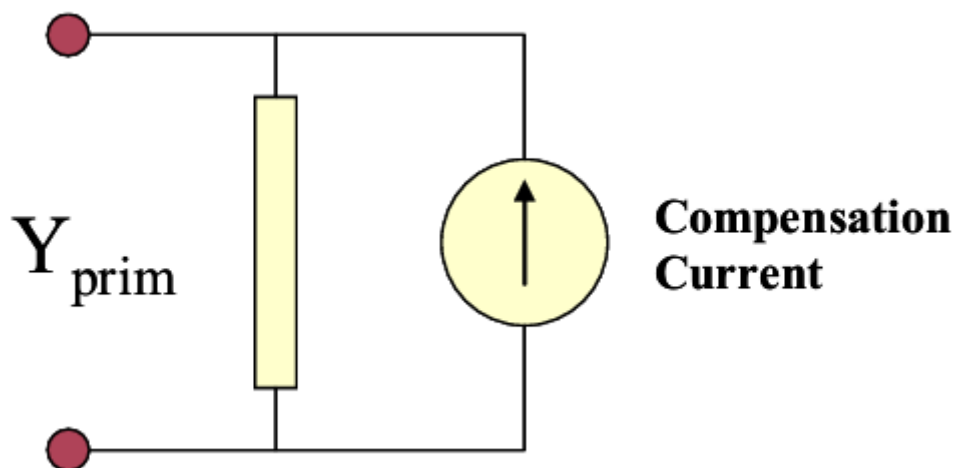


Fig. 13: Modelo dos elementos PCs visualizado pelo software.

As cargas presentes nos circuitos definidos pelos usuários podem apresentar diferentes comportamentos em relação à potência consumida, em função das variações da tensão no ponto de conexão. Nesse contexto, o OpenDSS disponibiliza distintos modelos de carga, cada um representando características ou forma representativa específica de resposta da potência à tensão. A seguir, são apresentados os modelos disponíveis no software, acompanhados de breves descrições.

1. **Modelo de Potência ativa e reativa constante:** Conhecido como modelo de potência constante, é amplamente utilizado em estudos de fluxo de potência, especialmente em sistemas de transmissão. Nesse modelo, as potências ativa e reativa permanecem constantes independentemente da variação de tensão, o que pode ocasionar dificuldades de convergência em situações de queda acentuada de tensão no sistema.
2. **Modelo de Impedância Constante:** Neste modelo, as potências ativa e reativa variam proporcionalmente ao quadrado da tensão aplicada. Trata-se de um modelo tipicamente linear, que apresenta elevada robustez numérica, garantindo a convergência do fluxo de potência em praticamente todas as condições de operação.
3. **Modelo de potência constante e potência reativa quadrática:** Esse modelo combina características dos modelos anteriores, considerando a potência ativa como constante, enquanto a potência reativa varia com o quadrado da tensão, de forma semelhante ao modelo de impedância constante.

4. **Modelo exponencial:** A dependência das potências ativa e reativa em relação à tensão é representada por meio de uma função exponencial. Esse modelo é frequentemente utilizado em estudos de *Conservation Voltage Reduction (CVR)*, nos quais se avalia a sensibilidade do consumo de potência frente a variações de tensão. Permite representar comportamentos intermediários entre os modelos clássicos, de forma mais flexível, ainda que com menor detalhamento físico.
5. **Modelo de corrente constante:** Nesse modelo, a corrente é mantida constante, enquanto as potências ativa e reativa variam linearmente com a magnitude da tensão. Esse comportamento tem se tornado mais representativo em equipamentos modernos presentes em sistemas de distribuição.
6. **Potência ativa constante e potência reativa ao quadrado fixa:** Semelhante ao modelo 3, este modelo considera a potência ativa constante e a potência reativa variando com o quadrado da tensão. A principal diferença está no fato de que a potência ativa, quando definida como “constante”, pode ser ajustada ao longo do tempo por meio de perfis como o *loadshape*, enquanto uma grandeza definida como “fixa” permanece inalterada durante toda a simulação.
7. **Potência ativa Constante e Potência reativa quadrática:** Apresenta comportamento equivalente ao modelo 3, no qual a potência reativa varia com o quadrado da tensão, enquanto a potência ativa permanece constante.
8. **Modelo ZIP:** Neste modelo, as potências ativa e reativa são representadas como uma combinação ponderada de três comportamentos básicos: impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P). Trata-se de um modelo mais completo e flexível, amplamente utilizado para representar de forma mais realista o comportamento das cargas em função da variação de tensão.

Assim como ocorre em outros softwares de fluxo de potência, o OpenDSS pode apresentar dificuldades de convergência quando os níveis de tensão nas cargas se afastam significativamente de seus valores nominais. Nesses casos, torna-se necessário o uso de estratégias e recursos adicionais para contornar tais limitações numéricas e garantir a obtenção de resultados consistentes.

Destaca-se que, especialmente em cargas modeladas como potência constante, é comum a ocorrência de falhas no processo iterativo de solução do fluxo de potência quando há quedas acentuadas de tensão no sistema, caso não sejam adotadas medidas mitigadoras. Nessas situações, o algoritmo pode indicar a não convergência como um indicativo de

colapso do sistema, uma vez que a manutenção da potência constante sob condições de baixa tensão implica em elevação significativa da corrente, o que, em um cenário real, poderia levar à atuação de dispositivos de proteção ou até mesmo à interrupção do fornecimento de energia.

Embora essa interpretação seja consistente em estudos de sistemas de transmissão, no contexto dos sistemas de distribuição o comportamento prático pode diferir. Isso ocorre porque, na realidade, após a remoção da causa que originou a variação de tensão, o sistema tende a retornar às suas condições normais de operação. Ainda assim, do ponto de vista computacional, o método iterativo pode não convergir, evidenciando uma limitação inerente à modelagem adotada.

Desse modo, a fim de evitar falhas no processo iterativo de cálculo do fluxo de potência, que podem comprometer simulações de longa duração, o OpenDSS incorpora, na modelagem de cargas, parâmetros adicionais que auxiliam na estabilidade numérica. Independentemente do modelo de carga adotado, destacam-se as variáveis V_{minPU} (valor padrão de 0,95) e V_{maxPU} (valor padrão de 1,05), que definem limites normalizados de tensão. Quando a tensão no ponto de conexão da carga ultrapassa esses limites, o modelo passa a assumir um comportamento dependente da tensão e da corrente com características mais lineares, com o objetivo de evitar a não convergência do método iterativo.

Nas versões iniciais do software, essa transição para um comportamento linear era representada por uma relação linear entre o valor de tensão limite e a condição de tensão nula. No entanto, verificou-se que, em determinadas situações, essa abordagem não era suficiente para garantir a convergência. Como solução, foi introduzida a variável adicional V_{lowPU} , cujo valor padrão corresponde a 0,5 pu da tensão nominal. Quando a tensão atinge esse patamar, o modelo de carga definido pelo usuário é automaticamente substituído por um modelo de impedância constante, o qual apresenta maior robustez numérica e, conseqüentemente, maior garantia de convergência no processo de cálculo do fluxo de potência.

A partir da implementação dessa variável adicional, a transição do comportamento das cargas, em situações de queda de tensão, passou a ocorrer em duas etapas. Inicialmente, ao ser atingido o valor de V_{minPU} , o comportamento da carga passa a ser linear, estabelecido entre esse nível de tensão e o valor definido por V_{lowPU} . A partir desse

ponto, ao se alcançar o limite inferior, a carga passa a ser representada por um modelo de impedância constante, independentemente do modelo originalmente especificado pelo usuário.

Dessa forma, embora os resultados do fluxo de potência obtidos sob essas condições possam não representar fielmente o comportamento físico real do sistema, o aspecto mais relevante reside na garantia da continuidade do processo iterativo, evitando falhas que poderiam comprometer simulações extensas e resultados já obtidos. Adicionalmente, a própria ocorrência de níveis críticos de tensão constitui um indicativo importante para o planejamento e a operação do sistema, evidenciando a existência de condições anormais ou inadequadas nos elementos da rede.

A seguir, apresenta-se a Fig. 14 ilustrativa dos comportamentos anteriormente descritos para uma carga originalmente modelada como potência constante. Além de evidenciar a resposta do modelo em condições de queda de tensão, a figura também destaca a região de comportamento linear associada ao limite superior definido por V_{maxPU} . Nessa condição, a relação segue uma trajetória linear com inclinação equivalente àquela que seria obtida caso o trecho delimitado por V_{minPU} fosse estendido linearmente até o valor nulo na representação gráfica.

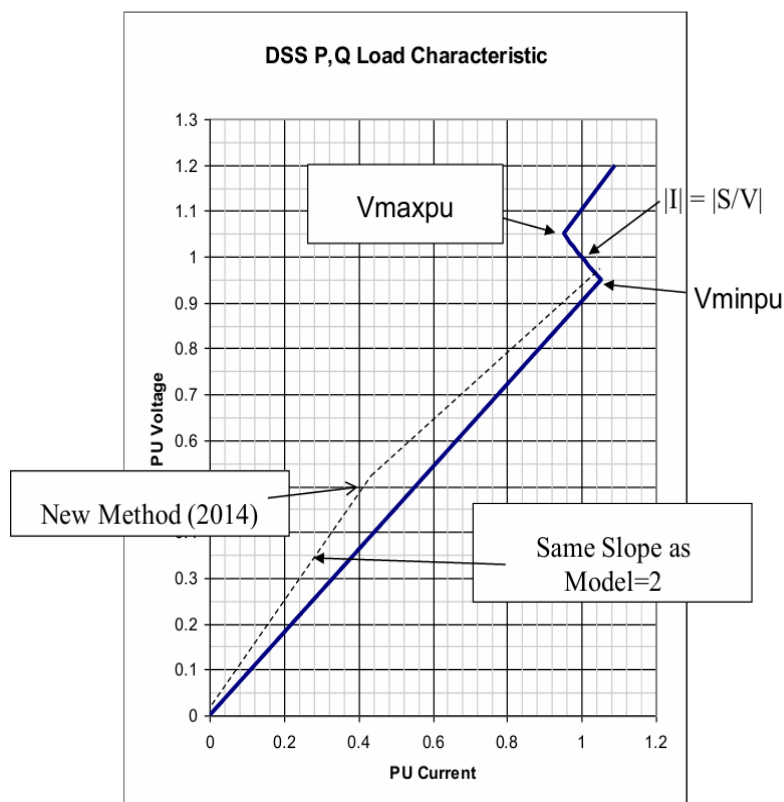


Fig. 14 - Visualização do comportamento completo de uma carga com as variáveis V_{minPU} , V_{maxPU} , V_{lowPU} .

A problemática apresentada foi exemplificada com base no modelo de potência constante devido à sua maior simplicidade didática. No entanto, as limitações discutidas são aplicáveis aos demais modelos de carga, com exceção do modelo de impedância constante, o qual, conforme destacado, apresenta maior robustez numérica e tende a garantir a convergência do processo iterativo.

Além dos parâmetros anteriormente mencionados, é necessária a definição de grandezas fundamentais para a modelagem de cargas no OpenDSS, tais como número de fases, barra de conexão, tipo de ligação e tensão nominal, entre outras. Parte dessas variáveis pode assumir valores padrão definidos pelo próprio software, enquanto outras devem ser especificadas pelo usuário conforme as características do sistema em estudo. Informações mais detalhadas sobre esses parâmetros podem ser encontradas na documentação oficial do OpenDSS. A seguir, apresenta-se um exemplo de definição de carga no ambiente do software.

```
New Load.BT_56_1429581_M2UB Bus1=BT4446.2.4 phases=1 conn=wye Model=2
kV=0.219 kW=0.637 pf=0.92 Vminpu=0.92 Vmaxpu=1.50 daily=RES_5_Dia_Util
status=variable
```

Fig. 15: Definição de carga.

No que se refere ao modelo polinomial, também denominado modelo ZIP, que constitui o foco deste trabalho, sua definição no OpenDSS é realizada por meio da seleção do modelo 8 dentre os disponíveis. Adicionalmente, é necessário fornecer um vetor de parâmetros que segue uma estrutura específica, sendo composto por sete variáveis que caracterizam o comportamento da carga em função da tensão.

$$ZIPV = [Z_P, I_P, P_P, Z_Q, I_Q, P_Q, V_{cut-off}]$$

As constantes associadas às seis primeiras variáveis do vetor representam a composição do comportamento da carga em função da tensão, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa. Em termos práticos, esses coeficientes definem a participação relativa dos componentes de impedância constante, corrente constante e potência constante no modelo ZIP.

Como exemplo, considerando o modelo oficialmente adotado em estudos de perdas elétricas, no qual a potência ativa é composta por 50% de impedância constante e 50% de potência constante, enquanto a potência reativa é integralmente modelada como impedância constante, o vetor de parâmetros pode ser expresso como [0,5, 0, 0,5, 1, 0, 0, V_cut-off].

A variável $V_{cut-off}$ representa o valor de tensão, em pu, abaixo do qual a carga é desconectada do sistema. Para o modelo em questão, o valor mais adequado para esse parâmetro é zero, de modo a evitar o desligamento da carga em qualquer condição de operação, o que está em conformidade com as diretrizes estabelecidas no Módulo 8 do PRODIST e as notas técnicas que englobaram a discussão para determinação do melhor valor a ser utilizado para esta variável.

A seguir, apresenta-se um exemplo de definição de carga utilizando o modelo ZIP.

```
New Load.BT_56_1429581_M2UB Bus1=BT4446.2.4 phases=1 conn=wye Model=8
kV=0.219 kW=1.274 pf=0.92 Vminpu=0.92 Vmaxpu=1.50 daily=RES_5_Dia_Util
status=variable ZIPV=(0.5,0,0.5,1,0,0,0)
```

Fig. 16 - Definição de Carga, modelo ZIP.

Dessa forma, este subcapítulo teve como objetivo apresentar, de maneira introdutória, as principais tipologias de elementos e modelos de carga disponíveis no OpenDSS, com ênfase nas variáveis que os caracterizam e em seus respectivos comportamentos. Adicionalmente, foi realizado um detalhamento do modelo polinomial ZIP e de sua implementação no software, o qual será amplamente explorado nos capítulos subsequentes deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

3.3 Metodologias de fluxo de potência:

A aplicação do fluxo de potência em um circuito permite a obtenção de grandezas elétricas como corrente, tensão e potência em todos os elementos e barras do sistema, sendo, portanto, um procedimento fundamental em estudos que envolvem a análise do comportamento de redes elétricas.

O OpenDSS, diferentemente da maioria dos softwares dedicados à solução de fluxo de potência, não foi concebido exclusivamente para essa finalidade. Embora possua essa funcionalidade, ela deriva de sua estrutura voltada à análise harmônica, que apresenta maior nível de complexidade em comparação aos métodos tradicionais de fluxo de potência. Dessa forma, a obtenção dos resultados associados ao fluxo de potência ocorre de maneira mais direta dentro do OpenDSS. Em contrapartida, softwares desenvolvidos especificamente para análise de fluxo de potência podem apresentar limitações ao tentar incorporar estudos harmônicos, devido à maior complexidade envolvida nesse tipo de modelagem.

Embora o OpenDSS seja predominantemente voltado à análise de sistemas de distribuição, seu algoritmo de solução também é capaz de atender circuitos radiais, como redes de transmissão e subtransmissão. Essa característica é relevante, uma vez que concessionárias de energia frequentemente operam com diferentes topologias em suas áreas de concessão. Atualmente, o software apresenta resultados com elevada precisão, independentemente de o sistema analisado possuir configuração radial ou malhada.

Adicionalmente, com o objetivo de proporcionar maior flexibilidade e ampliar as possibilidades de análise, o OpenDSS disponibiliza diversos modos de solução, como *Snapshot*, *Daily*, *Duty Cycle*, *Monte Carlo*, entre outros. Esses modos permitem a obtenção de resultados das grandezas elétricas, como tensão, corrente, potência e perdas, ao longo de diferentes horizontes temporais, de acordo com as características específicas de cada tipo de simulação.

Atualmente, o OpenDSS disponibiliza duas abordagens principais para a obtenção de resultados de fluxo de potência. A primeira consiste em uma solução iterativa, na qual todos os elementos classificados como *Power Conversion Elements* (PC), tais como cargas, fontes e gerações distribuídas, são representados como fontes de corrente. A partir dessa representação, os valores de tensão nas barras e as demais grandezas elétricas são obtidos por meio de um processo iterativo, conforme o algoritmo de solução adotado, o qual será detalhado em seções posteriores.

A segunda abordagem corresponde a uma solução direta, na qual todos os elementos do sistema são considerados como impedâncias constantes. Nessa condição, não há necessidade de um processo iterativo para a obtenção dos resultados, o que simplifica o cálculo do fluxo de potência.

O modo iterativo é o padrão adotado pelo OpenDSS, por permitir a representação de comportamentos mais realistas dos elementos do sistema. No entanto, o software oferece flexibilidade ao usuário para a escolha da metodologia mais adequada, possibilitando a seleção do método de solução conforme as necessidades específicas de cada simulação.

No modo iterativo, o OpenDSS oferece ainda a possibilidade de escolha entre dois algoritmos de solução: o método de injeção de corrente, selecionado como padrão pelo software, e o método de Newton, que não deve ser confundido com os algoritmos clássicos de fluxo de potência do tipo Newton-Raphson e suas variações. O detalhamento do funcionamento desses algoritmos não faz parte do escopo deste trabalho.

Em termos de aplicação, recomenda-se o uso do método de Newton em situações que demandem maior robustez numérica. No entanto, o método de injeção de corrente, também conhecido como *Normal Mode*, apresenta atualmente desempenho computacional mais eficiente, aliado a níveis de precisão e robustez comparáveis ao método de Newton. Dessa forma, na maioria dos casos, não se faz necessária a alteração

do algoritmo padrão, seja por critérios de desempenho, convergência ou de exatidão dos resultados.

4. CIRCUITO SECUNDARIO UTILIZADO:

Ao longo deste trabalho, com o objetivo de fornecer uma base prática para a validação das análises e das proposições desenvolvidas, será utilizado um circuito secundário real localizado na cidade de Palmas, Tocantins, devidamente modelado no software OpenDSS.

O sistema em estudo é composto por um transformador de 45 kVA, com níveis de tensão de 13.800 V / 380 V, além de 29 cargas residenciais, das quais 10 possuem sistemas fotovoltaicos associados e 20 cargas correspondentes à iluminação pública.

Para a representação geográfica da rede em estudo, podem ser utilizados os arquivos disponibilizados pelas concessionárias por meio da Base de Dados Geográfica da Distribuição (BDGD), a qual reúne informações detalhadas dos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil para diferentes anos.

Entre os dados disponíveis, destacam-se informações georreferenciadas de transformadores com suas respectivas características, além de trechos de rede associados a diferentes níveis de tensão, entre outros atributos relevantes.

Ressalta-se, entretanto, que, em sua versão pública, a BDGD não disponibiliza informações georreferenciadas dos consumidores, as quais permanecem restritas às bases de dados internas das concessionárias, em função de questões relacionadas à privacidade e à segurança.

É válido salientar que este circuito modelado em arquivos DSS, juntamente com suas informações geográficas, foi disponibilizado pelo Laboratório de distribuição de energia elétrica (LADEE) presente na Universidade Federal De Uberlândia permitindo assim a realização de comparações e validações dos modelos propostos e testados neste documento.

Observa-se ainda que, para utilização nas estão simulações presentes neste documento, todo e qualquer elemento presente e anteriormente definido foi-se mantido a fim de conservar o real comportamento do então circuito modelado no formato DSS.

A partir da integração desses dados com a linguagem Python, utilizando bibliotecas como Pandas, GeoPandas e Plotly, é possível construir a representação geográfica apresentada a seguir, a qual ilustra os principais elementos do circuito secundário analisado.

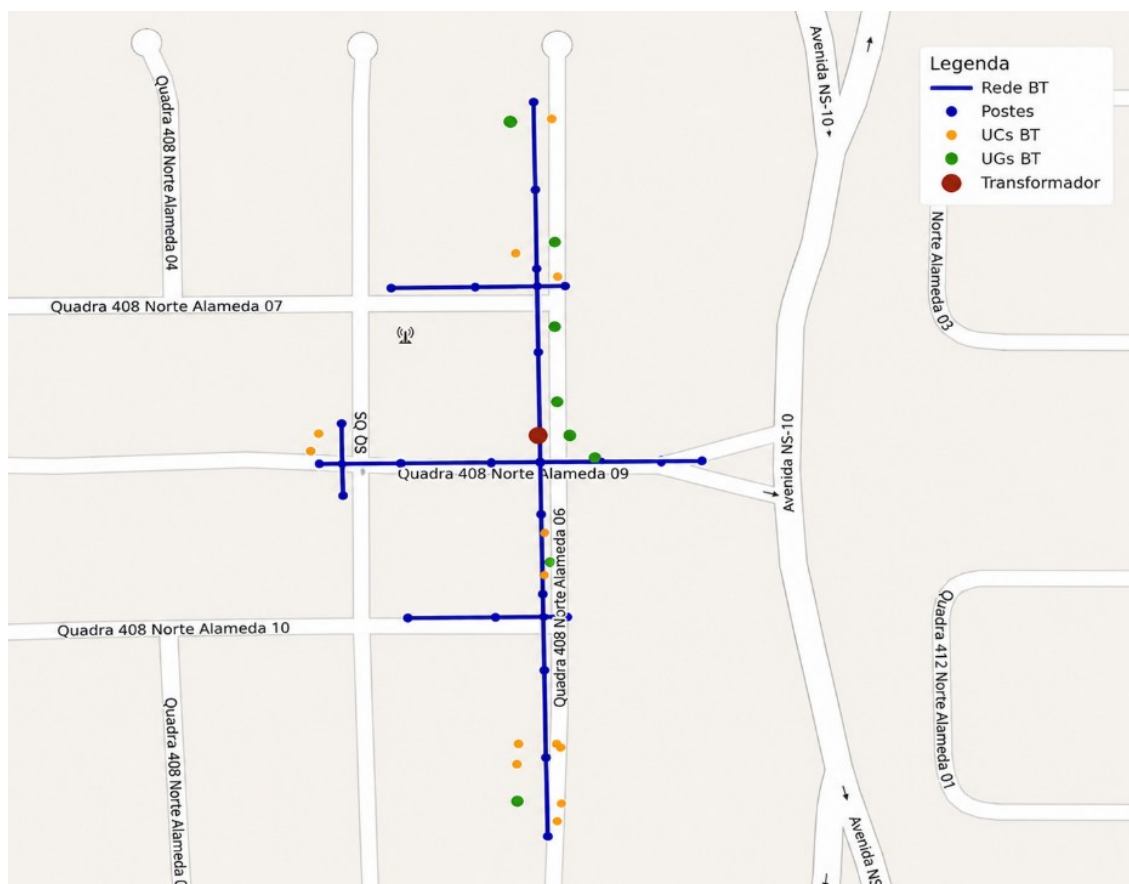


Fig. 17 - Circuito secundário trabalhado, referenciado de forma geográfica.

5. OPORTUNIDADE DE MELHORIA NA ATUAL METODOLOGIA EMPREGADA PELO MODULO 7 PARA CÁLCULO DE PERDAS:

Atualmente, conforme já destacado, as perdas técnicas e não técnicas apuradas pela ANEEL, a partir dos dados da BDGD das respectivas concessionárias, são oficialmente calculadas por meio de estudos de fluxo de potência realizados no software OpenDSS, previamente detalhado. Nesse contexto, utiliza-se prioritariamente o algoritmo denominado “Normal”, o qual apresenta, na maioria dos casos, elevada rapidez e precisão na convergência das soluções para os problemas propostos.

Ainda de acordo com o código-fonte adotado pela ANEEL para o cálculo das perdas elétricas, as cargas são modeladas a partir da decomposição em duas parcelas, correspondentes à combinação dos modelos 2 e 3. O objetivo final é representar um comportamento composto por 50% de potência constante e 50% de impedância constante para a potência ativa, enquanto, para a potência reativa, adota-se um comportamento integralmente baseado em impedância constante.

A definição de diversos desses princípios, correlacionados às diretrizes estabelecidas no Módulo 7 do PRODIST atualmente vigente, ocorreu no âmbito da Audiência Pública nº 026/2014, a qual foi estruturada em duas etapas de discussão e deliberação. Na ocasião, a composição da carga do tipo ZIP, anteriormente mencionada e ainda adotada, foi estabelecida com base nas orientações do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), conforme descrito no documento “Premissas, critérios e metodologias para estudos elétricos”. Nesse documento, é recomendada, para estudos de estabilidade eletrodinâmica, a utilização dessa mesma composição para cargas cuja caracterização detalhada não seja conhecida.

Dessa forma, apesar das diversas críticas apresentadas durante o processo de contribuição por parte dos diferentes agentes envolvidos, não foram propostas métricas ou metodologias alternativas capazes de definir, de maneira mais representativa e homogênea, uma composição de carga aplicável a todas as concessionárias. Em razão disso, manteve-se a premissa anteriormente estabelecida, sendo está aplicada de forma uniforme às distintas classes de consumidores presentes nos sistemas de média e baixa tensão, sem a adoção de qualquer tipo de diferenciação.

Nesse contexto, durante o processo de definição metodológica, dentre os modelos de carga disponíveis à época, previamente apresentados e descritos no capítulo específico

dedicado às funcionalidades do software, considerou-se inicialmente a adoção do modelo 8, amplamente conhecido como modelo ZIP, como uma alternativa para a representação da composição das cargas.

Diante desse cenário, o presente capítulo tem como objetivo, inicialmente, demonstrar a elevada capacidade do modelo ZIP na representação das cargas de um sistema elétrico, por meio de sua implementação no modelo 8 do OpenDSS. Destaca-se que essa abordagem proporciona maior flexibilidade na definição da composição das cargas, permitindo sua adaptação a eventuais mudanças regulatórias futuras. Adicionalmente, apresenta vantagens em termos de desempenho computacional quando comparada à modelagem atualmente adotada, favorecendo a realização de estudos e simulações de forma mais eficiente.

Por fim, propõe-se uma nova composição de carga mais aderente à realidade contemporânea dos consumidores residenciais, fundamentada em bases teóricas e evidências experimentais que conferem robustez aos resultados obtidos.

5.1 Modelo atualmente utilizado:

Conforme descrito no subcapítulo 3.2, o OpenDSS dispõe de diversas tipologias de modelagem de carga. No entanto, ao se considerar a composição anteriormente adotada pela ANEEL para o cálculo de perdas elétricas, observa-se que os modelos mais adequados para a definição das proporções desejadas são o modelo 2, que representa impedância constante, o modelo 3, caracterizado por potência ativa constante e potência reativa com variação quadrática, e o modelo 8, correspondente ao modelo ZIP.

Dessa forma, atualmente, o código-fonte da ANEEL destinado ao cálculo de perdas modela as cargas de média e baixa tensão como uma composição dos modelos 2 e 3, sendo cada um responsável por representar metade da carga total. Em termos práticos, isso implica que, em relação ao valor nominal de potência da carga, cada modelo é parametrizado com 50% desse valor. Na sequência, apresenta-se um exemplo de definição de carga no *OpenDSS* conforme essa abordagem valendo destacar que o fator de potência de 0.92 também vem de forma normativa.

```
New Load.BT_56_1429581_M2UB Bus1=BT4446.2.4 phases=1 conn=wye Model=2
kV=0.219 kW=0.637 pf=0.92 Vminpu=0.92 Vmaxpu=1.50 daily=RES_5_Dia_Util
status=variable

New Load.BT_56_1429581_M3UB Bus1=BT4446.2.4 phases=1 conn=wye Model=3
kV=0.219 kW=0.637 pf=0.92 Vminpu=0.92 Vmaxpu=1.50 daily=RES_5_Dia_Util
status=variable
```

Fig 18 - Definição de carga para a metodologia atual.

Ressalta-se que a combinação dos modelos 2 e 3 é compatível com a modelagem estipulada, uma vez que o modelo 2 representa um comportamento de impedância constante tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa da carga. Por sua vez, o modelo 3 adota um comportamento de potência constante para a parcela ativa, enquanto a potência reativa apresenta variação associada à impedância constante. A associação desses dois modelos resulta, ao final, na configuração normativa estabelecida pela ANEEL, conforme anteriormente discutido.

Destaca-se ainda que, durante a Audiência Pública nº 026/2024, o modelo efetivamente definido foi o modelo 8, o qual permite a representação da composição desejada por meio de uma única carga equivalente. Uma das principais divergências apontadas nas notas

técnicas relacionadas a essa modelagem refere-se ao parâmetro $V_{cut-off}$, responsável por estabelecer o valor de tensão abaixo do qual a carga deixa de ser considerada no fluxo de potência. A seguir, apresenta-se, para fins comparativos, a definição da mesma carga anteriormente modelada a partir dos modelos 2 e 3, agora utilizando o modelo 8.

```
New Load.BT_56_1429581_M2UB Bus1=BT4446.2.4 phases=1 conn=wye Model=8
kV=0.219 kW=1.274 pf=0.92 Vminpu=0.92 Vmaxpu=1.50 daily=RES_5_Dia_Util
status=variable ZIPV=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.9)
```

Fig. 19 - Definição de carga para a metodologia Sugerida (Modelo 8).

A princípio, a metodologia proposta considerava a adoção do parâmetro $V_{cut-off}$ igual ao limite inferior da faixa de tensão precária, correspondente a 0,9 pu, com o objetivo de desconsiderar cargas submetidas a níveis de tensão significativamente distantes do valor nominal. Tal abordagem buscava evitar situações que pudessem comprometer a convergência do fluxo de potência, bem como a representação de condições operativas associadas a patamares inadequados de tensão no sistema elétrico.

Contudo, após as discussões e contribuições apresentadas pelos órgãos envolvidos, concluiu-se que a definição mais adequada para esse parâmetro seria o valor nulo. Dessa forma, a carga não seria retirada do sistema em nenhuma condição de operação. Em contrapartida, adotam-se parâmetros universais nos modelos que promovem a linearização do comportamento da carga em faixas críticas de tensão, o que se mostra mais apropriado para evitar divergências nos resultados e proporcionar uma modelagem mais aderente à realidade.

De todo modo, a ANEEL optou por alterar a forma de implementação do modelo utilizado para representar a composição equivalente aos modelos 2 e 3 em seu código-fonte atual.

Observa-se que a abordagem atualmente adotada implica maior exigência computacional, uma vez que cada carga passa a ser representada por duas instâncias, em contraste com a possibilidade de utilização de uma única instância por meio do modelo 8 (ZIP). No contexto do cálculo de perdas, esse aumento no número de cargas é desfavorável sob o ponto de vista do tempo de simulação, pois demanda maior esforço computacional não apenas para a convergência do fluxo de potência, mas também para a execução do algoritmo de cálculo de perdas, o qual será detalhado no próximo subcapítulo.

5.2 Algoritmo de perdas técnicas (SDMT E SDBT), energymeter e resultados iniciais:

Para o cálculo das perdas técnicas totais nas redes de média e baixa tensão, é fundamental, em um primeiro momento, dispor do valor real da energia fornecida pelo alimentador em análise, obtido por meio de medições em campo. Esse dado é essencial, uma vez que o circuito modelado no OpenDSS não contempla, de forma explícita, as parcelas de energia associadas às perdas não técnicas. Dessa forma, a incorporação dessas parcelas torna-se necessária para que seja possível determinar, de maneira mais fidedigna, as perdas técnicas totais da rede em estudo.

Para a incorporação da energia associada às perdas não técnicas, utiliza-se um algoritmo implementado por meio da interface COM disponibilizada pelo OpenDSS. Esse algoritmo realiza sucessivas execuções de fluxo de potência no sistema modelado, ajustando iterativamente os parâmetros até que a energia fornecida pelo alimentador simulado se iguale ao valor medido em campo, dentro de uma margem de erro previamente estabelecida pelo usuário.

Com o objetivo de simular o procedimento adotado pela ANEEL, no presente estudo foi considerado o circuito secundário apresentado no Capítulo 4. Para isso, desenvolveu-se um código por meio da integração entre OpenDSS e Python, visando, inicialmente, a obtenção das perdas técnicas totais ao longo de um período de uma semana. O propósito dessa abordagem é possibilitar a comparação do tempo de simulação requerido ao se adotar o modelo de carga atualmente utilizado pela ANEEL e o modelo 8 disponibilizado pelo OpenDSS.

Em conformidade com as premissas estabelecidas na Nota Técnica nº 0104/2014, é importante destacar que, por se tratar de um circuito exclusivamente secundário, não é possível dispor de um valor real de energia medido em campo para esse sistema. Dessa forma, adotou-se como premissa um valor correspondente a 5% acima da energia total fornecida estimada a partir da simulação. Em termos práticos, isso significa que, caso a simulação convirja para um valor de 250 kWh, considera-se como referência de medição em campo o valor de 262,5 kWh, conforme ilustrado na equação a seguir.

$$1.05 \times 250kWh = 262.5 kWh$$

Destaca-se ainda que cada unidade consumidora possui três tipologias de consumo associadas, correspondentes aos perfis de dia útil, sábado e domingo, as quais são obtidas por meio de campanhas de medição realizadas pelas concessionárias. Essas tipologias caracterizam os padrões de consumo ao longo de cada tipo de dia e são representadas no OpenDSS por meio do elemento denominado *LoadShape*.

De posse desse valor de referência, torna-se necessário incorporar energia ao sistema modelado de modo que o valor simulado alcance o montante considerado como medido em campo, por exemplo, 262,5 kWh. No caso analisado neste trabalho, esse ajuste é realizado por meio de um algoritmo que executa sucessivos fluxos de potência, monitorando a energia injetada na rede. A cada iteração, caso o valor obtido seja inferior ou superior ao valor de referência, a potência nominal de todas as cargas do sistema é ajustada de forma incremental ou decremental, com base em um fator percentual proporcional ao erro observado. Esse procedimento é aplicado para as três tipologias de dia, e, ao final, obtém-se o valor total das perdas técnicas semanais, o qual pode ser facilmente extrapolado para a estimativa das perdas mensais do sistema em análise.

O OpenDSS dispõe de ferramentas que permitem a exportação de diversos parâmetros obtidos durante a simulação, tais como perdas e energia consumida pelo sistema, entre outros. Contudo, essas ferramentas fornecem apenas os valores referentes à última iteração realizada. Dessa forma, ao se simular, por exemplo, um período de 24 horas, apenas o valor correspondente ao instante final é disponibilizado, não sendo apresentado ao usuário o valor acumulado ao longo de todo o intervalo analisado.

Diante dessa limitação, a ferramenta mais adequada para esse tipo de aplicação é o elemento denominado *EnergyMeter*, presente no OpenDSS, o qual simula o funcionamento de um medidor de energia. Esse elemento permite não apenas a medição de energia, mas também o monitoramento de diversos parâmetros ao longo de regiões do sistema elétrico, não se restringindo a pontos específicos. Tal característica possibilita a análise de áreas inteiras da rede, cuja definição e coordenação são detalhadas no manual do próprio software, sendo esse aspecto especialmente relevante quando múltiplos medidores são utilizados em uma mesma rede.

No presente estudo, foi alocado um único elemento *EnergyMeter* no primeiro terminal da linha inicial do sistema, posicionado imediatamente após o circuito equivalente de Thévenin que representa o sistema a montante da rede analisada. Nessa configuração,

como não há outros medidores distribuídos ao longo do sistema e o elemento encontra-se instalado no ponto de início do circuito, o *EnergyMeter* passa a abranger integralmente a área em análise. Dessa forma, são disponibilizados parâmetros como a energia ativa que atravessa o ponto de medição, a energia consumida na área monitorada, as perdas nos elementos responsáveis pelo fornecimento de energia, incluindo transformadores e linhas, bem como as perdas ôhmicas nesses componentes. Além disso, o elemento fornece informações específicas, como perdas em linhas e transformadores, entre diversos outros parâmetros, alguns dos quais podem ser configurados conforme a necessidade do usuário.

A principal vantagem desse elemento reside no seu comportamento em simulações sequenciais, como aquelas empregadas na obtenção de valores diários, mensais ou anuais. Nessas condições, o *EnergyMeter* é inicializado com valores nulos e passa a acumular os resultados a cada passo da simulação. Dessa forma, os parâmetros obtidos ao final do processo representam valores integrados ao longo de todo o período analisado, diferentemente da abordagem anterior, que fornecia apenas resultados pontuais referentes à última iteração realizada.

Nesse contexto, o elemento *EnergyMeter* mostrou-se fundamental para a construção do algoritmo e para a obtenção dos resultados, uma vez que possibilitou a determinação da energia consumida pelo sistema, bem como das perdas totais associadas.

Conforme discutido anteriormente, esse algoritmo desempenha papel central na comparação dos tempos de convergência entre a modelagem atualmente adotada pela ANEEL e a utilização do modelo 8 disponibilizado pelo OpenDSS. Parte-se da hipótese de que, devido ao fato de a modelagem vigente empregar, no mínimo, o dobro de instâncias de carga em relação a um sistema integralmente representado pelo modelo 8, o tempo computacional necessário para a convergência tende a ser reduzido com a adoção deste último. Tal redução representa uma vantagem relevante tanto para as concessionárias quanto para a própria ANEEL, especialmente considerando a aplicação desses algoritmos em alimentadores de diferentes portes e em períodos de análise superiores a uma semana.

Para o caso em estudo, apresenta-se a seguir uma tabela contendo os resultados obtidos, bem como o tempo total necessário para a convergência do algoritmo, considerando tanto a modelagem atualmente adotada no Módulo 7 quanto a modelagem proposta neste

trabalho, baseada no modelo 8. Ressalta-se que, para o algoritmo descrito, foi adotado um critério de erro de 10^{-5} , sem imposição de limite para o número de iterações.

Tabela IV - Resultados Obtidos utilizando metodologia ANEEL (Modelos 2 e 3).

Metodologia ANEEL (Atual)					
	Valor Referencia(kWh)	Valor Medido(kWh)	Perdas(kWh)	Qtd Iterações	Tempo de Simulação(s)
Dia Útil	261,120	261,122	6,055	76	X
Sábado	344,4282	344,4249	7,0224	23	X
Domingo	344	343,997	6,8724	23	X
TOTAL	X	X	44,1725	X	0,5506

Tabela V - Resultados Obtidos utilizando metodologia recomendada (Modelo 8).

Metodologia Sugerida (Modelo 8)					
	Valor Referencia(kWh)	Valor Medido(kWh)	Perdas(kWh)	Qtd Iterações	Tempo de Simulação(s)
Dia Útil	261,120	261,117	6,055	81	X
Sábado	344,4282	344,4253	7,0223	23	X
Domingo	344	343,997	6,8729	23	X
TOTAL	X	X	44,174	X	0,4625

Nas tabelas apresentadas, são exibidos os valores adotados como referência para simular a energia injetada no sistema, representando medições em campo para cada tipologia de dia. Também são apresentados os valores de energia injetada obtidos pelo algoritmo, de forma a atender ao critério de erro estabelecido pelo usuário, bem como as perdas calculadas para cada tipologia e o número de iterações necessárias para que o processo convergisse ao valor de referência considerado.

A partir desses resultados, o cálculo das perdas totais semanais é realizado multiplicando-se o valor obtido para os dias úteis por cinco, em conformidade com a quantidade de dias dessa tipologia em uma semana, e somando-se, em seguida, os valores correspondentes ao sábado e ao domingo. Esse procedimento resultou em um total de perdas equivalente a 44,174 kWh.

Observa-se que, para ambos os modelos, os resultados obtidos são bastante semelhantes, sendo, em muitos casos, praticamente idênticos. Esse comportamento evidencia a consistência e a robustez do modelo proposto, que, além de reproduzir com elevada fidelidade os resultados da modelagem atualmente oficial, apresenta desempenho

superior em termos de tempo computacional, conforme verificado na comparação dos tempos de simulação apresentados nas tabelas.

Dessa forma, confirma-se a vantagem computacional associada à utilização do modelo sugerido, aliada à sua maior simplicidade de implementação. Adicionalmente, destaca-se a flexibilidade proporcionada na definição da composição das cargas, permitindo adaptações mais ágeis e eficientes em estudos futuros, caso sejam necessárias revisões ou aprimoramentos na modelagem adotada. O código utilizado para obtenção dos então resultados presentes nas tabelas anteriores pode ser encontrado na leitura do QR-CODE presente no apêndice deste documento.

5.3 Obtenção das composições zip para equipamentos tipicamente presentes nas residências brasileiras:

Dando continuidade às justificativas anteriormente apresentadas, propõe-se, neste momento, uma nova composição para o modelo ZIP adotado no Modelo 8. Tal proposta difere da configuração atualmente utilizada, a qual, conforme já destacado, foi definida de maneira genérica, carecendo de embasamento científico específico para a representação individualizada de cada tipo de carga.

Nesse contexto, a abordagem proposta consiste, inicialmente, na obtenção dos parâmetros do modelo ZIP associados às potências ativa e reativa de diversos equipamentos já muito comumente presentes em residências brasileiras e com grande potencial de aumento exponencial de sua presença conforme os anos se passarem advinda de uma maior acessibilidade dessas então hoje novas tecnologias.

Para a realização do experimento, foi necessária a utilização de uma fonte capaz de aplicar variações controladas de tensão aos diversos equipamentos analisados. Em conjunto com essa fonte, utilizou-se um medidor apto a registrar grandezas elétricas relevantes, tais como tensão instantânea, corrente e potências ativa e reativa. A partir dessas medições, tornou-se possível obter, posteriormente, as curvas características $P \times V$ e $Q \times V$ dos equipamentos avaliados.

De posse desses comportamentos, e após o devido tratamento das bases de dados, aplicou-se uma regressão polinomial de segunda ordem, com o objetivo de determinar a curva que melhor representa cada equipamento. Dessa forma, foram obtidos os coeficientes do modelo ZIP correspondentes às cargas analisadas.

No presente estudo, o Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE) disponibilizou a infraestrutura necessária para a condução dos ensaios, incluindo uma fonte controlada modelo CSW5550, da California Instruments, capaz de realizar variações de tensão de forma periódica e controlada via software. Ademais, foi utilizado o medidor Phase Extension Pure, responsável pela aquisição e armazenamento de diversas variáveis elétricas, como tensão RMS e instantânea, corrente RMS e instantânea, bem como potência ativa e reativa (máxima ou média). O laboratório também forneceu alguns dos equipamentos ensaiados, os quais serão detalhados posteriormente.



Fig. 20 - Fonte Controlada utilizada no devido experimento.



Fig. 21 - Circuito Medidor utilizado no devido experimento.

Como procedimento padrão adotado para todos os equipamentos analisados, visando à obtenção de seus comportamentos de carga, realizou-se, previamente às medições, a energização dos dispositivos por um período aproximado de 10 minutos, com o objetivo de garantir sua estabilização operacional e evitar a coleta de dados que não representem adequadamente as condições reais de funcionamento.

Em seguida, programou-se a fonte anteriormente mencionada para realizar variações de tensão no intervalo de 1,05 pu a 0,90 pu, em passos de 0,025 pu. Cada nível de tensão foi mantido por um período de 20 segundos, de modo a assegurar a estabilização do equipamento em cada nova condição de operação.

Os equipamentos ensaiados estão apresentados na tabela a seguir, juntamente com imagens do ambiente no qual as medições foram realizadas.

Tabela VI - Equipamentos Analisados

Equipamentos	Marca	Tensão Nominal(V)	Corrente Nominal(mA)
Lampada Incandescente	Philips	127	464
Lampada Halogena	Golden	127	334
Lampada Incandescente(com Dimmer)	Philips	127	328
Lampada Led	Galaxy	127	60
Lampada Fluorecente	FLC	127	489
DeskTop	DELL	127	440
DeskTop	Genérico	220	414
Carregador LapTop	DELL	127	350
Carregador LapTop	Genérico	127	298
Geladeira	Consul	127	1085
Micro-ondas	Panasonic	220	7300
TV Led(55 pol)	Toshiba	127	978
TV Led(32 pol)	SEMP RokuTV	127	493
Ventilador	Mondial	220	175
Monitor	LG	127	249

Ressalta-se que, durante as medições, foram utilizados um alicate amperímetro e um multímetro, este último operando no modo de medição de tensão(voltímetro), com a finalidade de aferir os valores momentaneamente presentes das grandezas elétricas. Tal procedimento teve como objetivo verificar a conformidade das variações de tensão efetivamente aplicadas com aquelas previamente programadas na fonte, bem como acompanhar o comportamento da corrente elétrica ao longo dos ensaios.



Fig. 22 - Bancada utilizada para aferição de resultados e realização experimental.



Fig. 23 - Conexão medidor e computador após medição.



Fig. 24 - Area de realização dos experimentos.



Fig. 25 - Software que permite a configuração da fonte utilizada.

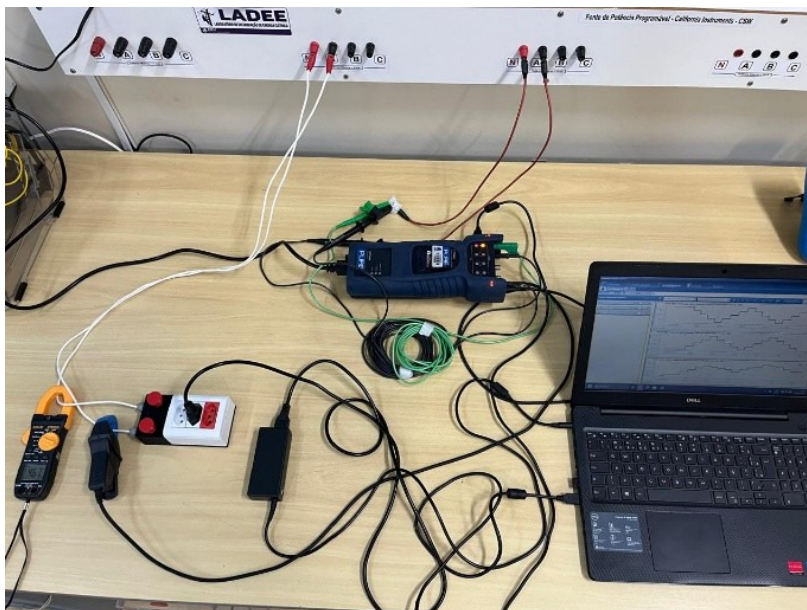


Fig 26 - Dispositivos em momento de medição.

As imagens identificadas da Fig. 22 a Fig. 26 apresentam, sob diferentes ângulos, o ambiente no qual os experimentos foram conduzidos. Destacam-se, em particular, as Figuras 23 e 26, que evidenciam o medidor já conectado ao notebook para a coleta dos dados obtidos durante as medições, bem como a utilização do alicate amperímetro e do multímetro previamente mencionados, integrados ao arranjo experimental com o objetivo de possibilitar a aferição instantânea das grandezas elétricas pelos operadores.

A Fig. 25 ilustra a interface do software empregado no controle da fonte programável, ferramenta essencial para o envio das rotinas de variação de tensão adotadas no experimento.

Após a realização de cada ensaio, tornou-se necessário conectar o medidor ao computador, momento em que o sistema automaticamente encerrava o arquivo de medição e o salvava em formato PQZ, o qual não é amplamente utilizado para leitura e manipulação direta de dados.

Dessa forma, para converter os dados obtidos em informações passíveis de análise, utilizou-se o software proprietário do medidor (PQS Sapphire). Tal ferramenta permite a seleção do arquivo de interesse, a definição das variáveis a serem exportadas, bem como a delimitação do intervalo temporal desejado pelo usuário, possibilitando, posteriormente, a exportação dos dados para o formato Excel, com a resolução de amostragem dentre as opções disponibilizadas pelo próprio software.

No presente estudo, adotou-se uma taxa de amostragem de 1 segundo, com o objetivo de preservar o nível de detalhamento dos dados coletados. As variáveis selecionadas para exportação foram: tensão RMS, corrente RMS e potências médias ativa e reativa.

A seguir, apresenta-se uma ilustração do procedimento no software, bem como o formato final dos dados exportados em Excel:

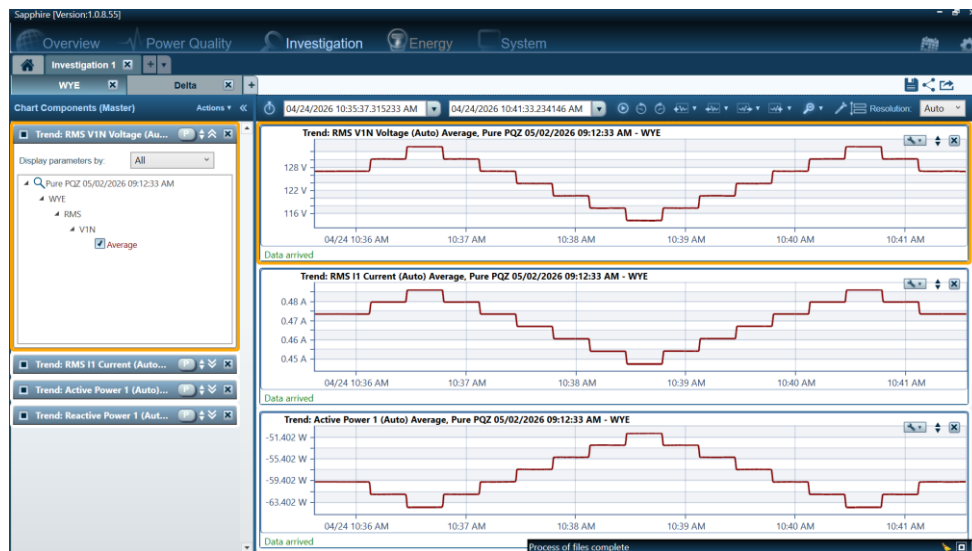


Fig 27 - Software utilizado para exportação das medições realizadas - Sapphire.

	A	B	C	D	E	F
	Date and Time	RMS VIN (Auto), WYE Aver	RMS I1 (Auto), WYE Aver	Active Power 1 (Auto), WYE	Reactive Power 1 (Auto), W	
1	04/24/2026 10:36:04.776451 AM	126,959	0,473	-59,643	7,368	
2	04/24/2026 10:36:05.772764 AM	126,959	0,473	-59,643	7,368	
3	04/24/2026 10:36:06.769078 AM	126,954	0,473	-59,639	7,383	
4	04/24/2026 10:36:07.765392 AM	127,193	0,474	-59,632	7,409	
5	04/24/2026 10:36:08.761705 AM	129,824	0,479	-61,935	7,534	
6	04/24/2026 10:36:09.758019 AM	130,096	0,48	-61,94	7,558	
7	04/24/2026 10:36:10.754333 AM	130,094	0,48	-61,938	7,565	
8	04/24/2026 10:36:11.750646 AM	130,102	0,48	-61,941	7,569	
9	04/24/2026 10:36:12.746960 AM	130,133	0,48	-61,954	7,591	
10	04/24/2026 10:36:13.743274 AM	130,131	0,48	-61,953	7,593	
11	04/24/2026 10:36:14.739587 AM	130,122	0,48	-61,943	7,633	
12	04/24/2026 10:36:15.735901 AM	130,121	0,48	-61,943	7,633	
13	04/24/2026 10:36:16.732215 AM	130,121	0,48	-61,943	7,633	
14	04/24/2026 10:36:17.728528 AM	130,112	0,48	-61,934	7,67	
15	04/24/2026 10:36:18.724842 AM	130,11	0,48	-61,933	7,675	
16	04/24/2026 10:36:19.721156 AM	130,106	0,48	-61,929	7,69	
17	04/24/2026 10:36:20.717469 AM	130,099	0,48	-61,922	7,716	
18	04/24/2026 10:36:21.713783 AM	130,099	0,48	-61,922	7,716	
19	04/24/2026 10:36:22.710097 AM	130,099	0,48	-61,922	7,716	
20	04/24/2026 10:36:23.706410 AM	130,099	0,48	-61,922	7,716	
21	04/24/2026 10:36:24.702724 AM	130,099	0,48	-61,922	7,716	
22	04/24/2026 10:36:25.699038 AM	130,099	0,48	-61,922	7,716	
23	04/24/2026 10:36:26.695351 AM	130,099	0,48	-61,922	7,716	
24	04/24/2026 10:36:27.691665 AM	130,368	0,48	-61,932	7,732	
25	04/24/2026 10:36:28.687979 AM	133,058	0,485	-64,295	7,956	
26	04/24/2026 10:36:29.684292 AM	133,346	0,486	-64,308	7,958	
27	04/24/2026 10:36:30.680606 AM	133,331	0,486	-64,302	7,949	
28	04/24/2026 10:36:31.676920 AM	133,307	0,486	-64,292	7,932	
29	04/24/2026 10:36:32.673233 AM	133,307	0,486	-64,292	7,932	
30	04/24/2026 10:36:33.669547 AM	133,307	0,486	-64,292	7,932	
31	04/24/2026 10:36:34.665861 AM	133,307	0,486	-64,292	7,932	
32	04/24/2026 10:36:35.662174 AM	133,307	0,486	-64,292	7,932	

Fig 28 - Arquivo Excel com informações exportadas.

Destaca-se que, conforme ilustrado na Fig. 27, a rotina programada na fonte, embora respeite o intervalo de variação previamente definido de 1,05 pu a 0,90 pu, não segue uma ordenação monotônica simples. A sequência inicia-se em 1 pu, eleva-se até o valor

máximo de 1,05 pu e, a partir desse ponto, decresce progressivamente até 0,90 pu. Em seguida, o processo de elevação e redução é repetido, encerrando-se novamente em 1 pu.

Essa estratégia confere maior robustez às medições, uma vez que possibilita a repetição dos ciclos de variação de tensão. Dessa forma, eventuais inconsistências ou ruídos observados em um determinado ciclo podem ser mitigados ou descartados, permitindo o aproveitamento dos ciclos subsequentes. Ademais, esse procedimento amplia a quantidade de amostras em cada nível de tensão, aspecto fundamental para a análise de grandezas elétricas, que naturalmente apresentam variações e não se mantêm estritamente constantes.

Uma vez concluído esse processo para todos os equipamentos listados na Tabela IV, torna-se necessário realizar um tratamento preliminar dos dados, com o objetivo de reduzir ruídos e organizá-los de maneira mais adequada à interpretação, sem, contudo, alterar suas características originais.

Como etapa inicial do tratamento dos dados, realizou-se a remoção de ruídos presentes nas medições. Tais ruídos decorrem, em grande parte, da elevada precisão do medidor utilizado, o qual fornece valores com até três casas decimais para as variáveis elétricas registradas.

A seguir, apresenta-se um exemplo do impacto desses ruídos na medição da potência ativa de uma geladeira analisada:

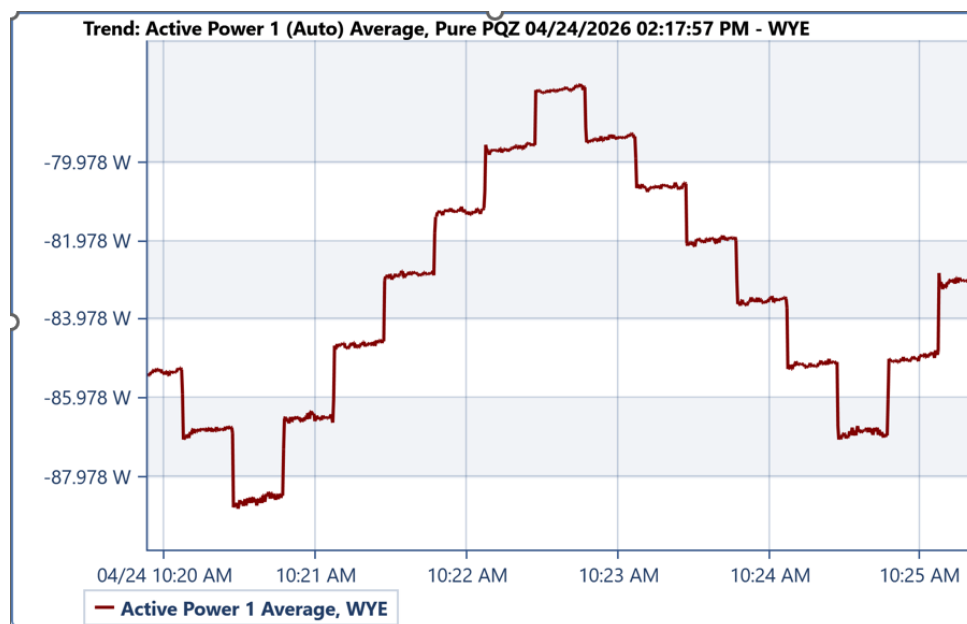


Fig. 29 - Potência ativa do equipamento Geladeira.

Com o objetivo de reduzir a influência de ruídos e proporcionar maior estabilidade às medições, aplicou-se um filtro de mediana aos dados de cada variável. Para isso, considerou-se uma janela móvel composta por cinco amostras.

Nesse procedimento, cada ponto da série é substituído pela mediana dos valores contidos em sua vizinhança. Por exemplo, caso um valor isolado de 128 esteja inserido em uma sequência cujos valores adjacentes se encontram próximos de 126, o filtro tende a suavizar esse ponto, substituindo-o por um valor mais representativo da tendência local. Dessa forma, reduzem-se picos espúrios provocados por ruídos, preservando-se, ao mesmo tempo, a forma geral do sinal.

A seguir, apresenta-se a medição anteriormente ilustrada, agora com a aplicação da metodologia descrita:

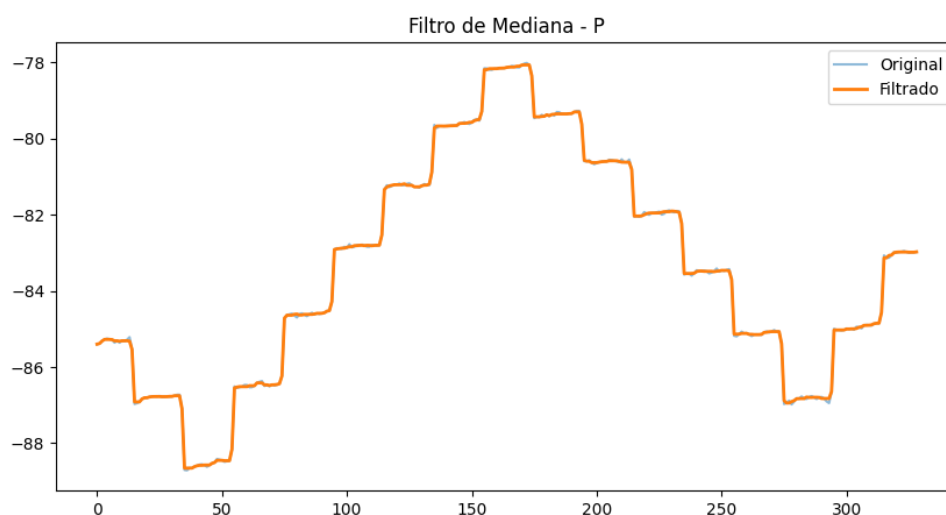


Fig. 30 - Potência ativa com a aplicação da metodologia.

Adicionalmente, em função da elevada precisão do medidor, observa-se que, mesmo com a fonte configurada para operar em níveis fixos de tensão, há pequenas variações em torno dos valores de referência ao longo do intervalo de 20 segundos. Tal comportamento não é ideal para a aplicação da regressão polinomial, a ser realizada posteriormente.

Dessa forma, optou-se por discretizar os valores de tensão, arredondando-os para uma casa decimal. Em seguida, com o objetivo de obter um único valor representativo de potência para cada nível de tensão, calculou-se a mediana dos valores de potência associados a cada faixa. Esse procedimento foi aplicado tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa.

Com isso, concluem-se as etapas de tratamento dos dados necessárias para a aplicação da regressão polinomial anteriormente mencionada, cuja metodologia é detalhada no Apêndice deste trabalho.

A seguir, apresenta-se uma figura que ilustra a variação das grandezas em torno do valor de referência, evidenciando o efeito da alta precisão do medidor:

RMS V1N (Auto), WYE Aver	RMS I1 (Auto), WYE Averag	Active Power 1 (Auto), WYE	Reactive Power 1 (Auto), W
126,921	1,025	-85,401	-97,74
126,921	1,024	-85,383	-97,662
126,921	1,024	-85,319	-97,674
126,921	1,024	-85,276	-97,678
126,921	1,023	-85,254	-97,686
126,921	1,023	-85,27	-97,692
126,921	1,023	-85,282	-97,704
126,988	1,024	-85,36	-97,757
127	1,024	-85,313	-97,76
127	1,024	-85,361	-97,756
127	1,023	-85,311	-97,755
127	1,023	-85,323	-97,766
127	1,023	-85,284	-97,765

Fig. 31 - Variações das variáveis cabíveis a tratamento.

Para a aplicação da regressão polinomial, os valores de tensão e potência foram normalizados em relação aos seus respectivos valores nominais a fim de obter a seguinte estrutura de equação representativa da carga de modelo ZIP, já apresentada, com maiores detalhes, em capítulos anteriores desse documento:

$$\frac{P(t)}{P_0} = Z_p \times \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + I_p \times \left(\frac{V}{V_0}\right) + P_P \quad (99)$$

A partir desse procedimento, foram obtidas, para cada equipamento, as curvas representativas de seus comportamentos elétricos.

Como métricas de avaliação da qualidade do ajuste, adotaram-se o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), os quais são apresentados e detalhados no Apêndice deste trabalho.

Valendo ainda destacar que todo procedimento foi realizado na linguagem Python utilizando bibliotecas comumente utilizadas para análise e manipulação de dados como Pandas, Numpy, Matplotlib e Sklearn com os códigos disponibilizados via *QR-CODE* disponibilizado nos apêndices deste documento.

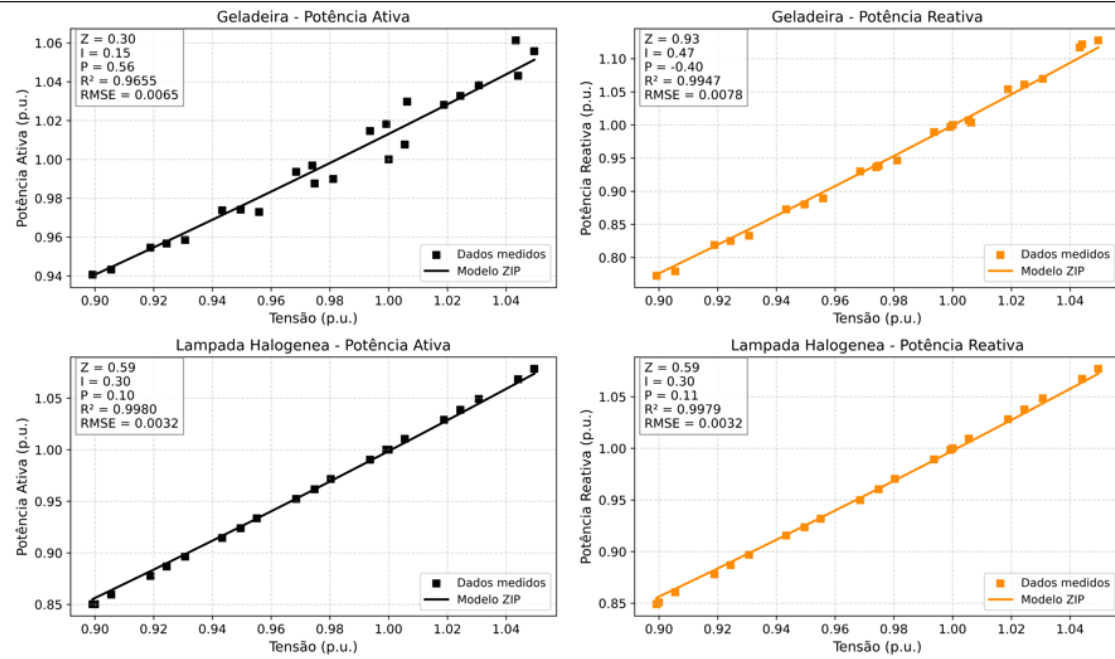


Fig. 32 - Comportamentos obtidos - PT 1.

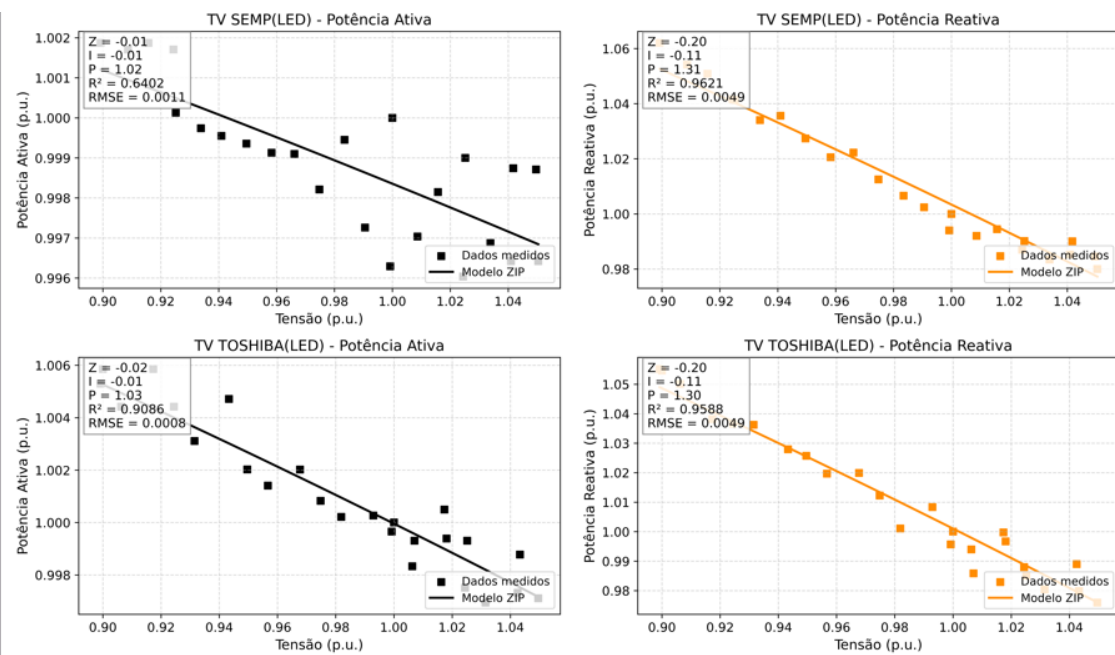


Fig. 33 - Comportamentos obtidos - PT 2.

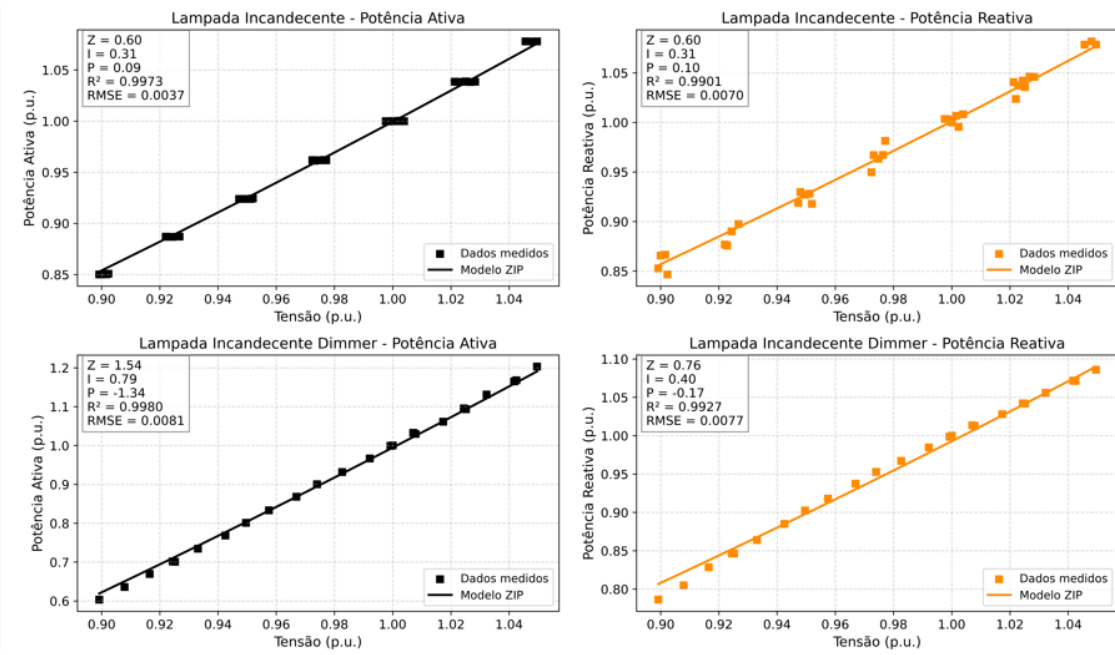


Fig. 34 - Comportamentos obtidos - PT 3.

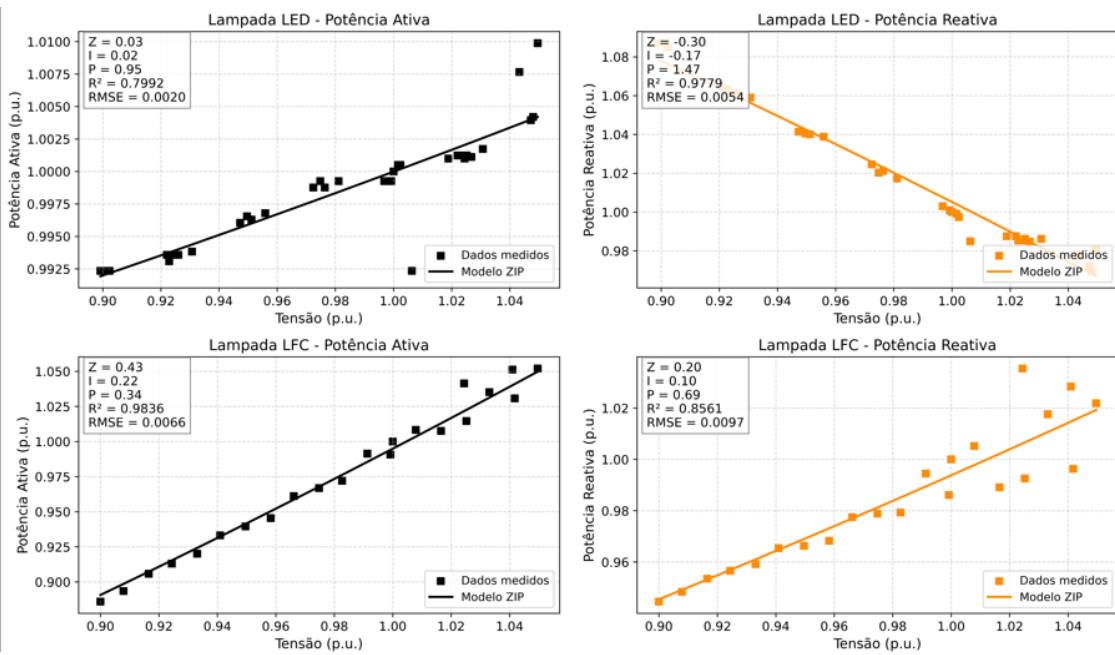


Fig. 35 - Comportamentos obtidos - PT 4.

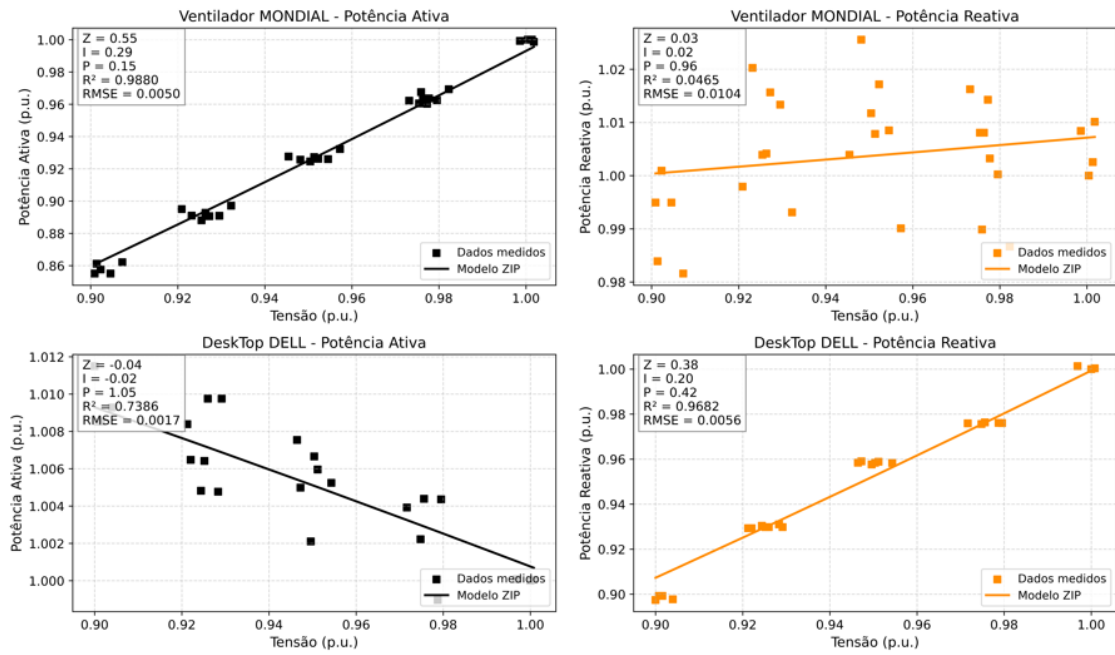


Fig. 36 - Comportamentos obtidos - PT 5.

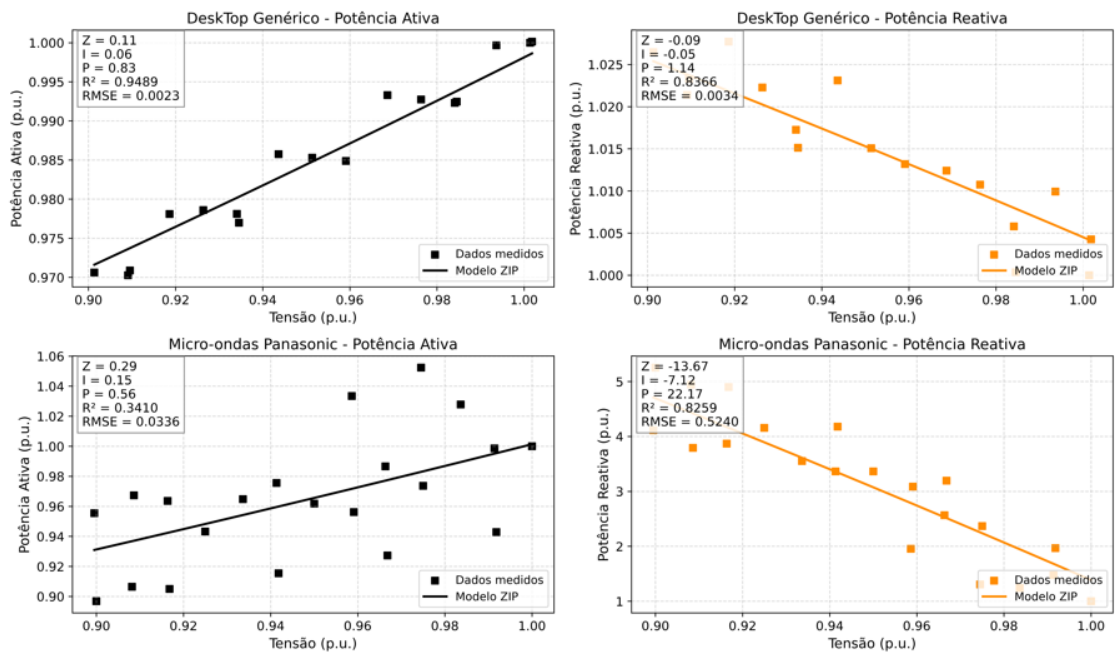


Fig. 37 - Comportamentos obtidos PT - 6.

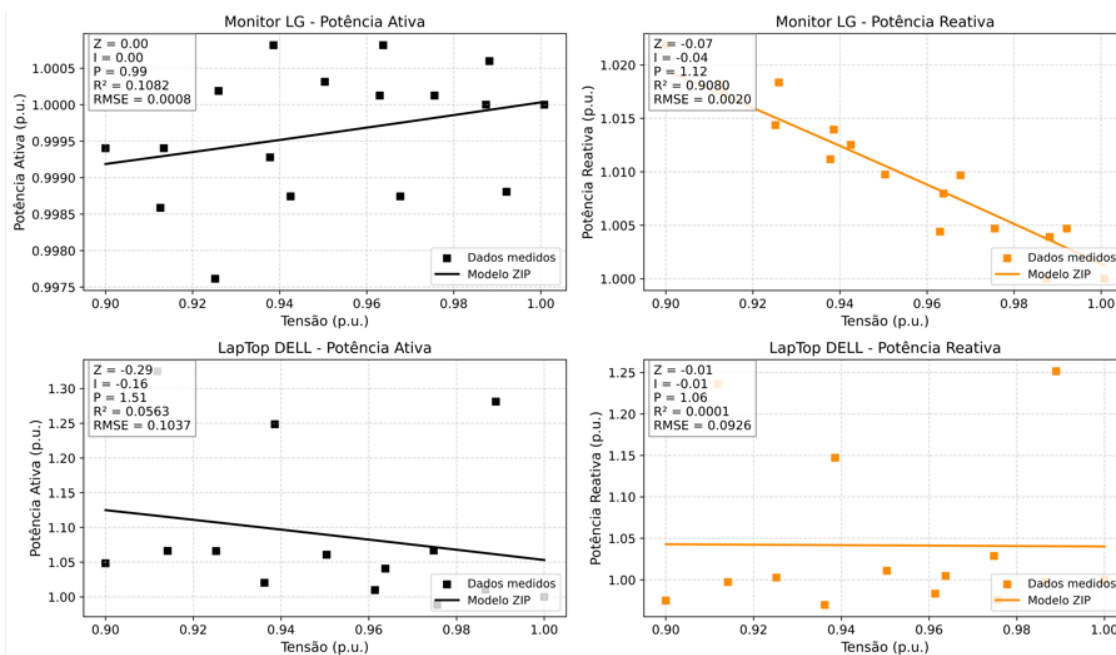


Fig. 38 - Comportamentos obtidos PT - 7.

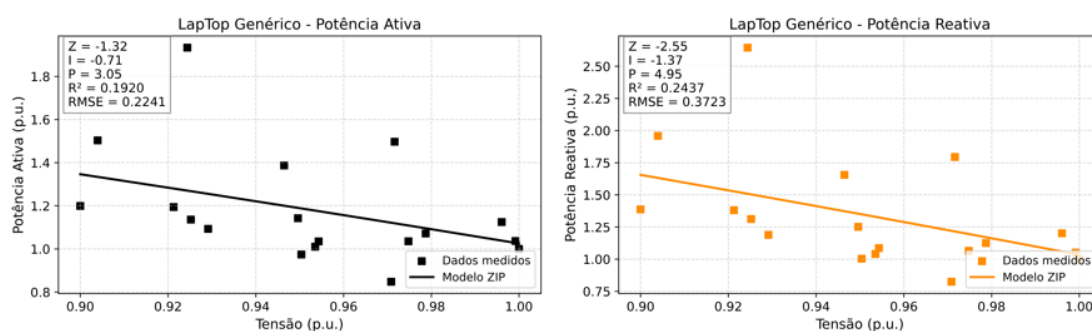


Fig. 39 - Comportamentos obtidos PT - 7.

Tabela VII - Coeficientes ZIPs obtidos

Equipamentos	Zp	Ip	Pp	Zq	Iq	Pq
Lampada Incandescente	0,60	0,31	0,09	0,60	0,31	0,10
Lampada Halogena	0,59	0,30	0,10	0,59	0,30	0,11
Lampada Incandescente(com Dimmer)	1,54	0,79	-1,34	0,76	0,40	-0,17
Lampada Led	0,03	0,02	0,95	-0,30	-0,17	1,47
Lampada Fluorescente	0,43	0,22	0,34	0,20	0,10	0,69
DeskTop DELL	-0,04	-0,02	1,05	0,38	0,20	0,42
DeskTop Genérico	0,11	0,06	0,83	-0,09	-0,05	1,14
Carregador LapTop - DELL	-0,29	-0,16	1,51	-0,01	-0,01	1,06
Carregador LapTop - Genérico	-1,32	-0,71	3,05	-2,55	-1,37	4,95
Geladeira – Não Inverter	0,30	0,15	0,56	0,93	0,47	-0,40
Micro-ondas	0,29	0,15	0,56	-13,67	-7,12	22,17
TV Led(55 pol) - Toshiba	-0,02	-0,01	1,03	-0,20	-0,11	1,30
TV Led(32 pol) - SEMP	-0,01	-0,01	1,02	-0,20	-0,11	1,31
Ventilador	0,55	0,29	0,15	0,03	0,02	0,96
Monitor	0,00	0,00	0,99	-0,07	-0,04	1,12

Tabela VIII: Indicadores qualitativos das regressões realizadas

Equipamentos	R ² (P)	RMSE(P)	R ² (Q)	RMSE(Q)
Lampada Incandescente	0,9973	0,0037	0,9901	0,0070
Lampada Halogena	0,9980	0,0032	0,9979	0,0032
Lampada Incandescente(com Dimmer)	0,9980	0,0081	0,9927	0,0077
Lampada Led	0,7992	0,0020	0,9779	0,0054
Lampada Fluorecente	0,9836	0,0066	0,8561	0,0097
DeskTop DELL	0,7386	0,0017	0,9682	0,0056
DeskTop Genérico	0,9489	0,0023	0,8366	0,0034
Carregador LapTop - DELL	0,0563	0,1037	0,0001	0,0926
Carregador LapTop - Genérico	0,1920	0,2241	0,2437	0,3723
Geladeira – Não inverter	0,9655	0,0065	0,9947	0,0078
Micro-ondas	0,3410	0,0336	0,8259	0,5240
TV Led(55 pol) - Toshiba	0,9086	0,0008	0,9588	0,0049
TV Led(32 pol) - SEMP	0,6402	0,0011	0,9621	0,0049
Ventilador	0,9880	0,0050	0,0465	0,0104
Monitor	0,1082	0,0008	0,9080	0,0020

A partir da Tabela VIII, observa-se que o coeficiente de determinação (R^2) apresenta, na maioria dos casos, valores próximos de 1, o que caracteriza um ajuste adequado do modelo aos dados experimentais. De forma complementar, os valores de RMSE mantêm-se próximos de zero, indicando baixo erro médio entre os valores estimados pelo modelo e aqueles obtidos experimentalmente.

Adicionalmente, destaca-se que, em alguns equipamentos, como o monitor, observa-se um valor reduzido de R^2 . Tal comportamento pode ser atribuído ao predomínio de características associadas à potência constante, o que resulta em uma resposta experimental pouco variável e, conseqüentemente, impacta negativamente o valor dessa métrica. Ainda assim, os baixos valores de RMSE evidenciam que o modelo estimado permanece representativo dos dados experimentais.

Para uma análise mais detalhada dessas métricas, recomenda-se, novamente, a consulta ao Apêndice deste documento.

Adicionalmente, identificou-se a necessidade de realizar medições em equipamentos não disponíveis no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADÉE), mas amplamente presentes nas residências contemporâneas, tais como chuveiros eletrônicos, máquinas de lavar, geladeiras com tecnologia inverter e aparelho ar-condicionado, cuja

utilização tem se tornado cada vez mais predominante e tende a se consolidar no cenário futuro.

Dessa forma, tais medições foram conduzidas em uma residência real, onde esses equipamentos se encontravam em operação. Para a variação da tensão, em virtude da indisponibilidade da fonte previamente utilizada, especialmente devido às limitações de potência frente a equipamentos como o chuveiro, adotou-se uma abordagem alternativa. Nesse caso, a tensão foi indiretamente modulada por meio do ajuste da temperatura de um dos chuveiros ali presente, o qual, ao alterar sua potência de operação, provocava variações na tensão ao longo da instalação elétrica da residência.

Dessa forma, o medidor anteriormente descrito foi instalado nos circuitos correspondentes a cada equipamento, diretamente no quadro de distribuição da residência. A partir dessa configuração, promoveu-se a variação da tensão e foram coletados os valores de corrente, bem como as potências ativa e reativa, correspondentes a cada condição de operação imposta.

Abaixo a representação da estrutura de medição acoplada ao quadro de energia da residência a fim de colher os valores das grandezas elétricas ali submetidas.

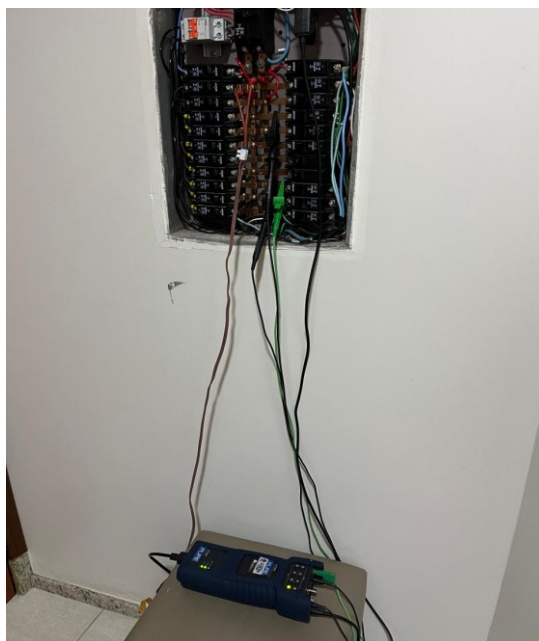


Fig. 40 - Estrutura de medição adaptada ao quadro residencial.

Os tratamentos realizados a estes equipamentos se equiparam aos realizados para os anteriores equipamentos, não trazendo nenhuma modificação ou complemento.

Como caso particular, o chuveiro eletrônico teve sua tensão variada em três diferentes temperaturas de operação. Tal procedimento teve como objetivo não apenas comprovar que, mesmo sob distintos ajustes de temperatura, o comportamento da carga tende a se manter, de forma geral, semelhante, mas também identificar a condição em que os dados apresentaram melhor ajuste e maior aderência ao modelo de regressão aplicado.

Dessa forma, a seguir é apresentado o comportamento obtido para cada condição analisada. Conforme esperado, observa-se elevada similaridade entre os resultados, evidenciando um comportamento uniforme independentemente da temperatura selecionada. Além disso, nota-se que as três condições apresentaram perfis bastante estáveis e com baixa presença de ruídos experimentais.

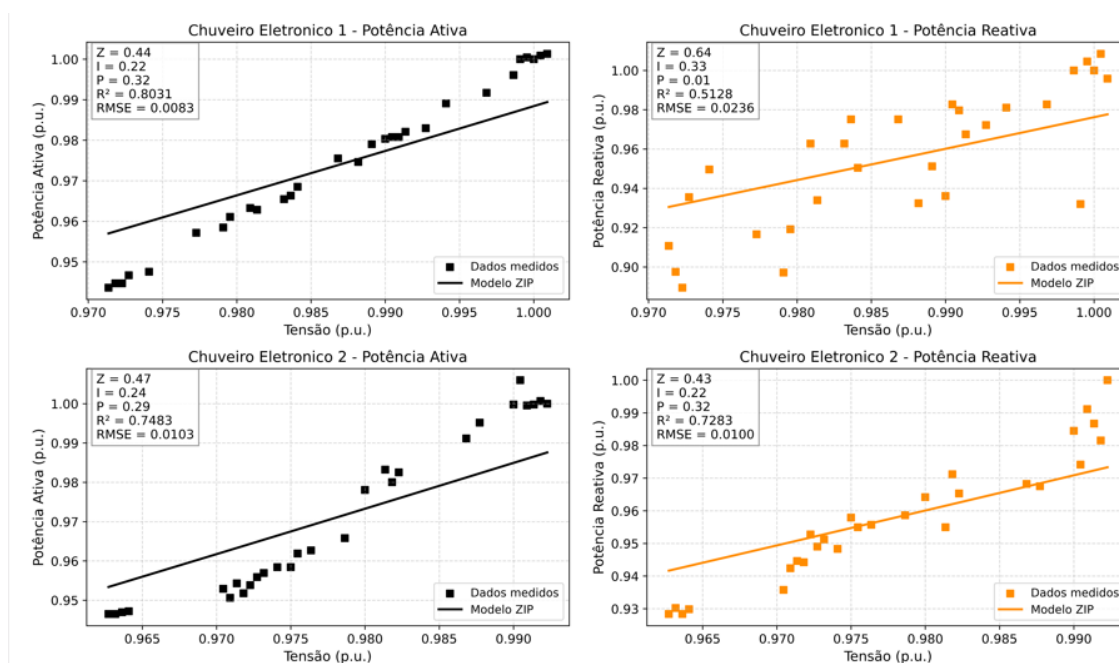


Fig. 41 - Comportamento e coeficientes ZIP, chuveiro eletrônico, PT - 1.

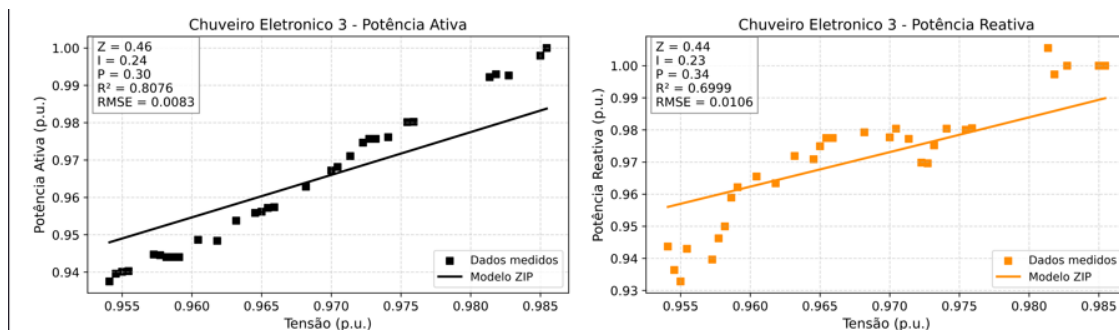


Fig. 42 - Comportamento e coeficientes ZIP, chuveiro eletrônico, PT - 2.

Além disso, para as três medições realizadas, a utilização de um chuveiro secundário para promover a variação da tensão da rede ocorreu de maneira altamente controlada,

forneendo resultados bastante semelhantes aos obtidos por meio da fonte controlada. Embora a faixa de variação estivesse limitada a valores iguais ou inferiores à tensão nominal, com menor precisão operacional e sem garantir intervalos exatamente iguais a 20 segundos, característica anteriormente assegurada pela fonte controlada com elevada precisão, os resultados experimentais mantiveram comportamento consistente e satisfatório.

Assim, ressalta-se que as medições realizadas sob essa metodologia específica não seguiram rigorosamente os intervalos e variações previamente estabelecidos, conforme pode ser observado na figura abaixo, referente à variação de tensão em uma das condições analisadas para o chuveiro eletrônico. Ainda assim, tal característica não comprometeu a qualidade das medições nem a obtenção dos modelos ZIP dos equipamentos, fato evidenciado pelos elevados índices qualitativos obtidos, especialmente em termos de coeficiente de determinação (R^2) e erro quadrático médio (RMSE).

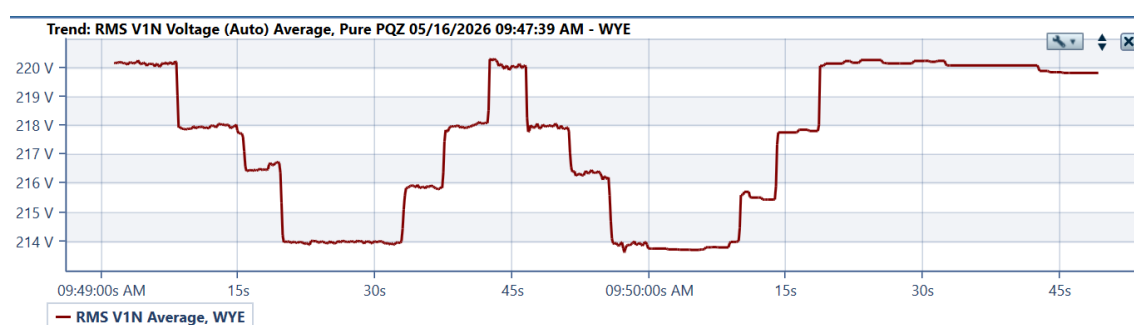


Fig. 43 - Exemplo de variação de tensão aplicada ao chuveiro.

Adicionalmente, para a representação do chuveiro eletrônico no modelo equivalente global, será posteriormente realizada uma média entre os comportamentos obtidos, uma vez que as três condições analisadas apresentaram resultados equilibrados, consistentes e bastante semelhantes entre si.

Outro caso particular que merece destaque refere-se à máquina de lavar com tecnologia inverter. Diferentemente da maioria das cargas analisadas, esse equipamento apresenta como principal desafio a elevada variabilidade operacional ao longo de um ciclo completo de lavagem, caracterizado por diferentes modos de funcionamento e comportamentos elétricos significativamente distintos entre si.

As medições realizadas para esse equipamento ocorreram ao longo de um ciclo completo de lavagem, totalizando aproximadamente uma hora e meia contínua de aquisição de

dados. Durante esse período, foram observados diferentes modos de operação e, consequentemente, distintos perfis de carga associados às etapas do processo de lavagem.

Considerando a inviabilidade de aplicar variações contínuas de tensão de forma manual durante todo o intervalo de medição, optou-se pela realização de variações em instantes específicos do ciclo operacional. Dessa forma, cada conjunto de variações foi associado a determinadas etapas programadas do processo de lavagem do equipamento. Ao todo, foram aplicados quatro ciclos de variação de tensão, conforme destacado na figura abaixo.

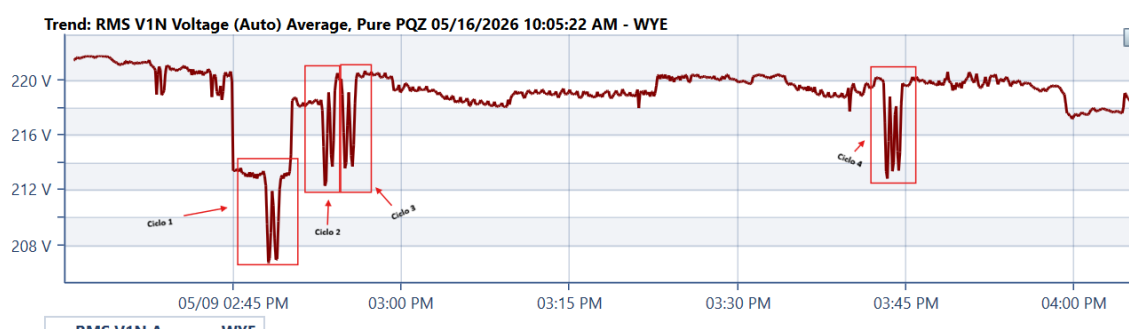


Fig. 44 - Ciclos de variação de tensão aplicados a máquina de lavar.

Ao ampliar a visualização de um desses ciclos, observa-se que todos apresentam comportamento semelhante ao ilustrado abaixo, diferindo principalmente na magnitude das variações observadas. Tal característica demonstra a compatibilidade dos resultados com o objetivo deste capítulo e deste trabalho, que consiste na obtenção do modelo ZIP e na caracterização do comportamento elétrico das cargas analisadas.

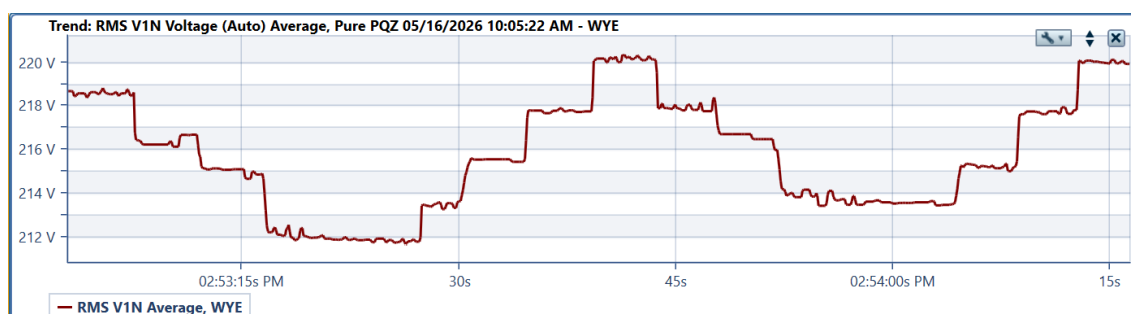


Fig. 45 - Modelo de variação implementado em cada ciclo.

Dessa forma, ao analisar individualmente o comportamento de cada ciclo, tornam-se evidentes as diferenças entre os perfis operacionais, bem como a presença de distintos níveis de ruído associados às características específicas de funcionamento de cada etapa. A seguir, são apresentados os comportamentos obtidos para cada ciclo, destacando-se também os coeficientes correspondentes de cada modelo ajustado.

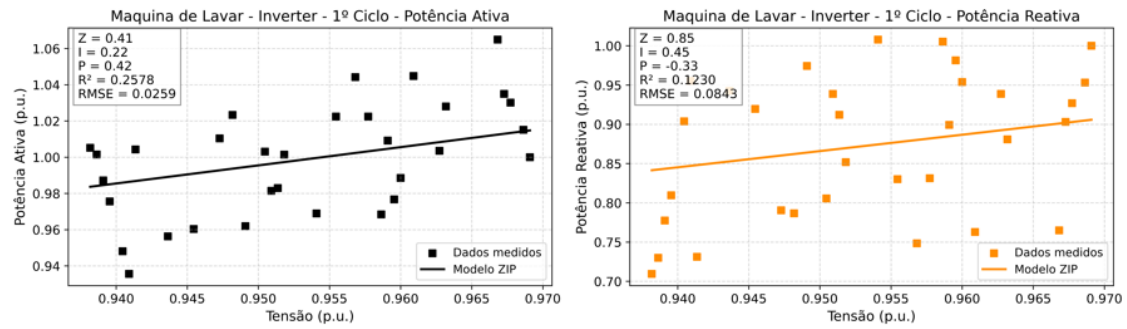


Fig. 46 - Modelo comportamental, ciclo 1.

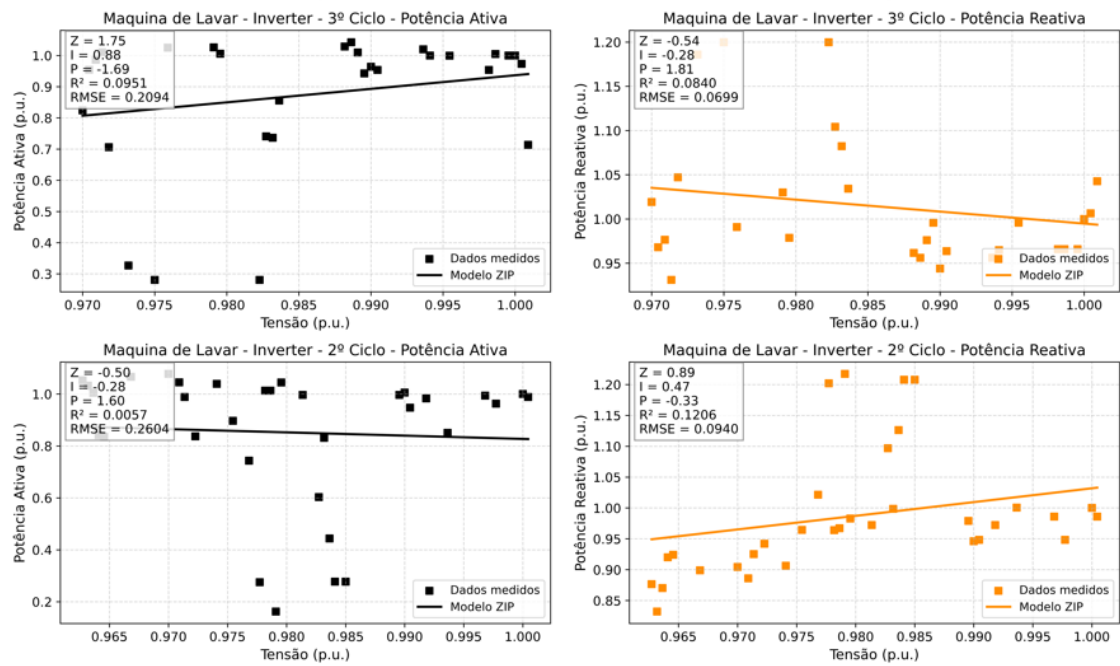


Fig. 47 - Modelo comportamental, ciclo 2 e 3.

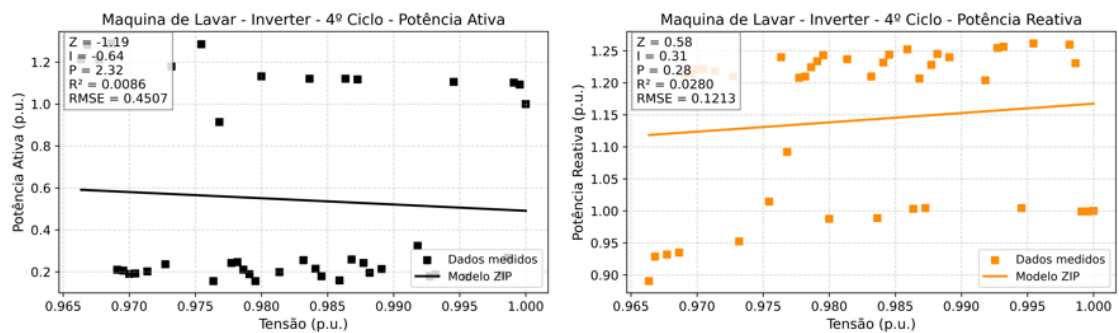


Fig. 48 - Modelo comportamental, ciclo 4.

Tabela IX - Coeficientes ZIP, Máquina de lavar

Equipamentos	Zp	Ip	Pp	Zq	Iq	Pq
Máquina de lavar – Ciclo 1	0,41	0,22	0,42	0,85	0,45	-0,33
Máquina de lavar – Ciclo 2	-0,50	-0,28	1,60	0,89	0,47	-0,33
Máquina de lavar – Ciclo 3	1,75	0,88	-1,69	-0,54	-0,28	1,81
Máquina de lavar – Ciclo 4	-1,19	-0,64	2,32	0,58	0,31	0,28

Tabela X - Índices Qualitativos, Máquina de lavar

Equipamentos	R(P)	RMSE(P)	R(Q)	RMSE(Q)
Máquina de lavar – Ciclo 1	0,2578	0,0259	0,1230	0,0843
Máquina de lavar – Ciclo 2	0,0057	0,2604	0,1206	0,0940
Máquina de lavar – Ciclo 3	0,0951	0,2094	0,0840	0,0699
Máquina de lavar – Ciclo 4	0,0086	0,4507	0,0280	0,1213

Vale ainda destacar que o ciclo inicial da lavagem corresponde à etapa de aquecimento da água utilizada pelo equipamento. Nesse intervalo, observa-se uma característica predominantemente resistiva, associada ao fornecimento de energia térmica necessária para esse processo. Tal comportamento é evidenciado pela resposta da carga apresentada na Fig. 46, na qual o modelo ZIP obtido indica maior predominância da componente de impedância constante, característica tipicamente observada em equipamentos destinados ao aquecimento, como chuveiros resistivos.

Apesar do comportamento consistente apresentado nesse ciclo, ele não pode ser considerado representativo do funcionamento global do equipamento, uma vez que sua duração é limitada e relativamente pouco significativa quando comparada ao tempo total do processo de lavagem.

O ciclo 4 também deve ser descartado como candidato à representação do equipamento, em virtude da elevada oscilação comportamental observada durante seu regime momentâneo de operação. Nesse caso, a alta variabilidade e incerteza associadas ao comportamento da carga impossibilitaram a obtenção de coeficientes do modelo ZIP compatíveis com a resposta experimental adquirida, tornando esse ciclo inadequado para o processo de modelagem.

Dessa forma, a definição do modelo ZIP equivalente do equipamento, posteriormente utilizado na obtenção do modelo equivalente global do sistema, concentrou-se entre os ciclos 2 e 3, os quais foram medidos em sequência e apresentaram comportamentos mais

estáveis. Considerando a análise das curvas obtidas e a tendência associada ao nível de ruído presente nos dados experimentais, optou-se pela utilização da curva correspondente ao ciclo 2 como modelo representativo do equipamento neste estudo. Ainda assim, é importante ressaltar a incerteza inerente ao modelo equivalente estabelecido, decorrente da elevada dinamicidade operacional característica dessa carga.

Por fim, para os equipamentos ar-condicionado e geladeira, não foram observadas particularidades relevantes ou ressalvas significativas durante o processo de medição. Ambos os aparelhos foram monitorados a partir do quadro de distribuição, conforme ilustrado na Fig. 40, tendo suas tensões variadas por meio da alteração da potência consumida por um chuveiro eletrônico em operação, realizado através da alternância entre seus diferentes regimes de temperatura.

Dessa forma, a seguir são apresentadas as curvas comportamentais obtidas para cada equipamento, bem como seus respectivos índices de composição do modelo ZIP e os indicadores qualitativos associados ao processo de regressão.

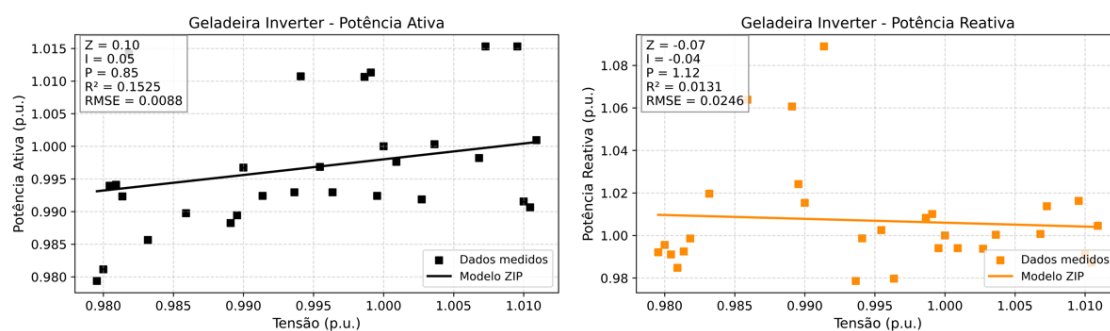


Fig. 49 - Modelo comportamental - Geladeira inverter.

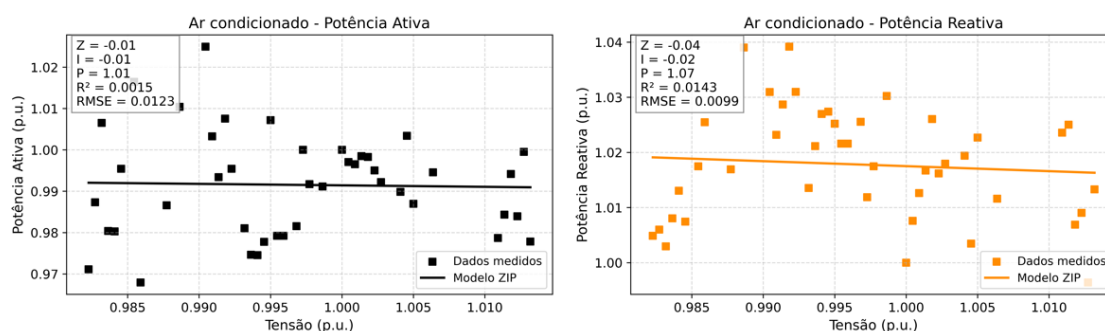


Fig. 50 - Modelo comportamental – Ar-condicionado.

Tabela XI - Modelo ZIP, Geladeira Inverter e Ar-Condicionado

Equipamentos	Zp	Ip	Pp	Zq	Iq	Pq
Geladeira Inverter	0,10	0,05	0,85	0,07	0,04	1,12
Ar-Condicionado	-0,01	-0,01	1,01	-0,04	-0,02	1,07

Tabela XII - Índices Qualitativos, Geladeira Inverter e Ar-Condicionado

Equipamentos	R(P)	RMSE(P)	R(Q)	RMSE(Q)
Geladeira Inverter	0,1525	0,0088	0,0131	0,0246
Ar-Condicionado	0,0015	0,0123	0,0143	0,0099

5.4 Modelo ZIP equivalente residencial:

Nos dias atuais, como já ressaltado, dificilmente cargas reais apresentam comportamento puramente associado a apenas um dos modelos básicos (impedância constante, corrente constante ou potência constante). Dessa forma, o modelo ZIP se mostra uma alternativa mais adequada, por permitir a combinação desses diferentes efeitos, proporcionando uma representação mais consistente do comportamento das cargas frente à variação de tensão.

Entretanto, é importante destacar que os coeficientes obtidos por meio desse modelo não devem ser interpretados, na grande maioria das vezes, de forma diretamente física. Em outras palavras, tais coeficientes não representam, necessariamente, a participação percentual de cada tipo de comportamento na carga analisada. Esses parâmetros são, quando retirados experimentalmente através de metodologias de medição, resultantes de um processo de ajuste matemático, geralmente realizado por meio de regressão polinomial, cujo objetivo é estimar os coeficientes que minimizam o erro segundo o critério dos mínimos quadrados, de modo a obter a curva que melhor se ajusta aos dados medidos respeitando a equação (97) e a equação (98)

Assim, a interpretação dos coeficientes do modelo ZIP deve ser realizada com cautela, sendo mais adequada sua análise, quando inserido números extremos aos seus coeficientes, sob a ótica da forma da curva ajustada (curvatura, inclinação e nível), do que como uma decomposição física direta do comportamento da carga.

Além disso, a ocorrência de coeficientes negativos ou superiores à unidade reforça o caráter matemático do ajuste, sendo consequência do processo de regressão empregado para melhor aderência aos dados experimentais e então reflexão comportamental do equipamento nas devidas variações de tensão estimadas. Esses valores não representam, necessariamente, inconsistências do modelo, mas indicam que sua interpretação deve ser realizada com cautela, restringindo-se à análise da forma da curva ajustada no intervalo de operação considerado, e não como uma decomposição física direta do comportamento da carga

Dessa forma, o objetivo deste subcapítulo consiste na obtenção de coeficientes capazes de representar o comportamento agregado dos modelos individuais previamente obtidos para as cargas residenciais mais utilizadas e predominantes no contexto atual das residências brasileiras.

Assim, embora a Tabela V apresente diferentes tipologias de lâmpadas, apenas a tecnologia LED será considerada na composição do modelo equivalente, por representar a tipologia mais amplamente utilizada atualmente e com maior potencial de permanência e expansão futura. As demais tecnologias serão utilizadas apenas como forma de validação e comprovação da metodologia aplicada, além de servirem como base para futuros trabalhos, estudos complementares e análises de variantes comportamentais.

Adicionalmente, serão incorporados ao modelo os comportamentos obtidos para os seguintes equipamentos: geladeira inverter, micro-ondas, monitor, ventilador, ar-condicionado e máquina de lavar, considerando-se, neste último caso, o segundo ciclo de operação. Para os equipamentos em que foram obtidos múltiplos modelos experimentais como televisão, laptop, desktop e chuveiro eletrônico, será realizada uma média simples entre os coeficientes de cada componente dos modelos obtidos, visando à construção de um modelo representativo único para cada equipamento. Tal abordagem busca estabelecer um comportamento médio capaz de contemplar as diferentes marcas e condições operacionais analisadas.

A seguir, apresenta-se uma tabela contendo os componentes associados aos comportamentos ativo e reativo dos equipamentos utilizados na obtenção do modelo equivalente representativo.

Tabela XIII - Modelos ZIP dos equipamentos utilizados para o modelo final

Equipamento	Energia	Zp	Ip	Pp	Zq	Iq	Pq
Lampada LED	236938	0,03	0,02	0,95	-0,3	-0,17	1,47
Chuveiro	422500	0,45666667	0,23333333	0,30333333	0,483333	0,25	0,2433333
Ar-condicionado	1719900	-0,01	-0,01	1,01	-0,04	-0,02	1,07
Máquina de lavar	18475,5	-0,5	-0,28	1,6	0,89	0,47	-0,33
Laptop	23415,6	-0,805	-0,435	2,28	-1,28	-0,69	3,005
Desktop	54036	0,035	0,02	0,94	0,145	0,075	0,78
Geladeira	1632000	0,1	0,05	0,85	-0,07	-0,04	1,12
Micro-ondas	53580	0,29	0,15	0,56	-13,67	-7,12	22,17
TV	69104,2	-0,015	-0,01	1,025	-0,2	-0,11	1,305
Monitor	23415,6	0	0	0,99	-0,07	-0,04	1,12
Ventilador	421008	0,55	0,29	0,15	0,03	0,02	0,96

Além disso, é importante destacar que o comportamento elétrico dos equipamentos medidos pode variar de acordo com a marca, modelo e características construtivas adotadas por cada fabricante. Dessa forma, os equipamentos analisados neste trabalho

não representam integralmente todas as possibilidades existentes dentro de suas respectivas classes. Ainda assim, os resultados obtidos fornecem uma representação coerente e compatível com os comportamentos tipicamente encontrados no mercado, especialmente considerando a inviabilidade prática de se realizar medições abrangendo todos os fabricantes e modelos disponíveis, dado o escopo deste estudo.

Com os comportamentos individuais definidos na Tabela XII, a participação de cada equipamento na composição da curva equivalente agregada foi estabelecida com base em seu consumo energético médio anual. Assim, equipamentos com maior representatividade no consumo de energia tendem a exercer influência mais significativa na definição da curva comportamental equivalente da classe residencial analisada.

Dessa forma, para a determinação do consumo energético médio anual de cada equipamento, foi utilizado como principal referência o Relatório de Análise de Resultados da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos, elaborado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) no ano de 2019, última edição disponibilizada até o momento. A partir de uma amostragem representativa dos consumidores brasileiros, o estudo apresenta estimativas de diversas métricas relacionadas aos equipamentos presentes nas residências do país, não apenas para o ano de publicação, mas também com projeções para períodos posteriores. Entre as informações disponibilizadas destacam-se potência média dos equipamentos, tempo médio diário de utilização, quantidade média de dias de uso, número médio de equipamentos por residência em diferentes regiões do Brasil, entre outros dados complementares que extrapolam o escopo deste trabalho.

Além disso, também foi utilizada uma pesquisa de posse e hábitos de uso realizada no contexto de uma campanha de medições conduzida por uma concessionária de energia elétrica brasileira. Nessa pesquisa, foram coletadas informações de uma amostragem representativa de consumidores residenciais, contemplando dados relacionados à quantidade de equipamentos específicos presentes em cada residência, bem como ao tempo médio diário de utilização de cada aparelho.

Adicionalmente, como complemento ao estudo e às análises realizadas, utilizou-se também como referência uma base de pesquisa direcionada pela concessionária CEMIG o qual apresenta valores médios de potência para diferentes equipamentos residenciais.

Dessa forma, a partir da consolidação das informações provenientes dos documentos e bases de dados anteriormente mencionados, foram obtidos os valores médios de potência, quantidade média de dias de utilização por ano, tempo médio diário de uso e quantidade média de equipamentos presentes em uma residência brasileira típica, conforme apresentado a seguir.

Tabela XIV - Informações acerca do consumo anual dos equipamentos utilizados

Equipamentos	Potência Média(W)	Horas/dia	Dias/Ano	Qtd Média	Energia Anual(Wh)
Lâmpada Led	10	7,01	338	10	236938
Ar-Condicionado	1300	4,5	294	1	1719900
Desktop	150	2,28	158	1	54036
Máquina de lavar	150	1.13	109	1	18475,5
Carregador Laptop	65	2,28	158	1	23416,6
Geladeira – Inverter	200	24	340	1	1632000
Micro-ondas	1500	0,19	188	1	53580
TV Led	110	2,02	311	1	69104,2
Ventilador	200	7,16	294	1	421008
Monitor	65	2,28	158	1	23415,6
Chuveiro Eletrônico	5000	0,25	338	1	422500

Vale destacar que a utilização do consumo energético médio anual como fator de ponderação foi adotada com o objetivo de proporcionar ao modelo uma composição comportamental mais representativa da realidade residencial. Tal abordagem busca construir uma curva equivalente a partir da participação dos equipamentos que efetivamente compõem, em diferentes momentos, o perfil de consumo típico de uma residência, permitindo assim a obtenção de um modelo com coeficientes e comportamento global mais coerentes e fisicamente representativos.

Além disso, e de forma ainda mais relevante para os objetivos deste trabalho, essa metodologia permite atribuir maior influência aos equipamentos responsáveis pelas maiores parcelas do consumo energético residencial. Consequentemente, tais cargas tendem também a apresentar maior participação nas perdas elétricas do sistema, aspecto diretamente relacionado a uma das principais motivações para o desenvolvimento e aplicação do modelo proposto. Dessa forma, a ponderação baseada no consumo anual contribui para enfatizar, na composição da curva equivalente, os equipamentos com maior impacto energético e operacional dentro do contexto analisado.

Dessa forma, por meio da realização das médias ponderadas de cada componente presente no modelo ZIP, foi possível obter os coeficientes apresentados a seguir, os quais representam de maneira mais adequada o comportamento esperado das atuais e futuras cargas residenciais.

Tabela XV - Modelo equivalente ZIP obtido

Zp	Ip	Pp	Zq	Iq	Pq
0,121066677	0,060517886	0,81261379	-0,169193	-0,08971	1,269496058

Adicionalmente, é importante destacar que o modelo proposto foi fundamentado na utilização de equipamentos que incorporam tecnologias mais recentes e avançadas, caracterizadas principalmente pela ampla aplicação de recursos associados à eletrônica de potência. Entre essas tecnologias, destacam-se os inversores eletrônicos, atualmente presentes na maior parte dos novos equipamentos lançados no mercado, devido à diversidade de benefícios proporcionados, especialmente no que se refere à eficiência energética, fator cada vez mais valorizado pelos consumidores diante da crescente busca pela redução dos custos associados ao consumo de energia elétrica.

Entretanto, embora essas tecnologias já apresentem significativa difusão no mercado, muitos desses equipamentos ainda não estão amplamente presentes na maioria das residências brasileiras, principalmente em razão de seus elevados custos de aquisição. Assim, o modelo desenvolvido neste trabalho considera um cenário de tendência futura, no qual a consolidação e popularização dessas tecnologias resultarão na redução gradual de seus custos, promovendo uma difusão mais ampla e tornando o perfil de consumo residencial cada vez mais compatível com o comportamento equivalente aqui estimado.

Devido à elevada quantidade e diversidade de equipamentos medidos, torna-se possível obter diferentes variantes de composição do modelo equivalente, evidenciando o impacto significativo que as cargas presentes no sistema exercem sobre os coeficientes estimados.

Com o objetivo de exemplificar essa sensibilidade e, simultaneamente, representar um cenário associado à utilização de equipamentos tecnologicamente mais antigos, ainda amplamente presentes em residências de menor poder aquisitivo, foi elaborada uma nova composição do modelo equivalente. Para isso, substituiu-se a geladeira inverter por um modelo convencional sem essa tecnologia, retiraram-se equipamentos de maior porte e maior custo de aquisição, como ar-condicionado e máquina de lavar, e substituiu-se a

iluminação LED por lâmpadas fluorescentes, considerando os modelos apresentados na Tabela VI.

Tal configuração busca representar um perfil residencial mais associado a consumidores de menor nível socioeconômico, cujas residências tendem a possuir menor inserção de tecnologias modernas voltadas à eficiência energética. Nessa condição, os novos coeficientes obtidos foram os seguintes:

Tabela XVI - Modelo equivalente variante

Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
0,416197943	0,149313679	0,43651421	0,2751169	0,135226	0,453556911

Observa-se ainda que este último modelo apresenta significativa similaridade com o modelo de potência ativa atualmente adotado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), amplamente mencionado ao longo deste trabalho, caracterizado por uma composição equivalente de 50% de impedância constante e 50% de potência constante.

Além disso, devido à ampla diversidade de equipamentos medidos e à obtenção de seus respectivos modelos ZIP representativos, existe uma grande quantidade de combinações possíveis para a formulação de modelos equivalentes distintos. Entretanto, considerando que o objetivo deste estudo consiste em propor um modelo mais representativo e aplicável não apenas ao cenário atual, mas também às tendências futuras de consumo residencial, optou-se pela adoção do primeiro modelo apresentado, por este se mostrar mais coerente e compatível com a evolução tecnológica esperada para as cargas residenciais.

5.5 Resultados:

Com os modelos obtidos, este último subcapítulo tem como objetivo apresentar uma análise comparativa dos indicadores de perdas elétricas, utilizando como referência o modelo atualmente adotado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em comparação aos modelos propostos neste trabalho, fundamentados na composição comportamental equivalente dos diversos equipamentos analisados.

A tabela XVII a seguir apresenta, inicialmente, os valores obtidos para o sistema utilizando o modelo atualmente adotado pela ANEEL, previamente descrito na Seção 5.2. Esses resultados foram considerados como referência para todas as métricas comparativas realizadas ao longo desta análise. Em seguida, utilizando os mesmos valores de referência para dias úteis, sábados e domingos apresentados na Tabela IV, são apresentados os valores de perdas totais, tempo de simulação e divergência percentual em relação ao modelo oficial para os demais modelos propostos neste documento.

Os resultados apresentados foram obtidos por meio de simulações realizadas utilizando a integração entre o OpenDSS e a linguagem Python.

Tabela XVII - Comparação de resultados

Modelo	Tempo de simulação (s)	Perdas(kWh)	Diferença(%)
ANEEL	0,4625	44,174	0%
Proposta Principal (Tabela XIV)	0,6337	46,570	5%
Proposta Teste (Tabela XV)	0,4793	42,749	-3%

Pode-se observar que o principal modelo proposto, devido à elevada predominância de equipamentos caracterizados pelo comportamento de potência constante, consequência direta da ampla utilização de inversores eletrônicos nos equipamentos modernos, tende naturalmente a apresentar maiores níveis de perdas elétricas. Isso ocorre porque, diante das frequentes variações e reduções de tensão presentes no cotidiano das redes de distribuição, especialmente em consumidores localizados em regiões mais afastadas de seus transformadores de distribuição, cargas de potência constante demandam aumento de corrente para manutenção de sua potência consumida, intensificando assim as perdas elétricas do sistema.

Tal comportamento foi confirmado por meio das simulações realizadas, as quais indicaram um aumento aproximado de 5% nas perdas totais em relação ao modelo atualmente adotado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Por outro lado, ao analisar o modelo alternativo proposto composto por equipamentos tecnologicamente menos avançados e ainda amplamente utilizados por parcelas da população de menor poder aquisitivo, observou-se uma redução aproximada de 3% nas perdas elétricas em relação ao modelo oficial vigente.

Os resultados obtidos para o principal modelo proposto [Tabela XIV] tornam-se ainda mais relevantes quando se considera a aplicação dessa divergência de aproximadamente 5% no cálculo das perdas elétricas de grandes alimentadores, conforme realizado oficialmente pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelas concessionárias de distribuição. Diferentemente do cenário analisado neste trabalho caracterizado por um circuito secundário reduzido, com consumidores relativamente próximos ao transformador de distribuição, sistemas de maior porte tendem a amplificar os impactos associados a esse incremento percentual.

Tal comportamento decorre não apenas da maior quantidade de consumidores inseridos no sistema, cada qual submetido a diferentes condições de tensão ao longo do alimentador, mas também do elevado montante energético envolvido nessas análises. Dessa forma, mesmo mantendo-se um incremento percentual semelhante ao observado neste estudo, sua aplicação sobre valores elevados de energia resulta em impactos significativamente mais expressivos.

Assim, os resultados obtidos evidenciam um importante ponto de atenção em relação ao modelo atualmente utilizado, indicando que os valores reais de perdas elétricas do sistema podem já estar sendo parcialmente subestimados pela metodologia atualmente adotada. Ainda que o cenário atual brasileiro apresente coexistência entre equipamentos tradicionais e tecnologias mais modernas, observa-se uma tendência cada vez mais consolidada de inserção de cargas baseadas em eletrônica de potência, especialmente aquelas caracterizadas pelo comportamento de potência constante.

Nesse contexto, espera-se que, em um futuro próximo, a predominância dessas novas tecnologias no setor residencial brasileiro se torne amplamente disseminada e praticamente inevitável, impulsionada principalmente pela busca por maior eficiência energética e pela gradual redução dos custos de aquisição desses equipamentos. Dessa

forma, caso os modelos atualmente empregados permaneçam inalterados frente a essa transformação tecnológica, existe uma forte tendência de que os níveis reais de perdas elétricas passem a ser progressivamente subestimados em relação aos seus valores efetivos de operação como demonstra o modelo anteriormente proposto.

6. CONCLUSÃO:

As cargas que compõem o sistema elétrico brasileiro possuem em comum a presença das grandezas elétricas tradicionalmente analisadas em estudos de sistemas de potência, tais como potência ativa, potência reativa, corrente elétrica, nível de tensão e perdas elétricas. Entretanto, um aspecto fundamental a ser considerado refere-se à forma como essas grandezas se relacionam entre si, uma vez que tal comportamento depende diretamente das características construtivas, da tecnologia empregada e do regime de operação de cada equipamento.

Nesse contexto, as cargas presentes nos sistemas elétricos podem apresentar, de forma isolada ou combinada, três comportamentos elétricos fundamentais, cada qual caracterizado por uma relação específica entre tensão, corrente e potência. O primeiro corresponde às cargas de impedância constante, tipicamente associadas a equipamentos que utilizam o efeito térmico como princípio de funcionamento. O segundo refere-se às cargas de potência constante, frequentemente encontradas em motores elétricos e em equipamentos que utilizam conversores de frequência durante sua utilização. Por fim, têm-se as cargas de corrente constante, normalmente associadas a dispositivos dotados de fontes chaveadas. Essas características são inerentes à concepção e ao propósito de funcionamento de cada equipamento, influenciando diretamente o comportamento da carga perante variações das condições elétricas do sistema.

Assim, diante da elevada diversidade de equipamentos atualmente presentes nas unidades consumidoras e da natureza dinâmica e não linear de sua utilização ao longo do dia, a determinação de um modelo de carga capaz de representar de forma robusta o comportamento agregado dos consumidores residenciais brasileiros torna-se um desafio relevante. Tal representação possui impacto direto sobre os resultados obtidos em estudos de fluxo de potência, influenciando consequentemente a estimativa dos parâmetros elétricos do sistema e a aderência das simulações às condições reais de operação da rede.

Atualmente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) utiliza o software OpenDSS para o cálculo e a quantificação das perdas elétricas das concessionárias de distribuição brasileiras. Nesse processo, é adotado um modelo de carga baseado na formulação ZIP, a qual permite representar a carga como uma combinação ponderada dos comportamentos de impedância constante, corrente constante e potência constante, conferindo maior flexibilidade à modelagem. Na configuração atualmente utilizada, a potência ativa é representada por uma composição de 50% de impedância constante e 50% de potência constante, enquanto a potência reativa é modelada integralmente como impedância constante.

Entretanto, um aspecto que motiva a presente pesquisa refere-se à origem e à justificativa técnica desse modelo. Conforme observado ao longo deste trabalho, sua adoção decorre da utilização do modelo de carga estabelecido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em seus Procedimentos de Rede, sem que sejam apresentadas evidências experimentais ou estudos específicos que comprovem sua adequação às diferentes tipologias de carga encontradas nos sistemas de distribuição. Tal limitação torna-se ainda mais relevante quando se considera a elevada heterogeneidade das cargas conectadas às redes de média e baixa tensão, abrangendo consumidores residenciais, comerciais, industriais e sistemas de iluminação pública, cada qual com características comportamentais distintas.

Dessa forma, o presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) teve como foco a proposição de um modelo de carga representativo para consumidores residenciais, fundamentado em medições experimentais e sustentado por critérios técnicos que justifiquem sua utilização. O objetivo principal consistiu em representar de maneira mais consistente o comportamento dessa tipologia de carga, permitindo maior aderência entre os modelos simulados e as condições reais de operação, especialmente no que se refere à estimativa das perdas elétricas, utilizando o então modelo ZIP anteriormente mencionado.

Para alcançar esse objetivo, foram realizadas medições em diversos equipamentos amplamente difundidos nas residências brasileiras. Em cada equipamento, aplicaram-se variações controladas de tensão em torno de seu valor nominal, observando-se as respectivas respostas das potências ativa e reativa. A partir dos dados experimentais obtidos, empregou-se a técnica de regressão quadrática, a qual permite determinar a equação de segundo grau que melhor representa o comportamento observado. Com base

nesse procedimento, foi possível estimar os coeficientes equivalentes do modelo ZIP para cada um dos equipamentos analisados.

De posse dos modelos individuais obtidos, foi então proposta uma metodologia para a construção de um modelo equivalente agregado. Para isso, adotou-se uma ponderação baseada no consumo energético médio anual de cada equipamento, buscando atribuir maior representatividade às cargas que exercem maior influência sobre o consumo total de energia das residências. Essa abordagem foi concebida com o intuito de destacar os equipamentos que, além de apresentarem maior participação na demanda energética residencial, tendem também a contribuir de forma mais significativa para as perdas elétricas observadas no sistema.

Como resultado da metodologia proposta, foi obtido o modelo equivalente apresentado na Tabela XIV, cujos coeficientes diferem significativamente daqueles atualmente adotados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Essa diferença pode ser atribuída, principalmente, à crescente presença de dispositivos baseados em eletrônica de potência nas residências modernas. Equipamentos dotados de inversores eletrônicos, fontes chaveadas e sistemas de controle avançados vêm sendo cada vez mais utilizados em função dos ganhos proporcionados em eficiência energética, redução dos custos de operação para os consumidores e diminuição dos impactos ambientais associados ao consumo de energia elétrica.

Quando analisados sob a ótica das perdas elétricas, os resultados mostraram que o modelo proposto apresentou um acréscimo aproximado de 5% em relação ao modelo atualmente utilizado pela ANEEL. Esse resultado evidencia não apenas a diferença entre as modelagens, mas também a relevância da representação adequada do comportamento das cargas para a obtenção de estimativas mais aderentes à realidade operacional dos sistemas de distribuição. Tal constatação reforça o impacto que a modelagem das cargas pode exercer sobre os diversos parâmetros elétricos calculados em estudos de fluxo de potência.

Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo alternativo utilizando equipamentos tecnologicamente mais simples e menos eficientes, com o objetivo de representar um cenário compatível com residências de menor poder aquisitivo. A proposição desse modelo se justifica pelo fato de que, embora as tecnologias mais modernas apresentem

crescente participação no mercado, sua disseminação ainda não ocorre de forma homogênea entre todas as classes de consumidores residenciais.

Os resultados desse cenário alternativo, apresentados na Tabela XV, mostraram coeficientes mais próximos daqueles atualmente adotados pela ANEEL. Nesse caso, a potência ativa apresentou uma divisão aproximadamente equilibrada entre as componentes de impedância constante e potência constante, aproximando-se da configuração utilizada pela agência reguladora. Entretanto, a principal diferença permaneceu associada à potência reativa, cujo comportamento apresentou predominância da componente de potência constante, em contraste com a modelagem atualmente adotada, que a representa integralmente por meio da componente de impedância constante.

Esses resultados indicam que o modelo atualmente empregado pode ainda apresentar razoável aderência para cenários caracterizados por maior presença de equipamentos convencionais. Contudo, à medida que tecnologias mais modernas e baseadas em eletrônica de potência se tornem predominantes no parque residencial brasileiro, a tendência observada é de um afastamento progressivo entre o comportamento real das cargas e os coeficientes atualmente utilizados. Nesse contexto, a atualização dos modelos de carga torna-se uma medida importante para garantir maior precisão nas estimativas de perdas elétricas e nos estudos de planejamento e operação dos sistemas de distribuição.

Dessa forma, quando analisados os resultados relacionados às perdas energéticas, o modelo alternativo apresentou uma redução aproximada de 3% em relação ao modelo de referência adotado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), conforme apresentado na Tabela XVI. Tal resultado evidencia o quanto a composição das cargas consideradas influencia os coeficientes do modelo equivalente e, consequentemente, os valores de perdas obtidos por meio das simulações. Além disso, reforça a complexidade inerente à construção de um modelo capaz de representar, com total fidelidade, uma realidade caracterizada por elevada diversidade tecnológica e constante evolução.

Apesar da proposição de dois modelos distintos ao longo deste trabalho, concluiu-se que o modelo apresentado na Tabela XIV, composto predominantemente por equipamentos tecnologicamente mais modernos, constitui a alternativa mais adequada para representar o comportamento futuro das cargas residenciais brasileiras. Essa escolha se fundamenta na tendência observada de crescente inserção de equipamentos baseados em eletrônica de

potência, impulsionada pela busca por maior eficiência energética e pela gradual redução dos custos de aquisição dessas tecnologias. Assim, embora parte da população ainda não possua amplo acesso a esses equipamentos, espera-se que sua participação no parque residencial brasileiro aumente significativamente nos próximos anos.

Por fim, conclui-se que a proposição de um modelo fixo para representar um conjunto de cargas cuja composição varia continuamente ao longo do tempo constitui, por natureza, uma simplificação sujeita a incertezas. Dessa forma, o objetivo da modelagem não deve ser eliminar completamente esse erro, mas sim reduzi-lo ao máximo por meio de representações cada vez mais aderentes à realidade observada.

Nesse contexto, os resultados obtidos indicam que o modelo atualmente adotado pela ANEEL pode não refletir adequadamente a predominância dos comportamentos elétricos associados às cargas residenciais modernas. A comparação realizada com o modelo proposto neste trabalho demonstrou uma diferença aproximada de 5% nos valores de perdas elétricas calculados. Embora esse percentual possa parecer modesto à primeira vista, sua aplicação em alimentadores de grande porte e em estudos de abrangência sistêmica pode resultar em diferenças energéticas expressivas, evidenciando a importância da atualização periódica dos modelos de carga utilizados em estudos de planejamento, operação e regulação dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

7. REFERÊNCIAS:

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. Tradução de José Lucimar do Nascimento. Revisão técnica de Antonio Pertence Júnior. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 7 – Cálculo de perdas na distribuição**. Brasília, DF: ANEEL, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, DF: ANEEL, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica n.º 0012/2015-SRD/ANEEL**. Brasília, DF: ANEEL, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica n.º 0057/2014-SRD/ANEEL**. Brasília, DF: ANEEL, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica n.º 0103/2014-SRD/ANEEL**. Brasília, DF: ANEEL, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica n.º 0104/2014-SRD/ANEEL**. Brasília, DF: ANEEL, 2014.

BOKHARI, A.; ALKAN, A.; DOGAN, R.; BLACK, M.; BAKKABULIND, J.; HUGHES, P.; ATKINSON, D.; COLLINS, L. Experimental determination of the ZIP coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 29, n. 3, p. 1372-1381, jun. 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2285096>

DUGAN, Roger C.; MONTENEGRO, José; BALLANTI, Andrea. **The Open Distribution System Simulator (OpenDSS): Reference Guide**. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PARTICIPAÇÕES EM ENERGIA NUCLEAR E BINACIONAL (ENBPAR). **Potência média de aparelhos residenciais e comerciais**. Brasília, DF: ENBPar. Baseado na Norma de Distribuição ND-5.1.

MITSIDI PROJETOS; EMPRESA BRASILEIRA DE PARTICIPAÇÕES EM ENERGIA NUCLEAR E BINACIONAL (ENBPAR). **Relatório com cenários tendenciais sobre posse de equipamentos elétricos e os impactos na demanda por energia elétrica: análise dos resultados da PPH 2019**. Brasília, DF: ENBPar, 2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Procedimentos de Rede: Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos**. Revisão 2025.11. Rio de Janeiro: ONS, 2025.

SEXAUER, James A. **NEM User Primer – The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)**. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), 2011.

STEVENSON JUNIOR, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. Tradução de Arlindo Rodrigues Mayer. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986.

8. APENDICE:

Regressão Polinomial:

Todos os alunos dos mais diversos cursos das ciências exatas aprendem, inicialmente, a conceituação de regressão linear como um método de obtenção da função de primeira ordem que melhor se ajusta a um conjunto de pontos obtidos, na grande maioria das vezes, de forma experimental. O método utilizado para determinar essa função estimada denomina-se Método dos Mínimos Quadrados, cujo objetivo é encontrar os coeficientes do polinômio de forma que a soma dos quadrados dos erros em relação aos valores reais medidos seja mínima, como demonstrado na expressão abaixo:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Onde:

y_i = Valor real (obtido experimentalmente).

$\hat{y}_i = f(x_i)$ = valor previsto pelo modelo.

Erro = $(y_i - \hat{y}_i)$

Entretanto, nem sempre o relacionamento entre duas variáveis, considerando uma aplicação em duas dimensões, será adequadamente modelado por uma função de primeira ordem, sendo nesse contexto que as regressões polinomiais se fazem necessárias.

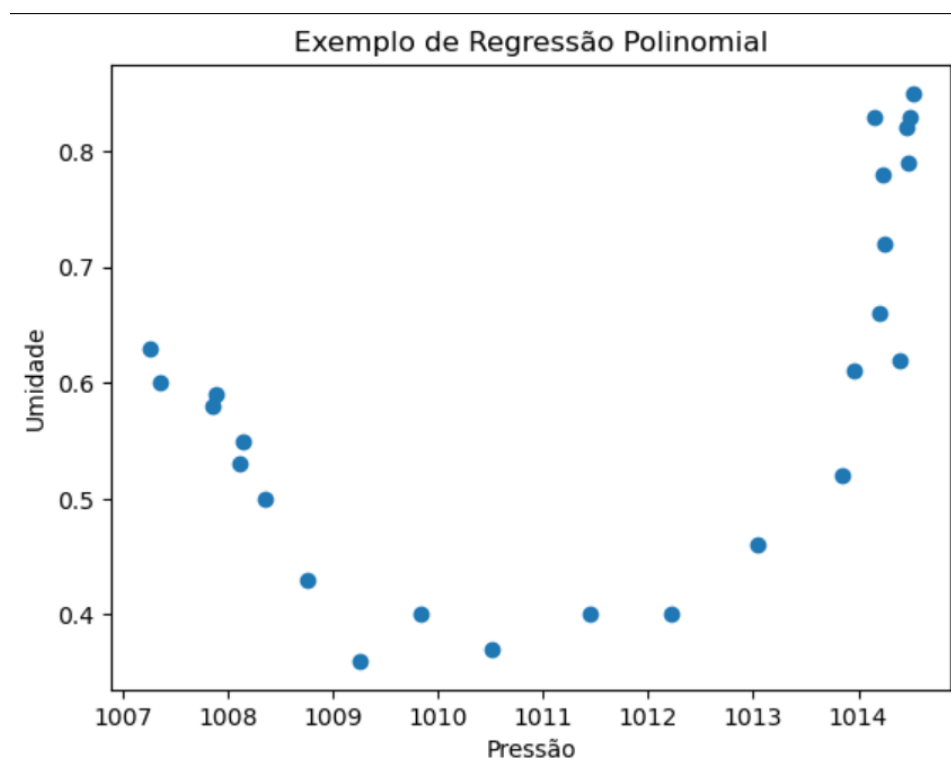


Fig. 51- Exemplos climáticos (Pressão x Umidade)

A Fig. 51 apresenta um exemplo de dados climáticos que relacionam pressão e umidade, obtidos experimentalmente. Considerando como objetivo a estimação de uma função capaz de fornecer o nível de umidade para qualquer valor de pressão estipulado, a regressão polinomial apresenta-se como a ferramenta mais adequada para tal finalidade. Porém, como ressaltado no parágrafo anterior, é facilmente perceptível, de forma visual e pelo somatório quadrático do erro(SSE), que, no presente caso, uma função linear não seria suficiente para representar o comportamento dos dados pois, ainda que o algoritmo busque a reta que minimize a somatória dos erros ao quadrado, esse valor residual permanece elevado, resultando em uma função incapaz de fornecer estimativas condizentes com a realidade. A Fig. 52 apresenta o resultado da regressão linear aplicada a esses dados, da qual são obtidos os coeficientes da função ajustada $Y(x) = ax + b$.

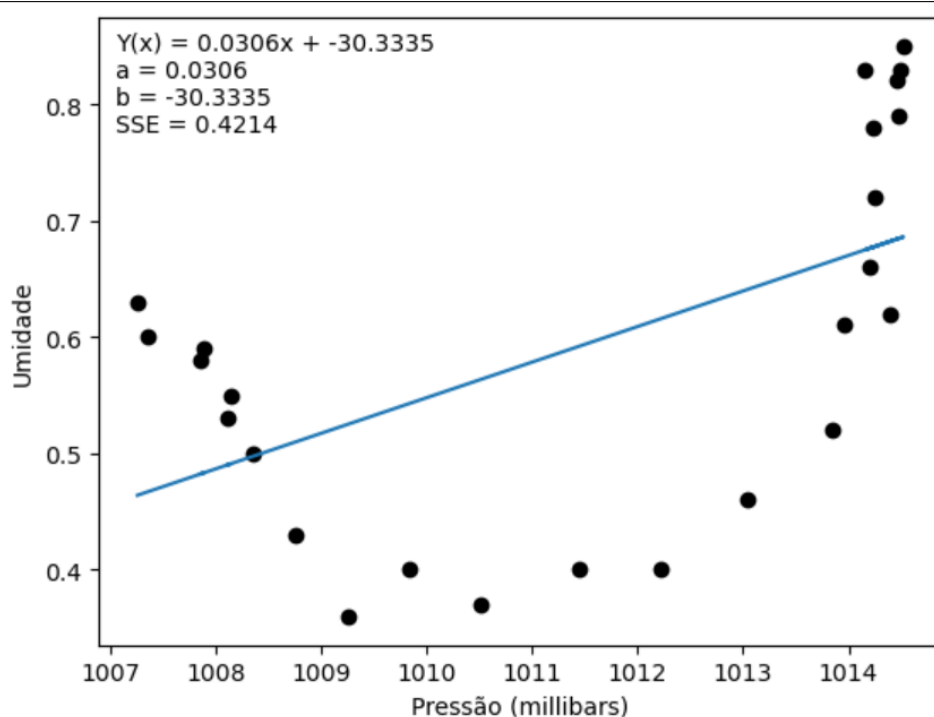


Fig. 52 - Regressão linear (Pressão x Umidade)

A regressão polinomial surge como solução para problemas dessa natureza, uma vez que oferece a possibilidade de ajustar o comportamento dos dados por meio de polinômios de variadas ordens. Ressalta-se, entretanto, que embora as possibilidades de ajuste se ampliem com o aumento da ordem do polinômio, não é recomendável elevar essa ordem de forma indiscriminada, pois isso pode acarretar em estimativas de coeficientes sem significado físico fenômeno conhecido como *overfitting* cujo aprofundamento não é escopo desta seção.

Tomando como exemplo uma equação de segunda ordem redigida por $Y(x) = ax^2 + bx + c$, não é possível, de imediato, estimar essa regressão pois os únicos dados disponíveis são os valores do eixo Y e seus respectivos valores no eixo X enquanto uma função de segunda ordem requer, para sua estimativa, valores de X^2 , sendo o mesmo válido para polinômios de graus superiores, que necessitam de X elevado até a sua respectiva ordem. Assim, criando uma nova coluna com os valores de X elevados ao quadrado, torna-se possível estimar os coeficientes A, B e C que minimizam, por meio de uma função quadrática, o somatório dos erros ao quadrado. Dessa forma, obtém-se a curva apresentada abaixo e sua respectiva função de segundo grau que, como pode ser observado novamente de forma visual e pelo somatório de erros ao quadrado(SSE), se adequa de forma consideravelmente melhor em comparação à regressão linear

anteriormente realizada trazendo consigo estimativas com valores mais condizentes com o comportamento obtido experimentalmente.

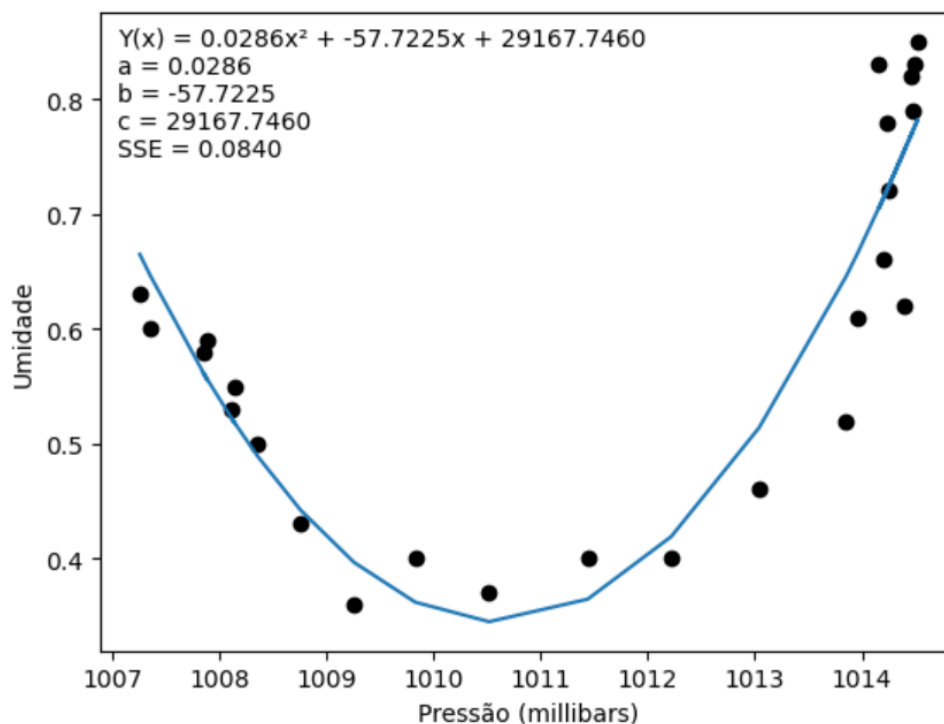


Fig. 53 - Regressão polinomial (Pressão x Umidade)

Para avaliar a qualidade do ajuste obtido pela regressão, existem diversas métricas, cada uma com suas respectivas interpretações e relevâncias. No presente trabalho, serão abordadas duas delas: o coeficiente de determinação R^2 e a raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE), as quais serão detalhadas nas seções subsequentes deste apêndice.

Métricas qualitativas de regressões: R^2

Em uma regressão polinomial, assim como em qualquer metodologia de modelagem, é fundamental a utilização de indicadores de qualidade que permitam avaliar se os resultados obtidos estão coerentes com o comportamento esperado dos dados.

O principal objetivo desse tipo de regressão é determinar o polinômio que melhor representa o conjunto de dados fornecido. Nesse contexto, um dos indicadores mais utilizados é o coeficiente de determinação, denotado por R^2 .

Esse índice tem como função quantificar, em termos percentuais, o quanto da variabilidade da variável dependente (Y) é explicada pelo modelo de regressão adotado.

Para o seu cálculo, considera-se inicialmente o valor médio dos dados observados no eixo Y, o qual serve como referência para avaliar a dispersão dos pontos em relação a essa média. A partir disso, é possível determinar a variabilidade média dos dados, usualmente representada pela soma dos quadrados dos desvios em relação ao valor médio sobre a quantidade de amostras experimentalmente consideradas, conforme ilustrado na formulação apresentada a seguir para um caso bidimensional genérico.

$$Var(média) = \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - média)^2}{n} = \frac{SS(média)}{n}$$

Com:

y_i = Ponto Y do valor i experimentalmente obtido

Média = Valor médio entre os valores que constituem o eixo Y experimentalmente obtido.

n = Número de amostras presentes.

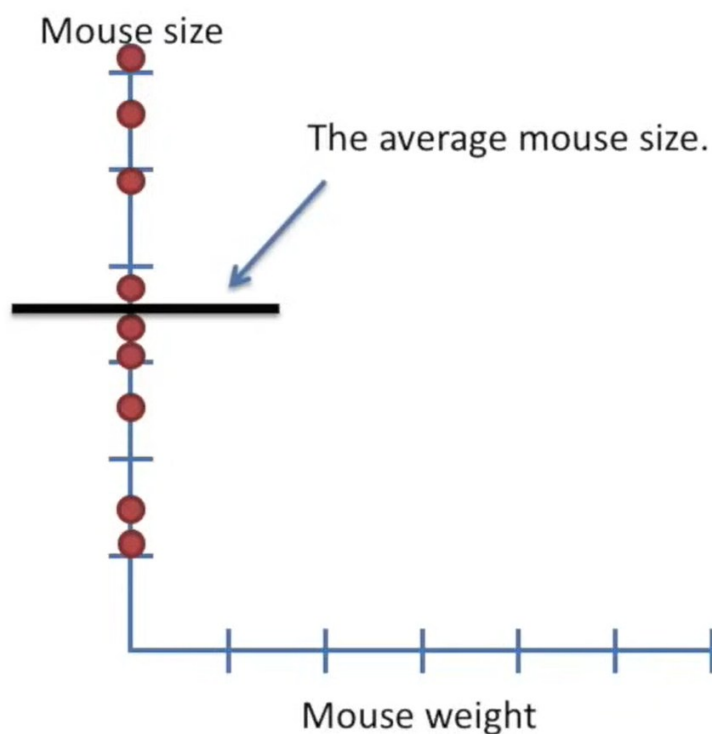


Fig. 54 - Valor médio obtido para cálculo da variação dos pontos experimentalmente obtidos em relação a seu valor médio.

O segundo passo consiste em realizar um procedimento análogo, porém considerando agora os valores estimados pela curva obtida por meio da regressão polinomial ou linear. O objetivo desse termo, assim como no caso anterior, é avaliar a dispersão dos dados; entretanto, neste contexto, busca-se quantificar a variação média dos valores observados em relação aos valores estimados pelo modelo. Espera-se que essa medida seja inferior à variabilidade total anteriormente calculada, indicando que o modelo é capaz de explicar uma parcela significativa do comportamento dos dados.

$$Var(curva_regressão) = \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - curva_ajustada)^2}{n} = \frac{SS(curva_ajustada)}{n}$$

Com:

y_i = Ponto Y do valor i experimentalmente obtido

Curva_ajustada = Valor Y obtido na curva obtida por meio da aplicação da regressão polinomial/linear com o mesmo valor do no eixo X do correspondente valor experimental comparado.

n = Número de amostras presentes.

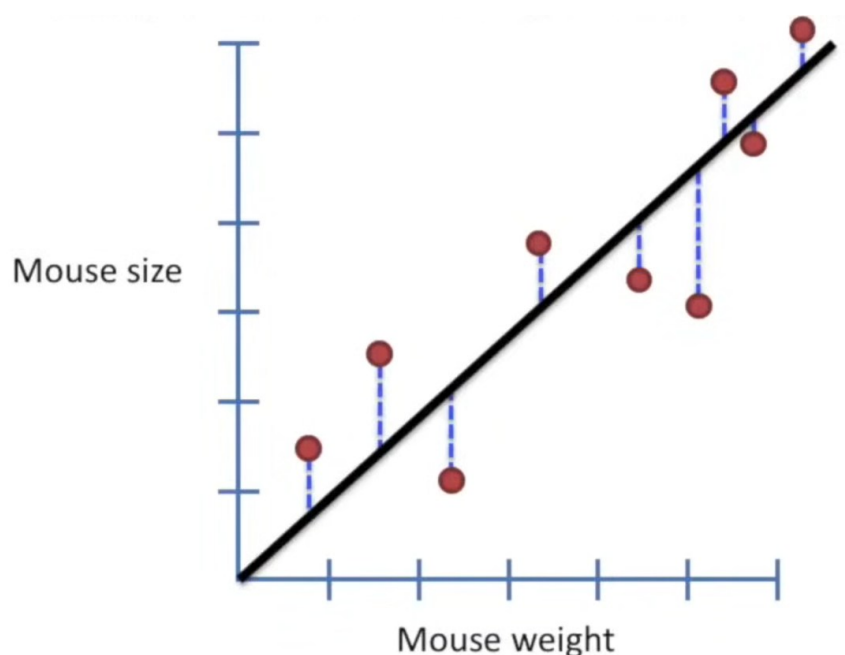


Fig. 55 - Valor médio obtido para cálculo da variação dos pontos experimentalmente obtidos em relação ao valores obtidos pela curva estimada pela regressão realizada.

Com ambas as métricas determinadas, obtém-se uma medida normalizada a partir da relação entre a variabilidade total dos dados e a variabilidade não explicada pelo modelo. Essa relação resulta em um valor compreendido entre 0 e 1, o qual deve ser interpretado como a fração da variabilidade da variável dependente (Y) que é explicada pelo modelo de regressão.

Em termos práticos, esse índice indica o grau de ajuste do modelo aos dados, sendo que valores mais próximos de 1 representam um melhor desempenho na representação do comportamento observado. Matematicamente, o coeficiente de determinação R^2 pode ser expresso por:

$$R^2 = \frac{SS(Média) - SS(Curva_Ajustada)}{SS(Média)}$$

Como mencionado anteriormente, além de expressar a fração da variabilidade dos dados explicada pelo modelo, muitos usuários também interpretam o coeficiente de determinação como uma métrica quantitativa da aderência da curva aos pontos experimentais.

Embora essa interpretação não esteja completamente incorreta, ela deve ser utilizada com cautela. De fato, um modelo bem ajustado tende a apresentar uma menor dispersão dos pontos em relação à curva estimada. No entanto, essa associação pode levar a

interpretações equivocadas quando considerada de forma isolada, uma vez que o R^2 não avalia diretamente a qualidade do formato da curva, mas sim a proporção da variabilidade explicada pelo modelo.

Situações em que esse tipo de interpretação equivocada pode ocorrer estão, em geral, associadas à ausência de relação entre as variáveis analisadas. Nesses casos, variações na variável independente (X) não produzem impactos significativos na variável dependente (Y).

Um exemplo típico, no contexto de sistemas elétricos, é o de cargas modeladas como potência constante, nas quais o comportamento da potência independe das variações de tensão. Nessas condições, a aplicação de modelos de regressão pode não resultar em interpretações significativas, ainda que métricas como o R^2 sejam utilizadas.

Dessa forma, mesmo que o coeficiente de determinação R^2 assuma valores baixos nessas situações, isso não implica necessariamente que o modelo de regressão seja inadequado ou que o polinômio ajustado não represente corretamente os dados observados. Na realidade, esse resultado pode indicar simplesmente a ausência de uma relação significativa entre as variáveis analisadas.

Assim, ainda que o valor de R^2 seja reduzido, o modelo pode continuar sendo útil para representar o comportamento do sistema, como será explorado ao longo deste trabalho.

Outros fatores também podem impactar a interpretação dessa métrica, como a baixa quantidade de dados utilizados na amostragem. No entanto, o aprofundamento nesse aspecto não faz parte do escopo deste apêndice, sendo apresentado apenas como uma observação geral.

Métricas qualitativas de regressões: Desvio Médio Quadrático Normalizado (NRMSE)

O Desvio Médio Quadrático Normalizado, assim como o coeficiente de determinação R^2 , é uma métrica qualitativa amplamente utilizada para avaliar a qualidade do ajuste de curvas obtidas por regressão polinomial.

Essa métrica tem como objetivo fornecer uma estimativa mais precisa e interpretável do erro existente entre os pontos obtidos experimentalmente e os valores estimados pelo modelo de regressão.

Para sua determinação, inicialmente calcula-se a média dos erros quadráticos, obtida a partir do somatório dos desvios entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo, elevados ao quadrado, dividido pela quantidade total de pontos analisados. Esse procedimento está diretamente relacionado ao método dos mínimos quadrados, uma vez que a curva de regressão é definida de forma a minimizar o somatório desses erros quadráticos, resultando na melhor aproximação possível do comportamento experimental observado.

Essa divisão é fundamental para o processo, uma vez que, sem sua aplicação, o valor do erro torna-se diretamente dependente da quantidade de pontos considerados. Em outras palavras, quanto maior o número de observações, maior tende a ser o valor acumulado do erro, o que inviabiliza sua interpretação adequada como métrica de qualidade do ajuste.

Além disso, para a obtenção do erro quadrático médio, que representa o erro médio na mesma unidade da variável analisada, como potência ativa ou reativa, é necessário aplicar a raiz quadrada ao valor médio dos erros quadráticos anteriormente calculado. Sem essa etapa, a grandeza resultante permaneceria elevada ao quadrado, o que levaria a unidades não interpretáveis no contexto físico, como W^2 ou Var^2 . Dessa forma, a expressão matemática para o cálculo do erro quadrático médio é apresentada a seguir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

Onde:

y - valor real (ou experimental) da variável dependente para o i -ésimo ponto

$\hat{y}_i$ - Valor estimado pela curva ajustada para o i -ésimo ponto

n - Número total de pontos obtidos experimentalmente.

Contudo, o RMSE não é facilmente interpretável quando o leitor não possui familiaridade com a grandeza analisada ou com a escala dos dados utilizados. Dessa forma, para proporcionar uma interpretação mais direta e intuitiva, pode ser utilizado o erro quadrático médio normalizado (NRMSE), obtido a partir da normalização do RMSE pela amplitude dos dados analisados.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}}$$

Dessa forma, os valores obtidos passam a variar, em geral, entre 0 e 1, sendo que valores próximos de zero indicam baixos níveis de erro médio, caracterizando uma situação desejável para a qualidade do ajuste do modelo.

QR-CODE:

Abaixo segue-se o QR-CODE cujo link inerente ao mesmo direciona a um repositório do GitHub cujo qual engloba em sua constituição todos os códigos e arquivos DSS utilizados ao longo deste trabalho.



Fig. 56 - QR-CODE