

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

PRISCILA DA COSTA FRAGA NASCIMENTO

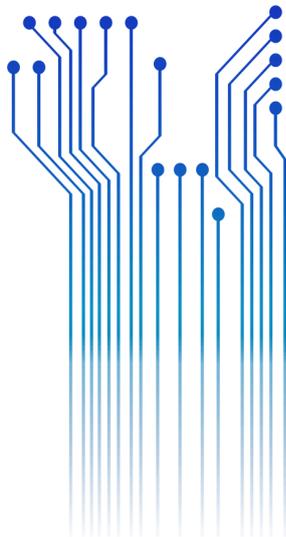


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

**ANÁLISE DA CORRENTE DO CONDUTOR NEUTRO E SUAS  
IMPLICAÇÕES UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS  
NO *CAMPUS* DA UFCG**



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande – PB.

2018

PRISCILA DA COSTA FRAGA NASCIMENTO

**ANÁLISE DA CORRENTE DO CONDUTOR NEUTRO E SUAS IMPLICAÇÕES  
UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS NO *CAMPUS* DA UFCG**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Professor Edmar Candeia Gurjão  
Orientador

Campina Grande – PB  
2018

PRISCILA DA COSTA FRAGA NASCIMENTO

**ANÁLISE DA CORRENTE DO CONDUTOR NEUTRO E SUAS IMPLICAÇÕES  
UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS NO *CAMPUS* DA UFCG**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovado em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Edmar Candeia Gurjão**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador

Campina Grande – PB

2018

## AGRADECIMENTOS

Eu quero agradecer, primeiramente a Deus, principalmente pelas pessoas que fazem parte da minha vida, as quais foram, muitas vezes, a força que não tive e impulsão necessária para chegar até aqui. Sem elas, tenho certeza, não seria possível estar concluindo a graduação em Engenharia Elétrica. Quero agradecer:

Aos meus familiares, em especial à minha mãe Maria da Conceição da Costa e à minha avó Januária Gonçalves Costa (In Memoriam) por nunca terem desistido de mim, mesmo quando eu já não acreditava mais. Sem elas, eu não seria um terço do que sou hoje.

Aos meus amigos de longa data, Mikaely Araújo, Oquinalva Brito e Marcelo Augusto que sempre me apoiaram nessa longa e árdua jornada.

Aos meus colegas de graduação, que além de estarem presentes nas disciplinas, chorando e comemorando, foram indispensáveis para conseguir chegar até aqui: Helem Monyelle, Alana Santiago, Grace Colaço, Samara Chaves, Emanuel Filipe, Ivana Crisóstomo Laysa Lúcia, Pollyana Cirino, Rayanna Francklim, Hotoniones Bezerra e Phablo Vinícius.

Por fim, ao meu orientador Edmar, pela oportunidade, pelos conselhos e pelas orientações que vou levar para o restante da vida.

*“Deus nos fez perfeitos e não escolhe os capacitados, e sim capacita os escolhidos”.*

*“Fazer ou não fazer algo, só depende de nossa vontade e perseverança”.*

Albert Einstein

## RESUMO

Em um sistema de energia elétrica a corrente do condutor neutro pode ser um bom indício para encontrar consumos anormais. Neste trabalho é apresentada uma maneira de se determinar a corrente do condutor neutro, utilizando a técnica de componentes simétricas, em conjunto com a análise de dados de um medidor de energia elétrica, o qual fornece as informações em tempo real, de potência ativa, potência reativa, fator de potência, tensão e corrente do prédio em que está instalado. Para este estudo de caso foi utilizado o medidor instalado no prédio do Laboratório de Metrologia (LabMET) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

**Palavras-chave:** Corrente do Condutor Neutro, Componentes Simétricas, Análise de Dados.

## ABSTRACT

In a power system the current of the neutral conductor can be an indicator of abnormal energy consumptions. This work presents a method to find the current of the neutral conductor, using the technique of symmetrical components, in conjunction with the data analysis of an electric power meter, which provides the real-time information of active power, reactive power, power factor, voltage and current of the building in which it is installed. For this case study, the meter installed in the metrology laboratory building (LabMET) of the Federal University of Campina Grande (UFCG) was used.

**Keywords:** Neutral Conductor Current, Symmetrical Components, Data Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Um diagrama fasorial mostrando $V = V_m \angle \phi$ e $I = I_m \angle \theta$ . .....	14
Figura 2: Triângulos de potências das cargas. ....	17
Figura 3: Representação vetorial das componentes simétricas .....	19
Figura 4: Fasores de tensão de fase em componentes simétricas. ....	23
Figura 5: Medidor de energia elétrica feito pelo projeto scike Paraíba. ....	25
Figura 6: Placa de aquisição de dados utilizando o Atmel m90e36a e o esp8266. ....	25
Figura 7: Exemplo de Arduino Uno disponível no mercado. ....	26
Figura 8: Exemplo do módulo WiFi ESP8266. ....	27
Figura 9: Exemplo de Disjuntor Diferencial Residual tetrapolar. ....	27
Figura 10: Dados de corrente e tensão trifásicos enviados pelo medidor para a plataforma Grafana. ....	28
Figura 11: Mapa da UFCG, <i>campus</i> de Campina Grande – PB, com destaque para o Prédio LabMET. ....	30
Figura 12: Consumo de Energia Ativa em função dos dias. ....	31
Figura 13: Consumo de Energia Ativa médio para cada hora de consumo. ....	32
Figura 14: Módulo da corrente média do fio neutro em função dos dias. ....	33
Figura 15: Módulos das correntes médias em função dos dias. ....	33
Figura 16: Módulos das correntes médias para cada hora de consumo. ....	34
Figura 17: Tensão média no condutor neutro em função dos dias. ....	35
Figura 18: Energia ativa do condutor neutro em função dos dias. ....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Módulo das correntes em função do dia no Prédio LabMET.....	36
Tabela 2: Módulo das correntes médias, no dia 28 de novembro, em comparação com a hora no prédio LabMET. ....	37
Tabela 3: Energias Ativas médias em função do dia no Prédio LabMET.....	38
Tabela 4: Razão entre a Energia Ativa do neutro com as demais, em função do dia, no Prédio LabMET. ....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DR	Disjuntor Diferencial Residual
kVA	Quilovolt-ampère
kvar	Quilovolt-ampère-reativo
kvarh	Ampère-reativo-hora
kWh	Quilowatt-hora
LabMET	Laboratório de Metrologia
LED	Light Emitting Diode
mA	MiliAmpère
RMS	Root Mean Square
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
V	Volt
VA	Volt-ampère
var	Volt-ampère-reativo
W	Watt
Wh	Watt-hora

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	12
2	Fundamentação teórica .....	13
2.1	Valor Eficaz .....	13
2.2	Representação Fasorial .....	14
2.3	Classificação das Cargas.....	15
2.4	Potência Ativa.....	15
2.5	Potência Reativa .....	15
2.6	Energia Ativa .....	16
2.7	Energia Reativa.....	16
2.8	Potência Aparente .....	16
2.9	Fator de Potência .....	17
2.10	Componentes Simétricas.....	18
3	Materiais e Métodos.....	24
3.1	Projeto Scike Paraíba .....	24
3.2	Medidor de Energia Elétrica .....	24
3.2.1	Placa de Aquisição de Dados .....	25
3.2.2	Arduino Uno.....	26
3.2.3	Módulo WiFi ESP8266 .....	26
3.2.4	Disjuntor Diferencial Residual.....	27
3.3	Processamento de Dados .....	28
3.4	Metodologia para Identificação dos Parâmetros de Interesse.....	29
4	Resultados .....	30
4.1	Prédio LabMET .....	30
4.1.1	Consumo de Energia Ativa – Prédio LabMET .....	31
4.2	Corrente do Condutor Neutro .....	32
4.3	Energia Ativa do Condutor Neutro .....	35
4.4	Análise Quantitativa dos Resultados .....	36
4.4.1	Quantitativo das Correntes .....	36
4.4.2	Quantitativo da Energia Ativa.....	38
5	Considerações Finais .....	39
	REFERÊNCIAS .....	41

# 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica está relacionada com a realização das maiorias das tarefas dos nossos dias, e é muito importante para a humanidade (ANEEL, 2017). Com o decorrer do tempo e o avanço das tecnologias, a demanda por energia aumentou, os equipamentos evoluíram passando a exigir mais potência e qualidade de energia elétrica entregue da concessionária. Por se tratar de um recurso com tamanha importância, e por ser um recurso caro dos pontos de vista ambiental e econômico é interessante que o seu consumo não seja feito de forma leviana e sem controle, por isto é interessante que ele seja monitorado (ANEEL, 2017).

Devido a extensa gama de aparelhos que utilizam a energia elétrica para o seu funcionamento, há uma grande possibilidade que cada unidade consumidora possua um perfil específico de funcionamento. A UFCG é um exemplo de um consumidor misto, que possui 93 prédios, com diferentes perfis de consumo, em razão das diferentes atividades realizadas em cada um, como salas de aula, laboratórios, auditórios, bancos, dentre outros.

Atualmente, na fatura de energia elétrica apresentada pela empresa concessionária, são encontradas as informações de: energia ativa em kWh, o consumo de reativos excedentes, a demanda medida e a demanda ultrapassada durante o período de faturamento, para consumidores da classe A, a exemplo da UFCG. Como se trata de uma análise de consumo macro, as informações contidas na fatura não auxiliam o consumidor numa redução do seu consumo de energia elétrica ou se existe algum consumo estranho gerando gastos desnecessários. Uma maneira de auxiliar a identificação de alguma anormalidade, é estudar a corrente do condutor neutro em sistemas trifásicos e verificar se está dentro do esperado para a instalação em questão.

O objetivo deste trabalho é utilizar a técnica de componentes simétricas para encontrar a corrente que flui pelo condutor neutro, a partir das informações dos medidores onde existe o monitoramento de parâmetros de energia elétrica em tempo real, instalados em alguns prédios da UFCG. O prédio LabMET é usado como caso teste deste estudo, e as implicações desta corrente são tratadas no decorrer dos tópicos seguintes.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram empregados os dados obtidos por intermédio dos medidor de energia instalado no prédio em estudo. Este medidor recolhe informações de potência ativa, potência reativa, fator de potência, tensão e corrente de cada uma das três fases da alimentação do prédio. Essas informações são enviadas para um servidor, onde podem ser retiradas e analisadas. Esses dados serão pré-processados pelo *software* Microsoft Office Excel 2016®, com o intuito de organizá-los e corrigir alguns erros de medição ocasionados por falhas

na rede. Posteriormente, os dados são tratados no *software* Matlab ®, versão R2016a, no qual são calculadas as componentes simétricas de interesse. Por fim, os parâmetros de interesse obtidos por meio do Matlab ® são examinados no Microsoft Office Excel ®, onde são elaborados gráficos e tabelas, as quais auxiliam no entendimento deste estudo.

Este trabalho é organizado em cinco capítulos e, este é o primeiro, responsável por introduzir os objetivos do mesmo e sua contextualização. No segundo capítulo é mostrado a fundamentação teórica, na qual alguns conceitos necessários para entender todo o contexto em que o trabalho se enquadra. No terceiro capítulo é explanado sobre que projeto este trabalho de conclusão de curso se trata, a maneira como é realizada a aquisição de dados por meio do medidor, quais programas foram utilizados para processar os dados e de que forma foi feita, além da metodologia para empregar a técnica de componentes simétricas. No quarto capítulo, os resultados obtidos são explicados, onde é discutido acerca da energia ativa do prédio LabMET, da corrente do neutro encontrada e quais as implicações desses dados no sistema elétrico do caso teste. No quinto e último capítulo são feitas considerações e sugestões finais relativas ao trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Visando ajudar a compreender como o trabalho foi feito, são apresentados alguns conceitos mostrados nos livros Fundamentos de Circuitos Elétricos de Matthew N. O. Sadiku, *Análise e Design* de Sistemas de Potência de J. Duncan Glover e a resolução normativa da ANEEL de número 414.

### 2.1 VALOR EFICAZ

O conceito de valor eficaz ou RMS, provém da necessidade de medir a eficácia de uma fonte de tensão ou de corrente na liberação de potência para uma carga resistiva (SADIKU, 2013). Dessa forma, igualando-se para a potência média absorvida pelo resistor no circuito CA em um período  $T$ , com a potência absorvida pelo resistor em um circuito CC, chegamos a seguinte expressão:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad (1)$$

O valor da eficaz da tensão é encontrado de maneira análoga à corrente, ou seja:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (2)$$

Assim, para qualquer sinal periódico  $x(t)$  em geral, o valor eficaz é a raiz do valor médio quadrático e é dado por

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (3)$$

## 2.2 REPRESENTAÇÃO FASORIAL

As senoides são facilmente e convenientemente expressas em fasores, os quais são números complexos que representam a amplitude e a fase de uma senoide. Em sistemas trifásicos é comum se trabalhar com a corrente e tensão expressas em fasores.

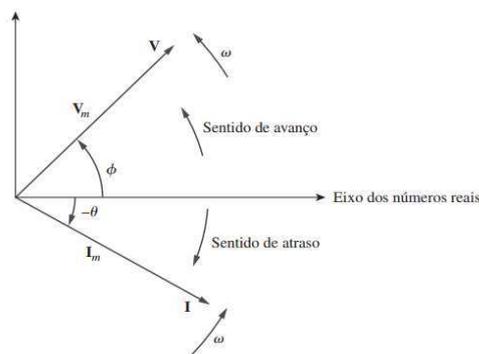
Considerando as senoides  $v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi)$  e  $i(t) = I_m \cos(\omega t - \theta)$ , com a mesma velocidade angular  $\omega t$ , podemos ter sua representação fasorial dada pelas equações (4) e (5).

$$V = V_m \angle \phi \quad (4)$$

$$I = I_m \angle \theta \quad (5)$$

Sendo  $V_m$  é a amplitude da tensão  $v(t)$ ,  $\phi$  é o ângulo da tensão  $v(t)$ ,  $I_m$  é a amplitude da corrente  $i(t)$  e  $\theta$  é o ângulo da corrente  $i(t)$ . Como na representação fasorial a dependência com o tempo é eliminada, por meio do diagrama fasorial da Figura 1, é possível como os fasores das equações (4) e (5) são relacionados entre si.

Figura 1: Um diagrama fasorial mostrando  $V = V_m \angle \phi$  e  $I = I_m \angle \theta$ .



Fonte: (SADIKU, 2013)

## 2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS CARGAS

Em um sistema de potência qualquer, há quatro tipos de cargas que podem ser conectadas a uma fonte de tensão, senoidal ou não, são elas:

- **Carga Resistiva Pura:** Formada apenas por resistores, esse tipo não é capaz de armazenar energia elétrica e não altera o ângulo entre tensão e corrente, conhecido como defasagem;
- **Carga Indutiva Pura:** Composta exclusivamente por indutores, como estes armazenam energia na forma de campo magnético, a corrente está atrasada da tensão por uma diferença de  $90^\circ$ ;
- **Carga Capacitiva Pura:** Formada apenas por capacitores, cujos são capazes de armazenar energia na forma de campo elétrico, resulta em uma corrente adiantada de  $90^\circ$  da tensão;
- **Carga Mista:** Associação das cargas já descritas, onde o ângulo entre a tensão e a corrente pode variar em um intervalo de  $-90^\circ$  até  $+90^\circ$ , dependendo do modo como as cargas são conectadas ao sistema.

## 2.4 POTÊNCIA ATIVA

A potência ativa é aquela à qual é absorvida por uma carga resistiva, esta pode ser convertida em outras formas de energia gerando trabalho (GLOVER, 2008). Seu valor médio é representado pela letra  $P$ , dado em watts (W) e é comumente chamado de potência real ou potência ativa. A convenção mais comum e adotada neste trabalho, se dá que a potência é positiva quando é absorvida pela carga e negativa se a carga for responsável por sua geração.

## 2.5 POTÊNCIA REATIVA

A potência reativa é absorvida pela parte reativa da carga, sua amplitude é representada pela letra  $Q$  (GLOVER, 2008). Se esta potência for de caráter indutivo, esta recebe um valor positivo e se for de uma carga capacitiva, recebe um sinal negativo. Sua unidade é o volt ampere reativo (var), ou seu múltiplo, quilovolt ampere reativo (kvar). Apesar desta potência não realizar trabalho útil, ela é essencial para o funcionamento de alguns tipos de cargas como motores, baterias, lâmpadas de LED, dentre outros.

## 2.6 ENERGIA ATIVA

A energia elétrica ativa é aquela que pode ser convertida em outra forma de energia, expressa em quilowatts-hora (kWh) (ANEEL, 2010). Assim, esse tipo de energia diz quanto de potência ativa é absorvida ou gerada por uma determinada carga em um período de tempo, que usualmente é no espaço de uma hora.

## 2.7 ENERGIA REATIVA

A energia elétrica reativa é aquela que circula entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, sem produzir trabalho, expressa em ampere reativo hora (kvarh) (ANEEL, 2010). Dessa forma, essa energia expressa quanto de potência reativa é absorvida ou gerada por uma carga em um intervalo de tempo, geralmente durante uma hora.

## 2.8 POTÊNCIA APARENTE

A potência aparente, também conhecida como potência complexa, é a potência total de um determinado circuito, reunindo as potências ativa e reativa presentes. Ela é representada pela letra  $S$ , possuindo unidade volt ampere (VA) ou quilovolt ampere (kVA) e usualmente, ela é calculada pela multiplicação da tensão eficaz ( $V_{rms}$ ) com o conjugado da corrente eficaz ( $I_{rms}$ ), como pode ser visto na equação (6).

$$S = VI^* = |V\angle\phi_{V_{rms}}||I\angle\phi_{I_{rms}}|^* = VI\angle(\phi_{V_{rms}} - \phi_{I_{rms}}) \quad (6)$$

Onde  $\phi_{V_{rms}}$  e  $\phi_{I_{rms}}$  são os ângulos da tensão RMS e corrente RMS, respectivamente. Essa potência é um número complexo, por essa razão também é conhecida como potência complexa, sendo assim, é passível de representação nas formas polar e cartesiana.

- Forma Cartesiana:** Nesta representação há uma separação entre as partes real e imaginária da potência aparente ( $S$ ), onde a parte real é dada pela potência ativa ( $P$ ) e a imaginária é dada pela potência reativa ( $Q$ ), conforme mostrado a seguir.

$$S = P + jQ \quad (7)$$

- Forma Polar:** Nesta representação, a potência complexa é formada do módulo da potência ativa, potência reativa e o ângulo de fase entre tensão e corrente. Pode-se calcular o módulo e o ângulo utilizando as equações (8) e (9), respectivamente. A forma polar é observada na equação (10).

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (8)$$

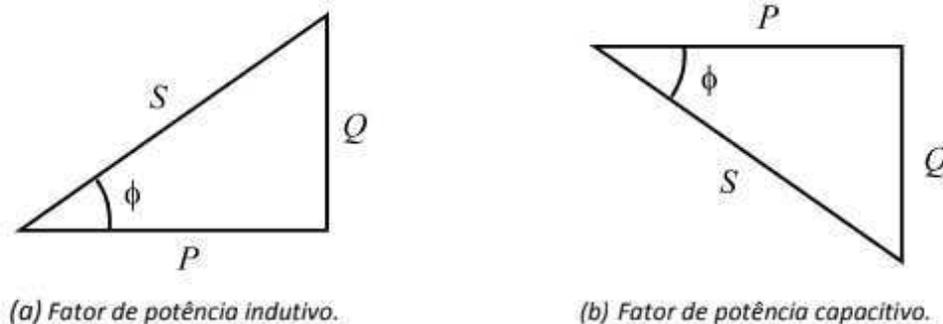
$$\arctan \phi = \frac{Q}{P} \quad (9)$$

$$S = |S| \angle \phi \quad (10)$$

Onde  $|S|$  é o módulo da potência aparente;  $P$  é a potência ativa;  $Q$  é a potência reativa e  $\phi$  é o ângulo calculado pela diferença do ângulo de fase entre tensão RMS e corrente RMS.

Graficamente, é usual ver as componentes das duas formas de representação mostradas acima utilizando o triângulo das potências, nele pode ser representado o módulo das potências aparente, ativa e reativa, bem como o ângulo da potência complexa. Caso a potência reativa seja indutiva,  $\phi > 0$  e o triângulo será o da Figura 2(a), já se a potência reativa for capacitiva,  $\phi < 0$  e o triângulo será da forma da Figura 2(b). O termo fator de potência será explicado posteriormente.

Figura 2: Triângulos de potências das cargas.



Fonte: (CHAGAS, 2012)

## 2.9 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência representa uma relação entre a potência ativa e a potência aparente (GLOVER, 2008). Ele é representado como o cosseno do ângulo  $\phi$  formado pela diferença entre os ângulos de fase de tensão e corrente, ou por outras relações com mostra a equação (11).

$$fp = \cos \phi = \cos \left( \arctan \frac{Q}{P} \right) = \frac{P}{|S|} \quad (11)$$

Onde  $fp$  é o fator de potência;  $|S|$  o módulo da potência aparente;  $P$  a potência ativa;  $Q$  a potência reativa e  $\phi$  o ângulo de carga ou do fator de potência.

O fator de potência é adimensional e indica quanto da potência total transmitida a carga está realizando um trabalho útil. Há três tipos de fator de potência e eles ocorrem devido ao tipo de carga conectada ao sistema:

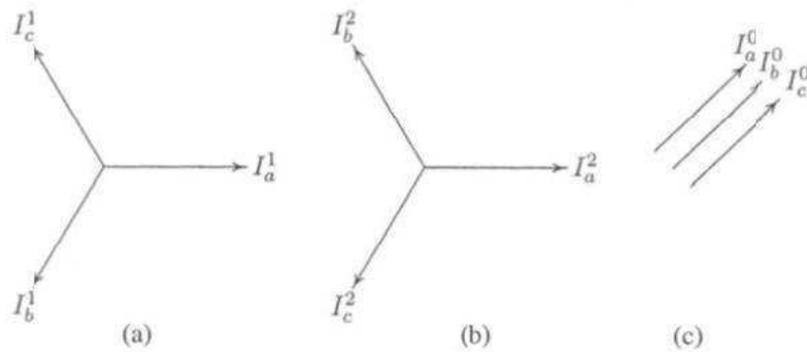
- **Fator de Potência Indutivo:** Ocorre quando a potência reativa é positiva, ou seja,  $|Q| > 0$ ;
- **Fator de Potência Capacitivo:** Ocorre quando a potência reativa é negativa, ou seja,  $|Q| < 0$ ;
- **Fator de Potência Resistivo:** Ocorre quando não há potência reativa no sistema, ou seja,  $|Q| = 0$ .

## 2.10 COMPONENTES SIMÉTRICAS

As componentes simétricas permitem que quantidades de correntes e tensões de fases equilibradas possam ser substituídas separadamente por três componentes equilibradas linearmente independentes chamadas de componentes simétricas (SAADAT, 2002), cuja soma é igual ao sistema original (FORTESCUE, 1918). Assim, está definido o teorema de Fortescue, onde é possível representar-se qualquer sistema trifásico, equilibrado ou não, com uma combinação linear do sistema original. Para determinar a resposta de tensão ou corrente de todo o sistema basta adicionar as respostas dos vetores de sequência (FORTESCUE, 1918).

Graficamente, os fasores de corrente de sequência de um sistema trifásico genérico são representados na Figura (3).

Figura 3: Representação vetorial das componentes simétricas



Fonte: (FORTESCUE, 1918)

Antes de definir matematicamente os fasores representados na Figura 3, é importante definir o operador  $a$ , o qual é um número complexo, tal como se segue:

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0,5 - j0,866 \\ a^3 &= 1 \angle 360^\circ = 1 + j0 \end{aligned} \quad (12)$$

Sabendo que:

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (13)$$

Com o operador definido, agora é possível descrever matematicamente os fasores. Para a Figura 3(a), temos uma sequência positiva de fase dos fasores, ou  $abc$ , e são escritos conforme as equações (13).

$$\begin{aligned} I_a^1 &= I_a^1 \angle 0^\circ = I_a^1 \\ I_b^1 &= I_a^1 \angle 120^\circ = a I_a^1 \\ I_c^1 &= I_a^1 \angle 240^\circ = a^2 I_a^1 \end{aligned} \quad (14)$$

Seguindo o mesmo raciocínio, para o caso de sequência negativa, representada na Figura 3(b), a sequência de fases é inversa, ou seja,  $acb$ . Assim, os fasores  $acb$  são representados nas equações (15).

$$\begin{aligned}
 I_a^2 &= I_a^2 \angle 0^\circ = I_a^2 \\
 I_b^2 &= I_a^2 \angle 240^\circ = a^2 I_a^2 \\
 I_c^2 &= I_a^2 \angle 140^\circ = a I_a^2
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Por fim, os fasores de sequência zero mostrados na Figura 3(c), estão todos em fase e são dados pela equação (16).

$$I_a^0 = I_b^0 = I_c^0 \tag{16}$$

Os índices 1, 2 e 0, utilizados nas equações (13), (14), (15) e Figura 3, são designados para representar a sequência positiva, negativa e zero, respectivamente. Caso o sistema analisado seja equilibrado, só haverá uma componente de fase, caso a sequência de fase seja *abc*, existirá apenas a componente da sequência positiva; caso a sequência de fases da rede seja *acb*, só haverá a componente de sequência negativa.

Essa técnica desenvolvida por Dr. Charles LeGeyt Fortescue, em 1918, pode ser expandida para *n* fasores de *n* sistemas, equilibrados ou não, e é uma poderosa ferramenta matemática para análise de correntes de falta, válida para faltas simétricas e assimétricas. A teoria básica para resolver um sistema trifásico de três fatores desequilibrados, segundo o Teorema de Fortescue (FORTESCUE, 1918) pode ser decomposto em três sistemas trifásicos de três fasores equilibrados chamados de componentes simétricas de sequência que são (STEVENSON, 1986):

- Componente de sequência positiva, composto por três fasores equilibrados de igual magnitude defasados de 120 graus um do outro, com a sequência de fase idêntica à do sistema trifásico original. Convencionalmente adota-se sequência *abc* e índice 1 (um);
- Componente de sequência negativa, composto por três fasores equilibrados de igual magnitude, defasados de 120 graus, que tem uma sequência de fase oposta à do sistema trifásico original e convencionalmente adota-se sequência *acb* e índice 2 (dois);
- Componente de sequência zero, composto por três fasores equilibrados de igual magnitude e com deslocamento de fase zero um do outro. Convencionalmente adota-se índice 0 (zero).

Considerando um sistema trifásico qualquer com correntes em desequilíbrio e sabendo que o sistema pode ser decomposto em uma combinação linear utilizando o Teorema de Fortescue, as componentes de fase originais podem ser dadas segundo as equações (17).

$$\begin{aligned}
I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\
I_b &= I_b^0 + I_b^1 + I_b^2 \\
I_c &= I_c^0 + I_c^1 + I_c^2
\end{aligned} \tag{17}$$

Como as componentes de sequência podem ser escritas em termos do operador  $a$ , podemos reescrever as equações (17), da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\
I_b &= I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 \\
I_c &= I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2
\end{aligned} \tag{18}$$

Podemos representar o conjunto de equações (18) em forma matricial, onde as matrizes e notação matricial serão apresentadas pelas equações (19) e (20), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$I^{abc} = A I_a^{012} \tag{20}$$

Na equação (20), a matriz  $A$  é chamada de matriz de transformação de componentes simétricas, ela é responsável porque transformar os fasores de fase  $I^{abc}$  em fasores de componentes simétricas ou componentes de sequência  $I_a^{012}$ , onde ela é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{21}$$

É possível encontrar a corrente em componentes simétricas por meio de notação matricial, utilizando a equação (22).

$$I^{012} = A^{-1} I_a^{abc} \tag{22}$$

Onde o termo  $A^{-1}$  é a inversa da matriz  $A$ , expressa na equação a seguir.

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} A^* \quad (23)$$

Sendo  $A^*$  o conjugado complexo, substituindo a equação (23) na equação (22), resultando em uma fórmula matricial para o cálculo direto das componentes simétricas expressa na equação (24).

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (24)$$

Todo o desenvolvimento das equações para o cálculo de componentes simétricas para corrente é feito de maneira análoga para a tensão. Dessa forma, as tensões de fase de um sistema trifásico em termos de componentes de fase são dadas pela equação (25) e sua notação matricial pela equação (26).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$V^{abc} = A V_a^{012} \quad (26)$$

De maneira similar, as componentes simétricas para tensões de um sistema trifásico são dadas na equação (27) e sua notação matricial, na equação (28).

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (27)$$

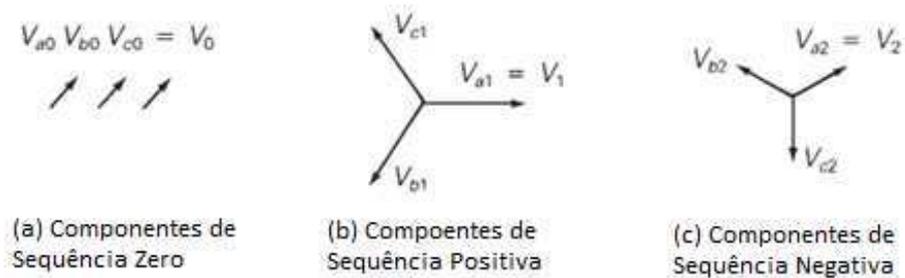
$$V^{abc} = V I_a^{012} \quad (28)$$

A equação (27) mostra que não há componentes de sequência zero em um sistema trifásico equilibrado porque a soma de três fasores equilibrados é zero. (GLOVER, 2018). Assim, caso o sistema trifásico não seja equilibrado, haverá componentes de sequência zero da fase para o neutro, onde este será a tensão do condutor neutro, ou seja:

$$V_a^0 = V_n \quad (29)$$

Sendo  $V_a^0$  a componente de sequência zero da tensão e  $V_n$  é a tensão do fio neutro. Semelhantemente a representação vetorial dos fasores para corrente na Figura 3, temos a representação gráfica para o caso da tensão mostrada na Figura 4. Os índices 0, 1, 2 possuem o mesmo significado do caso anterior.

Figura 4: Fasores de tensão de fase em componentes simétricas.



Fonte: (GLOVER, 2008)

Uma consequência bastante útil desse método é a possibilidade de se calcular a corrente do condutor neutro utilizando apenas as componentes de sequência. Sabendo que em sistemas trifásicos a 4 fios, a soma das correntes de linha é igual à corrente de retorno  $I_n$  pelo neutro. Da mesma forma, em sistemas trifásicos a 3 fios com ligação estrela aterrada, a soma das correntes de linha é igual à corrente de retorno  $I_n$  pela terra. Para ambas as situações temos:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (30)$$

Da equação (24), sabemos que:

$$I_a^0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (31)$$

Substituindo a equação (28) na (29) e fazendo uma manipulação matemática, pode-se encontrar uma relação entre a corrente do neutro em termos de componentes simétricas, ou seja:

$$I_n = 3 I_a^0 \quad (32)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será mostrado o projeto, no qual o presente trabalho está inserido, como os dados são medidos e guardados em um servidor externo, a maneira utilizada para separar os dados e quais programas usados no processamento, assim como a metodologia para tal.

#### 3.1 PROJETO SCIKE PARAÍBA

O presente trabalho é um dos frutos do projeto maior SCIKE Paraíba (SCIKE PARAÍBA, 2018). Neste projeto há uma parceria entre empresas alemãs ligadas ao convênio SCIKE, a UFCG, a Prefeitura Universitária da UFCG e a UFPB, visando desenvolver uma tecnologia com o objetivo de monitorar, quantificar e reduzir o consumo de energia elétrica.

Desenvolveu-se no projeto um medidor de energia elétrica apto a mensurar parâmetros da rede elétrica ao qual estiver ligado. Inicialmente era medido a potência ativa, potência reativa e fator de potência. Para este presente trabalho, o medidor passou a enviar também a tensão e corrente eficaz de um medidor.

Para propor melhorias ao consumo de energia elétrica, o objetivo do projeto é instalar um medidor em cada prédio da UFCG, de modo a saber o seu consumo e em conjunto com a Prefeitura Universitária da UFCG, analisar maneiras para otimizar o consumo, além de auxiliar a equipe de manutenção da universidade na realização de suas atividades. Hoje, devido a parceria com UFPB, há um medidor instalado no *campus* IV, com o mesmo objetivo.

#### 3.2 MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA

O medidor utilizado no projeto é composto de 4 partes: uma placa de aquisição de dados, um Arduino Uno, um módulo de WiFi ESP8266 e um Disjuntor Diferencial Residual (DR). Cada um dos componentes desempenha um papel essencial para o bom funcionamento do medidor. Uma foto do medidor instalado no Prédio LabMET, da Universidade Federal de Campina Grande, *campus* de Campina Grande, pode ser vista na Figura 5.

Figura 5: Medidor de energia elétrica feito pelo projeto scike Paraíba.

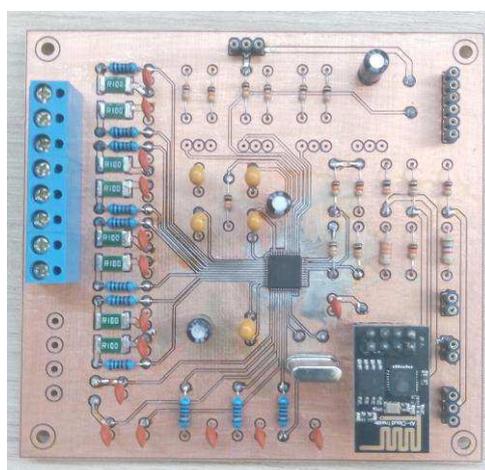


Fonte: (Própria Autora)

### 3.2.1 PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O medidor da Figura 5 usa uma placa de montagem capaz de mensurar a tensão eficaz e seu ângulo, a corrente e seu ângulo e o fator de potência de cada uma das três fases de um sistema trifásico. O chip responsável por esses cálculos é o Atmel M90E36A. Para medir a corrente, transformadores de corrente, de acordo com a bitola do conjunto de fios a ser medido, foram utilizados. Na Figura 6 é mostrada uma imagem da placa de aquisição de dados, desenvolvida e montada por pessoas responsáveis por estas funções dentro do projeto, antes de ser instalada em um dos medidores do projeto Scike Paraíba, em conjunto com o módulo ESP8266.

Figura 6: Placa de aquisição de dados utilizando o Atmel m90e36a e o esp8266.



Fonte: (Própria Autora)

### 3.2.2 ARDUINO UNO

Dentre os modelos da plataforma Arduino, os quais utilizam um microcontrolador da família Atmel, são capazes de controlar pinos de entrada e saída, seja para receber ou enviar sinais analógicos e digitais, entre outras funções; o tipo de Arduino usado no medidor é o Arduino Uno, o qual possui o chip ATMEGA328.

O papel do Arduino Uno dentro do medidor de energia elétrica é de calcular os valores médios da potência ativa, potência reativa, do fator de potência, valor eficaz da tensão e o valor eficaz da corrente de cada fase por 1 minuto antes de enviá-los para o módulo WiFi ESP8266, de modo que as leituras recebidas pelo ESP8266 sejam uma média de cada parâmetro por minuto. Um dos modelos de Arduino Uno disponíveis para venda e utilizados nos medidores de energia pode ser encontrado na Figura 7.

Figura 7: Exemplo de Arduino Uno disponível no mercado.



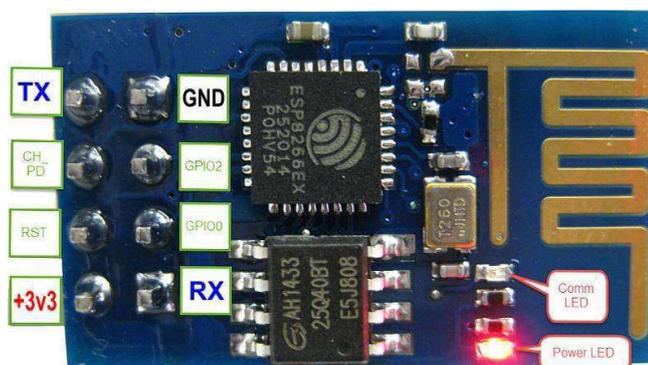
Fonte: (ARDUINO, 2018)

### 3.2.3 MÓDULO WiFi ESP8266

O ESP8266 é responsável por soluções em redes sem fio altamente integradas para atender usuários que possuem demandas contínuas para uso eficiente de energia elétrica, possuindo um tamanho compacto e desempenho confiável (ESP8266EX, 2018). O módulo usado no projeto foi o ESP-01. A função deste componente é receber os dados enviados pelo Arduino Uno e enviá-lo, utilizando a rede interna da UFCG, para um servidor, o qual pode ser acessado de locais fora do *campus* de Campina Grande. O propósito do servidor é armazenar os dados processados pelo medidor de energia elétrica do projeto SCIKE Paraíba.

Da mesma forma que os dados do Arduino Uno, os dados do ESP8266 são enviados a cada minuto para o servidor, no momento em que este recebe as informações do Arduino. Uma ilustração de um dos componentes disponíveis no mercado é mostrada na Figura 8.

Figura 8: Exemplo do módulo WiFi ESP8266.



Fonte: (ELECTROSCHEMATICS, 2018)

#### 3.2.4 DISJUNTOR DIFERENCIAL RESIDUAL

Também conhecido como DR, é um dispositivo responsável por cessar a corrente elétrica em caso de fuga de corrente, geralmente da ordem de 30 mA ou superiores, normalmente ocasionadas em casos de choque elétrico. Sua função no medidor é proteger contra descargas elétricas quem estiver manuseando qualquer equipamento que compõe o medidor de energia elétrica utilizado no projeto. Um exemplo de DR tetrapolar para sistemas trifásicos é visto na Figura 9.

Figura 9: Exemplo de Disjuntor Diferencial Residual tetrapolar.

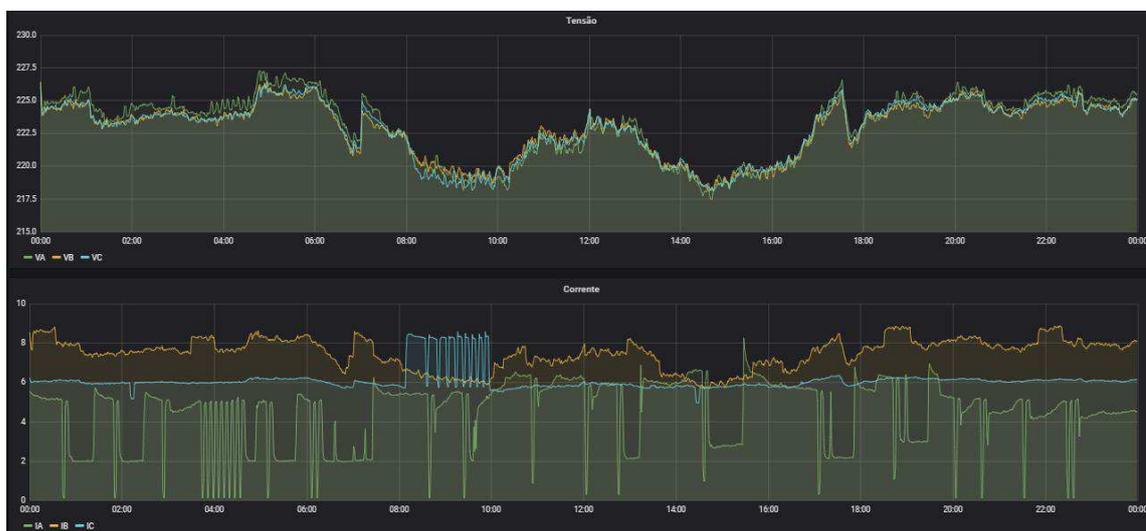


Fonte: (SIEMENS, 2018)

### 3.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados enviados pela rede são recebidos pelo servidor, o qual salva as informações em um arquivo de extensão csv, onde este é atualizado a cada minuto, onde a cada minuto é enviada ao servidor a média das várias medições feitas no período de 60 segundos. Para a potência ativa, potência reativa, fator de potência, tensão eficaz e corrente eficaz há um arquivo cvs, onde neste é gravado o valor da variável em questão de cada fase, juntamente com a data e horário que a informação foi recebida. É possível ver os gráficos das medições de corrente e tensão de um medidor do dia 20 de novembro de 2018, através da plataforma Grafana, mostrada na Figura 10.

Figura 10: Dados de corrente e tensão trifásicos enviados pelo medidor para a plataforma Grafana.



Fonte: (Própria Autora)

Para o processamento dos dados foram usados dois programas: o Microsoft Excel 2016 e o Matlab na versão 2016a. O Microsoft Office Excel foi utilizado para organizar os dados de modo a facilitar o uso dos mesmos no Matlab, onde algumas medições incompletas foram descartadas e as demais foram normalizadas em fasores para o cálculo das componentes simétricas. As medições incompletas foram mínimas comparadas com o total e não comprometem a veracidade do trabalho.

O Matlab foi o *software* responsável por calcular as componentes de sequência da corrente e tensão enviados pelo medidor, utilizando as equações (22) e (25), respectivamente. Após essa etapa, os resultados obtidos foram novamente passados para o Microsoft Office Excel, onde foram calculadas as energias ativas resultantes da corrente de neutro e da potência

consumida do prédio mostrada no medidor, os gráficos e tabelas apresentados nos resultados também foram produzidos no Microsoft Excel.

### 3.4 METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INTERESSE

Para o cálculo das componentes simétricas de tensão, como o medidor não mostra os ângulos instantâneos da tensão, foi utilizada uma aproximação. Utilizando um qualímetro foram feitas medições e verificou-se que a sequência de fases do prédio onde o medidor teste estava instalado era negativa, os ângulos da tensão poderiam ser considerados estáveis. Dessa forma, os módulos da tensão enviados pelo medidor foram utilizados e os ângulos utilizados para as fases A, B e C foram, respectivamente,  $0^\circ$ ,  $-240^\circ$  e  $-120^\circ$ . Assim a equação (27), torna-se:

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |V_a| \angle 0^\circ \\ |V_b| \angle -240^\circ \\ |V_c| \angle -120^\circ \end{bmatrix} \quad (33)$$

Para calcular as componentes simétricas da corrente, também foi utilizada uma aproximação pois, semelhantemente ao caso da tensão, o medidor não mensurava os ângulos instantâneos da corrente. Sabendo que o ângulo do fator de potência é dado pela diferença entre o ângulo da tensão eficaz e da corrente eficaz, foi calculado o ângulo a cada minuto do fator de potência de cada fase segundo a equação (9). Assim, para encontrar o ângulo da corrente de cada fase foi utilizado a diferença entre o ângulo de tensão adotado na equação (28) e o ângulo encontrado pela equação (9). O módulo da corrente eficaz enviado pelo medidor foi utilizado e a equação (24) transformou-se em:

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |I_a| \angle (0^\circ - \Phi_{fpa}) \\ |I_b| \angle (-240^\circ - \Phi_{fpb}) \\ |I_c| \angle (-120^\circ - \Phi_{fpc}) \end{bmatrix} \quad (34)$$

Essas aproximações não interferem na veracidade dos resultados obtidos, pois o peso do módulo da tensão e do módulo da corrente possuem peso maior que seus respectivos ângulos; além disto, as aproximações retratam bem a realidade observada.

Para o cálculo da energia ativa, dada em kWh, foi calculado o valor médio da potência ativa de cada hora, durante o período de 30 minutos de uma determinada hora até o minuto 29

da hora seguinte, totalizando 60 minutos ou uma hora. Não foi utilizado o intervalo usual de 0 até o minuto 59 de uma determinada hora pois a concessionária de energia local, utiliza para o cálculo do consumo em horário de ponta de 17h30 até às 20h30 (ENERGISA, 2018). Dessa forma, procurou-se adequar este trabalho a este fato.

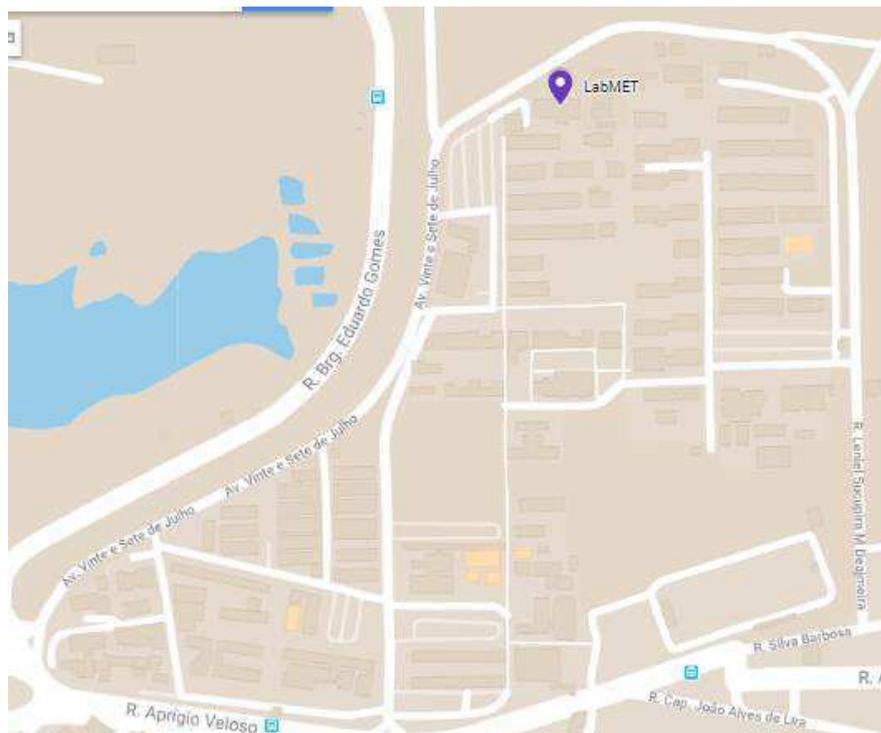
## 4 RESULTADOS

Nesta seção são explicados os resultados obtidos ao se empregar os materiais e métodos descritos nas bases de dados do projeto, usadas de forma a se estimar a corrente do condutor neutro e quais implicações isso traz para o sistema elétrico.

### 4.1 PRÉDIO LABMET

O LabMET, localizado no *campus* de Campina Grande – PB, foi escolhido como prédio teste para este trabalho. Ele situa-se ao norte da UFCG, ele abriga alguns laboratórios de meteorologia, salas de computadores, um auditório, salas para estudos e salas para professores e salas para os técnicos. Sua localização pode ser vista na Figura 11.

Figura 11: Mapa da UFCG, *campus* de Campina Grande – PB, com destaque para o Prédio LabMET.



Fonte: (Própria Autora)

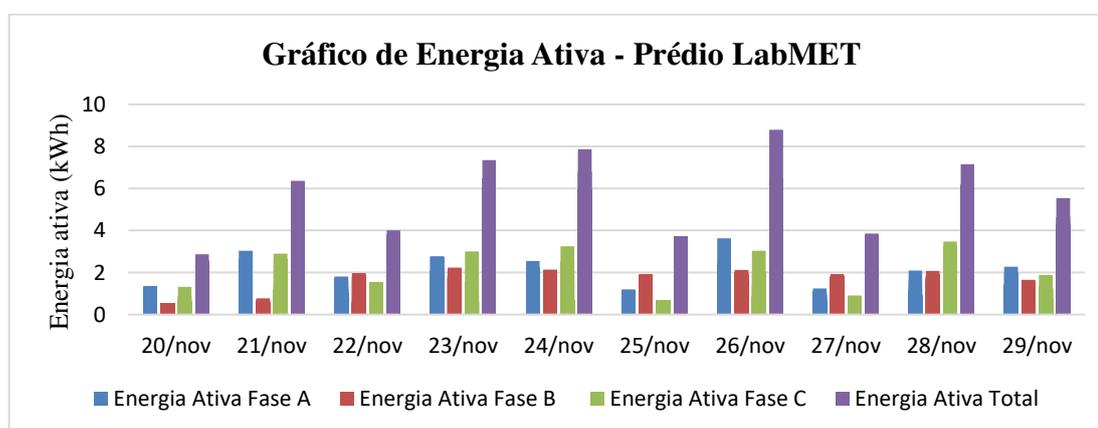
As cargas desse prédio são formadas, em sua maioria, por computadores, aparelhos condicionadores de ar, iluminação e alguns equipamentos específicos de cada laboratório. Com esses tipos de cargas, o prédio possui um perfil de consumo de energia ativa e energia reativa próprio, mostrado mais adiante. Além do consumo de potência ativa e potência reativa, a distribuição das correntes nas fases A, B e C, raramente é regular, ocasionando uma corrente pelo condutor neutro, a qual foi objetivo deste trabalho.

Devido a alguns problemas técnicos, como ajustar o medidor para enviar os dados de tensão e corrente, encontrar os ângulos respectivos e outras considerações, não foi possível ter um espectro muito grande de amostras, porém foram coletados dados dos dias 19 de novembro de 2018 às 11h48 até às 23h59 do dia 30 de novembro de 2018, onde ajustou-se os dados de modo a ter banco de dados de 10 dias começando das 23h30 do dia 19 até às 23h30 do dia 29, para atender o intervalo que a concessionária de energia faz o cálculo da energia ativa e reativa. Durante o período adotado para amostragem dos dados, foram coletadas 14.380 medições das 14.400 esperadas, representando um erro de aproximadamente 0,14% de dados não contabilizados, devido a falhas na rede. Esse percentual de erro tão pequeno não prejudicou o resultado obtido neste trabalho.

#### 4.1.1 CONSUMO DE ENERGIA ATIVA – PRÉDIO LABMET

Ao se calcular quanto o prédio LabMET consome potência ativa do sistema, utilizando o método já descrito, foi possível identificar o consumo em kWh em cada uma das três fases, bem como o consumo total do prédio, no período de 10 dias. Na figura 12 é apresentado o consumo médio por dia de cada fase e o total, em função dos dias de estudo.

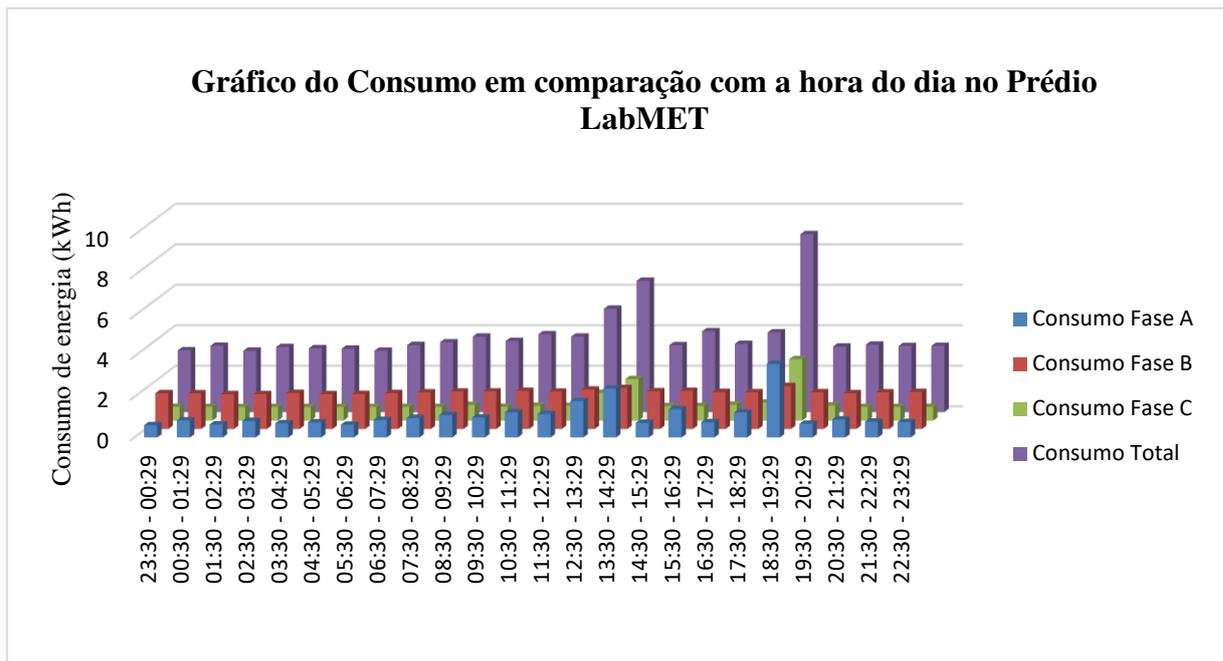
Figura 12: Consumo de Energia Ativa em função dos dias.



Fonte: (Própria Autora)

Com os dados utilizados para a construção do gráfico da Figura 12 também é possível mostrar a energia ativa média a cada hora, de modo a identificar quais os intervalos de horas do dia em que há maior consumo. Em 26 de novembro de 2018 obteve-se uma maior demanda e o detalhamento deste consumo a cada hora é visto na Figura 13.

Figura 13: Consumo de Energia Ativa médio para cada hora de consumo.



Fonte: (Própria Autora)

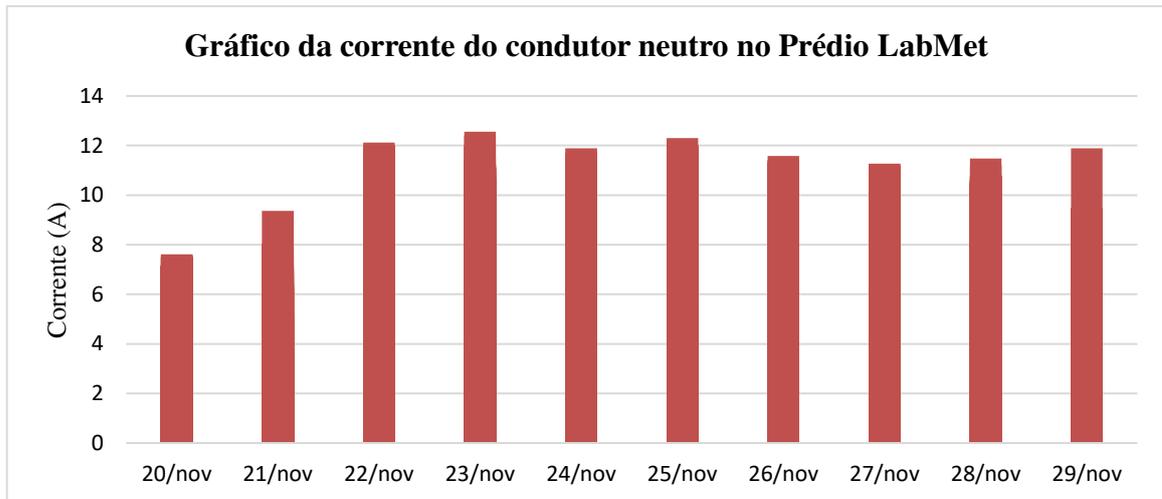
Analisando o gráfico da Figura 13, pode-se perceber que o maior consumo do dia foi no intervalo de 18h30 às 19h29, onde coincidentemente, as três fases também apresentaram seu maior pico de energia ativa. Uma razão para isto pode ser o horário final do expediente.

## 4.2 CORRENTE DO CONDUTOR NEUTRO

Utilizando a técnica de componentes simétricas descrita nos materiais e métodos e se aplicando a equação (30), foi possível encontrar o módulo e a fase da corrente do neutro. Para aplicações práticas, o mais importante é o módulo da mesma, pois está mais intimamente ligado a capacidade de corrente de um fio.

Para se ter uma ideia da sua amplitude, foi feito um gráfico do seu módulo médio em função dos dias de amostragem utilizados, conforme é mostrado na Figura 14.

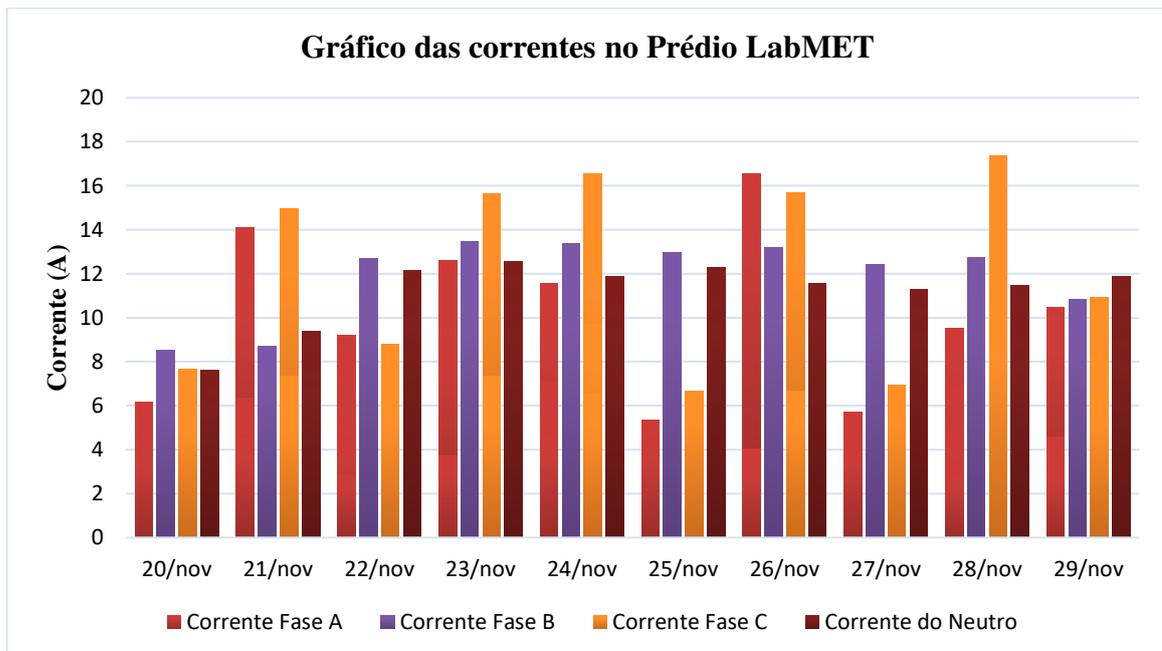
Figura 14: Módulo da corrente média do fio neutro em função dos dias.



Fonte: (Própria Autora)

Para se ter uma ideia do valor da corrente obtida na Figura 14 em relação as correntes das fases A, B e C do prédio teste, outro gráfico foi gerado onde é possível ver os valores absolutos das correntes trifásicas e a do neutro obtida neste trabalho, como mostrado no gráfico a seguir.

Figura 15: Módulos das correntes médias em função dos dias.

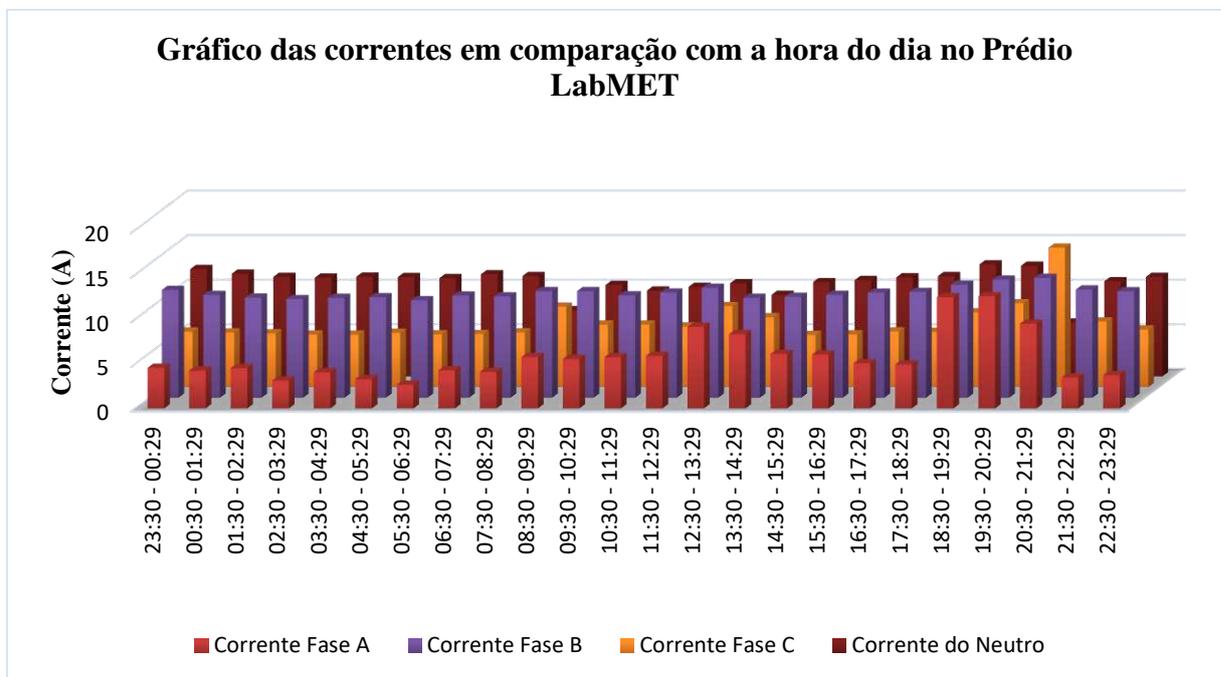


Fonte: (Própria Autora)

Observando a Figura 15, percebe-se que a corrente de maior pico ocorre na fase C, no dia 28 de novembro, já a corrente do neutro tem seu maior pico no dia 23 de novembro e em

nenhum momento a corrente do condutor neutro ultrapassa o valor da corrente de fase C. Este é um dado interessante pois, caso a corrente do neutro tivesse um módulo muito maior que as correntes das fases poderia significar algum problema estranho no prédio, como uma corrente de fuga que não deveria existir e este fato ter um impacto na conta de energia elétrica, ou dependendo do caso, danificar algum equipamento conectado à rede elétrica. Na Figura 16 é mostrado o valor médio das correntes a cada hora, com os mesmos intervalos utilizados no cálculo da energia ativa, para o dia em que ocorreu o maior pico de corrente do condutor neutro, ou seja, dia 23 de novembro.

Figura 16: Módulos das correntes médias para cada hora de consumo.



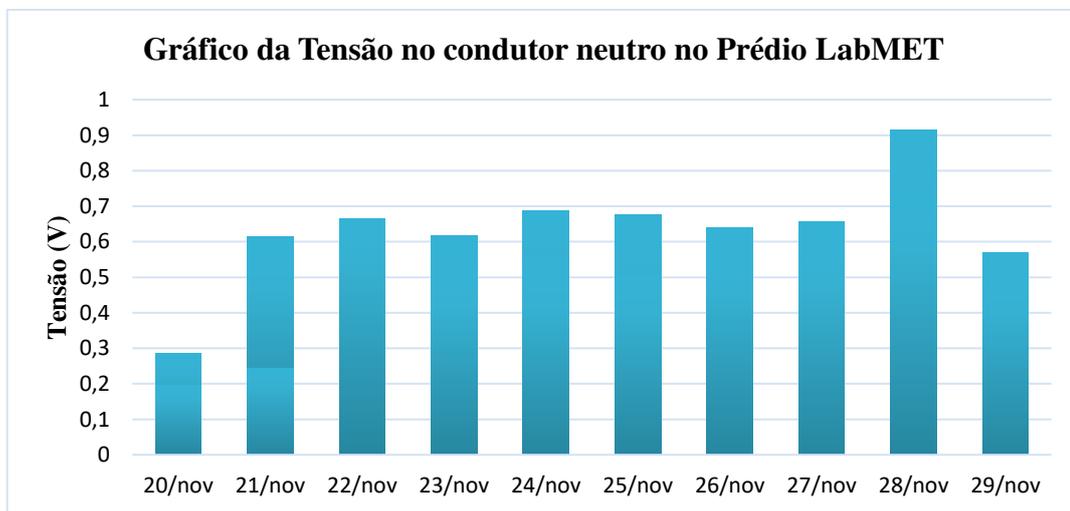
Fonte: (Própria Autora)

Analisando a Figura 16, percebe-se que o intervalo onde temos o maior pico de corrente no neutro é das 18h30 às 19h29, e o menor pico de corrente do neutro ocorre no intervalo entre 20h30 e 21h29, justamente onde o maior pico de corrente entre todos os tipos de amostras, na fase ocorre. Esses resultados são interessantes porque mostram que a corrente do condutor neutro é maior quanto maior for o desequilíbrio entre os fasores de corrente do sistema, no intervalo de 20h30 às 21h29, os módulos das correntes de fase foram altos, mas estavam mais próximos de um sistema equilibrado trifásico e isto foi refletido numa menor corrente no neutro.

### 4.3 ENERGIA ATIVA DO CONDUTOR NEUTRO

Um dos intuitos deste trabalho é ter uma ideia de quanta potência do fio neutro está sendo tarifada na conta de energia, devido ao prazo de amostragem não foi possível fazer isso de modo a comparar para um mês inteiro, mas já é um norte neste sentido. Para calcular a energia ativa em kWh seria necessário a tensão ou a impedância do neutro, a impedância depende do comprimento fio e é um dado difícil de conseguir, já a tensão do neutro foi conseguida utilizando a componente de sequência zero da equação (25), da teoria de Fortescue. Na Figura 17 é mostrado o valor médio dessa tensão em função dos dias.

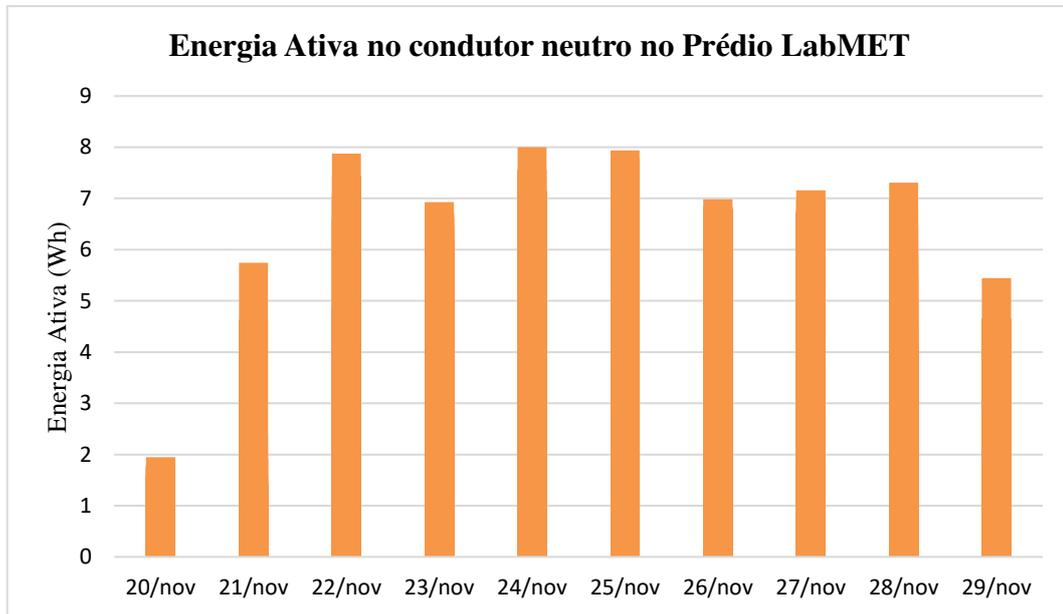
Figura 17: Tensão média no condutor neutro em função dos dias.



Fonte: (Própria Autora)

Observando a Figura 17, percebe-se que o maior valor da tensão no neutro é pouco maior que 0,8 volts. Como os valores desta tensão foram pequenos, o que indica que as correntes nas três fases podem ser consideradas equilibradas, para o cálculo da energia ativa do condutor neutro foi utilizado apenas o valor absoluto de  $V_n$ , mostrado do gráfico, desconsiderando-se a fase e quanto a corrente do neutro, por motivos já explicados, também só foi considerado o módulo da mesma. Essa aproximação foi feita para se obter o maior valor possível e, posteriormente, se comparar com o consumo ativo já exemplificado, de modo a cobrir o problema de não ser possível calcular o ângulo instantâneo para os fasores de tensão e corrente trifásicos. Na Figura 18 é exibido o resultado desta energia ativa, em Wh, da energia ativa proveniente do fio neutro. O uso da unidade Wh, em vez de kWh, justifica-se pelo fato de os valores serem pequenos quando comparados aos múltiplos de mil.

Figura 18: Energia ativa do condutor neutro em função dos dias.



Fonte: (Própria Autora)

#### 4.4 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS

Para analisar e visualizar melhor os gráficos obtidos na seção dos resultados, foram construídas tabelas, nas quais são apresentados os valores médios dos parâmetros e a razão destes comparados com o condutor neutro.

##### 4.4.1 QUANTITATIVO DAS CORRENTES

Nesta parte serão quantificados o estudo feito na Seção 4.2 deste trabalho. Na Tabela 1 são exibidos os valores absolutos das correntes médias em função do dia e em destaque, a razão entre a corrente do neutro e maior corrente do dia, para se ter uma ideia da porcentagem das mesmas. Na Tabela 2 é apresentado o quantitativo em comparação com a hora para o dia 28 de novembro de 2018, dia onde se obteve o maior pico de corrente registrado no trabalho. As células em destaque, das Tabelas 1 e 2, são as utilizadas para fazer a razão entre a corrente do neutro e a corrente de maior módulo, a cada período observado.

Tabela 1: Módulo das correntes em função do dia no Prédio LabMET.

Dias	I <sub>A</sub> (A)	I <sub>B</sub> (A)	I <sub>C</sub> (A)	I <sub>N</sub> (A)	Razão entre I <sub>N</sub> e a maior corrente (%)
20/nov	4,40741	7,484201	6,112514	6,463299	86,35924
21/nov	5,396623	7,430673	6,95803	6,567943	88,38961
22/nov	5,658396	8,231785	6,437681	7,490354	90,99307
23/nov	5,770549	11,75583	7,177214	10,57937	89,99249
24/nov	4,969848	12,01494	7,379928	10,61855	88,3779
25/nov	3,974854	12,18642	6,442618	11,4493	93,95136
26/nov	5,046115	11,83968	7,06521	10,60042	89,533
27/nov	4,01486	11,53164	6,29138	10,61809	92,07796
28/nov	3,942415	11,65764	9,545987	9,24263	79,28392
29/nov	4,309327	9,832736	7,080429	8,613642	87,60167

Fonte: (Própria Autora)

Tabela 2: Módulo das correntes médias, no dia 28 de novembro, em comparação com a hora no prédio LabMET.

Horário	I <sub>A</sub> (A)	I <sub>B</sub> (A)	I <sub>C</sub> (A)	I <sub>N</sub> (A)	Razão entre I <sub>N</sub> e a maior corrente (%)
23h30 - 00h29	4,307833333	11,47066667	6,296	10,58341	92,26499
00h30 - 01h29	3,049333333	11,2775	6,22	10,491005	93,02598
01h30 - 02h29	3,206	11,40833333	6,103333333	10,658055	93,42342
02h30 - 03h29	3,079666667	10,95633333	6,099666667	10,25146	93,56652
03h30 - 04h29	3,020166667	10,99166667	6,113666667	10,27628	93,49155
04h30 - 05h29	3,258166667	11,5315	6,2095	10,76434	93,34727
05h30 - 06h29	3,039	11,623	6,204333333	10,79611	92,88574
06h30 - 07h29	3,149666667	9,434833333	6,202333333	8,15901	86,47752
07h30 - 08h29	3,528666667	11,3475	6,369	10,441145	92,01273
08h30 - 09h29	3,4655	11,53766667	6,444666667	11,19156	97,0002
09h30 - 10h29	3,673333333	11,53766667	6,320166667	10,577405	91,67716
10h30 - 11h29	4,562833333	11,6385	6,479833333	10,309865	88,58414
11h30 - 12h29	4,019333333	12,74266667	6,670833333	11,47555	90,05611
12h30 - 13h29	9,529166667	12,49	11,95016667	8,81015	70,53763
13h30 - 14h29	7,214	12,49783333	17,35566667	6,24286	35,97015
14h30 - 15h29	3,43440678	11,95288136	16,37525424	7,7229	47,16202
15h30 - 16h29	5,330877193	11,5177193	16,09859649	5,570205263	34,60056
16h30 - 17h29	3,986666667	11,84483333	15,495	7,035225	45,40319
17h30 - 18h29	3,708166667	12,1355	13,33833333	7,773255	58,27756
18h30 - 19h29	3,312666667	11,99933333	12,53816667	8,375995	66,80399
19h30 - 20h29	4,409	12,172	11,236	8,2836	68,05455
20h30 - 21h29	3,4735	12,21916667	10,30716667	9,260035	75,78287
21h30 - 22h29	3,133	12,39183333	10,06733333	9,722995	78,46293
22h30 - 23h29	2,9775	12,17966667	10,1075	9,53378	78,2762

Fonte: (Própria Autora)

Sendo  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , e  $I_N$ , respectivamente, as correntes nas fases A, B, C e neutro. Averiguando as Tabelas 1 e 2, é possível perceber que em nenhum momento a corrente do neutro ultrapassa o valor da maior corrente observada no dia ou em um intervalo do dia. Um resultado interessante ocorre na Tabela 2, onde das 13h30 às 14h29, na fase C temos uma corrente média de aproximadamente 17,356 A e corrente do neutro é a menor registrada durante o dia, com módulo de 6,243 A, corroborando o fato que o valor da corrente do neutro depende do equilíbrio entre as fases do sistema e não apenas dos valores das mesmas.

#### 4.4.2 QUANTITATIVO DA ENERGIA ATIVA

Este tópico abordará uma análise quantitativa do estudo levantado na Seção 4.3 deste trabalho. Para isto, foram criadas tabelas relacionando o impacto da energia ativa proveniente do condutor neutro em relação com as obtidas por meio dos dados enviados pelo medidor de energia elétrica do projeto SCIKE Paraíba. Na Tabela 3 é mostrada a média de todas as energias ativas calculadas na Seção 4.3 e na Tabela 4 são apresentados os valores das porcentagens da energia do neutro em relação com as demais.

Tabela 3: Energias Ativas médias em função do dia no Prédio LabMET.

<b>Dia</b>	<b>Fase A (kWh)</b>	<b>Fase B (kWh)</b>	<b>Fase C (kWh)</b>	<b>Total (kWh)</b>	<b>Neutro (kWh)</b>
<b>20/nov</b>	0,963464194	0,506240014	0,618617236	2,088321444	0,00120664
<b>21/nov</b>	1,178994064	0,529204573	0,852960822	2,561159459	0,001554208
<b>22/nov</b>	1,19315859	0,896948424	0,742741222	2,832848236	0,002971722
<b>23/nov</b>	1,262949287	1,866478995	0,917956977	4,047385258	0,00547978
<b>24/nov</b>	1,094938548	1,838672526	0,947387723	3,880998796	0,005938265
<b>25/nov</b>	0,881300153	1,789753285	0,676809549	3,347862986	0,006664936
<b>26/nov</b>	1,104785416	1,831229186	0,885438969	3,821453571	0,005538559
<b>27/nov</b>	0,87818427	1,774128465	0,709731262	3,362043996	0,00562611
<b>28/nov</b>	0,864185907	1,7474482	1,510624925	4,122259032	0,005574052
<b>29/nov</b>	0,938278723	1,368312103	0,92362563	3,230216455	0,003722148

Fonte: (Própria Autora)

Tabela 4: Razão entre a Energia Ativa do neutro com as demais, em função do dia, no Prédio LabMET.

<b>Dia</b>	<b>Razão (Neutro/Fase A) (%)</b>	<b>Razão (Neutro/Fase A) (%)</b>	<b>Razão (Neutro/Fase A) (%)</b>	<b>Razão (Neutro/Total) (%)</b>
<b>20/nov</b>	0,12523978	0,23835343	0,19505445	0,0577804
<b>21/nov</b>	0,1318249	0,29368752	0,18221327	0,06068376
<b>22/nov</b>	0,24906341	0,33131465	0,40010187	0,10490225
<b>23/nov</b>	0,43388761	0,29358918	0,59695395	0,13539063
<b>24/nov</b>	0,54233775	0,3229648	0,62680409	0,15300868
<b>25/nov</b>	0,75626178	0,37239413	0,98475801	0,19908032
<b>26/nov</b>	0,50132438	0,30245033	0,62551557	0,1449333
<b>27/nov</b>	0,64065253	0,31711963	0,79270986	0,16734194
<b>28/nov</b>	0,64500613	0,31898239	0,36898981	0,13521839
<b>29/nov</b>	0,39669956	0,27202475	0,40299311	0,11522905

Fonte: (Própria Autora)

Observando as Tabelas 3 e 4, pode-se notar que a energia ativa do neutro tem uma contribuição mínima em relação com todas as outras energias ativas, podendo ser desprezada. Esse fato é positivo pois, do contrário, indicaria que haveria algum problema com sistema elétrico do Prédio LabMET e um custo considerável poderia ser cobrado pela concessionária.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer do curso de engenharia elétrica foi possível adquirir conhecimentos para realizar esse trabalho, sobretudo nas disciplinas de Sistemas Elétricos e Instalações Elétricas, elas são básicas da graduação e abordaram a maioria dos conceitos aqui tratados.

Ao longo deste trabalho foi possível reunir várias informações importantes sobre o sistema elétrico do prédio em estudo e buscar entender o seu significado, tais como o comportamento da potência ativa e reativa, o fator de potências, as correntes e tensões. De posse destas, foi possível utilizar o método das componentes simétricas e avaliar a corrente e tensão do condutor neutro, bem como sua energia ativa.

Foi apresentado que este trabalho de conclusão de curso está inserido em um projeto maior, o SCIKE Paraíba, o qual busca maneiras para melhorar a eficiência de energia elétrica na UFCG e também reduzir custos desnecessários, por meio de um medidor de inteligente capaz de mensurar os parâmetros de interesse em tempo real e guardá-los em um servidor externo.

Após o cálculo da corrente e tensão do condutor neutro, ficou constatado que a corrente apesar de possuir um valor considerável, a tensão é baixa, inferior a 1V. Isso implica que o sistema elétrico do Prédio LabMET está funcionando como deveria e os custos relativos a esse pequeno desbalanceamento são mínimos em relação ao todo.

Como propostas para futuros trabalhos estão: refazer o estudo aqui apresentado em outro lugar, com um período de amostragem maior e fazer uma correlação com a energia reativa e se possível com a demanda do objeto teste, pois em outros prédios dentro da UFCG pode haver um consumo bem diferente do observado neste trabalho e pode ser fruto de algum problema nas instalações internas.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Programa de Eficiência Energética. Agencia Nacional de Energia Elétrica.** 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica/> Acesso em: 20 nov. 2018.
- ANEEL, **Resolução Normativa N° 414**, de 9 de setembro de 2010.
- ARDUINO, **Arduino Uno Rev3**. Disponível em: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. Acesso em 28/julho/2018.
- ATMEL. **Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC, Datasheet**. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-46004-SE-M90E36ADatasheet.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2018.
- CHAGAS, F. F. G., **Circuitos Elétricos II: Notas de Aula**, 2012. 156 f. Notas de Aula. Arquivo digital.
- ENERGISA, **Tarifa Branca**. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/sua-conta/tarifa-branca.aspx> Acesso em: 22 nov. 2018.
- ESP. **ESP8266EX Datasheet**. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf). Acesso em: 22 nov. 2018.
- FORTESCUE, C. L. **Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks**. In: CONVENCION OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERES (AIEE), 34., 1918 [S.1.]. AIEE Transactions..., Atlantic City, N. J. USA: AIEE, 1918. V.37.
- GLOVER, J. D., SARMA, M. S., OVERBYE, T. J **Power System Analysis and Design**. 2008. Austrália.
- SAADAT, H. **Power system analisys**. 2. Ed. Boston: McGraw-Hill USA, 2002. 712p. ISBN-13:978-0-07-284796-3.
- SCIKE, **Scike - Software Cluster**. Disponível em: <https://scikepb.dcx.ufpb.br/>. Acesso em: 20 nov. 2018.
- SIEMENS. **Dispositivos DR 5SV, 5SM e 5SU: Proteção contra correntes de fuga à terra em instalações elétricas**. Disponível em: [https://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/Downloadsbt/Documents/Dispositivos%20DR/Cat%C3%A1logo/Cat%C3%A1logo%20DR\\_2016\\_PT.pdf](https://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/Downloadsbt/Documents/Dispositivos%20DR/Cat%C3%A1logo/Cat%C3%A1logo%20DR_2016_PT.pdf). Acesso em: 22 nov. 2018.
- STEVENSON JR., W. D. **Elementos de Análises de sistemas de potência**. 2. Ed. São Paulo: McGraw Hill, 1986.