UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VITOR HUGO BRIZOLA DE LIMA

ANÁLISE DA TENSÃO EM REGIME PERMANENTE APÓS A INSERÇÃO DOS PONTOS DE CARREGAMENTO DE VEICULOS ELÉTRICOS NO ALIMENTADOR DA UFMT

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

VITOR HUGO BRIZOLA DE LIMA

ANÁLISE DA TENSÃO EM REGIME PERMANENTE APÓS A INSERÇÃO DOS PONTOS DE CARREGAMENTO DE VEICULOS ELÉTRICOS NO ALIMENTADOR DA UFMT

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dra. Camila dos Anjos Fantin

CUIABÁ – MT

DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L732a Lima, Vitor Hugo Brizola de.
Análise da tensão em regime permanente após a inserção dos pontos de carregamento de veiculos elétricos no alimentador da UFMT [recurso eletrônico] / Vitor Hugo Brizola de Lima. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 20 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientadora: Camila dos Anjos Fantin.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.
Modo de acesso: World Wide Web: https://bdm.ufmt.br.
Inclui bibliografia.

1. Rede de distribuição; Tensão em regime permanente; Veículos elétricos. I. Fantin, Camila dos Anjos, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.103068/2022-61

Interessado: VITOR HUGO BRIZOLA DE LIMA

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA:

ANÁLISE DA TENSÃO EM REGIME PERMANENTE APÓS A INSERÇÃO DOS PONTOS DE CARREGAMENTO DE VEICULOS ELÉTRICOS NO ALIMENTADOR DA UFMT.

ALUNO: VITOR HUGO BRIZOLA DE LIMA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em EngenhariaElétrica.

Aprovada em 16 de dezembro de

2022.Nota: 9,75

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Camila dos Anjos Fantin

Orientadora

Prof. Dr. Jorge Luiz Brito de Faria

Examinador

Me. Túlio Sérvio José da Silva

Examinador

Documento assinado eletronicamente por **CAMILA DOS ANJOS FANTIN**, **Coordenador(a) de Ensino de Graduação em Engenharia Elétrica - FAET/UFMT**, em 21/12/2022, às 11:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembrode 2020.

Documento assinado eletronicamente por **JORGE LUIZ BRITO DE FARIA** , **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 21/12/2022, às 11:10, conforme horário oficial de Brasília,com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **TULIO SERVIO JOSE DA SILVA** , **Técnico Administrativo em Educação da CEG em Eng. Elétrica / FAET - UFMT**, em 21/12/2022, às 11:11,conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5364241** e o código CRC **29D1A12C**.

Referência: Processo nº 23108.103068/2022-61 SEI nº 5364241

RESUMO

Brizola, V.B.L de. **Análise da tensão em regime permanente após a inserção dos pontos de carregamento de veículos elétricos no alimentador da UFMT**. 2022. 19f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2022.

Com o recente aumento da conscientização ambiental relacionada à emissão de gases de efeito estufa, os Veículos Elétricos (VE) viraram uma ótima alternativa por ser uma opção mais sustentável e convencional com relação ao motor a combustão. Apesar dos veículos elétricos proporcionarem benefícios à sociedade, o crescimento da conexão destes veículos à rede elétrica traz desafios, sobretudo para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, pelo fato de ter diversos impactos que a inserção desses veículos pode acarretar à rede. Portanto, é importante avaliar quais consequências podem acarretar nos sistemas de distribuição, dado que uma penetração massiva de carros elétricos na rede, juntamente com uma recarga não coordenada pode provocar diversos danos ao sistema elétrico. Por consequência disso, nesse trabalho foram realizados estudos que englobam os impactos gerados pela recarga descoordenadas para diferentes níveis de penetração, investigando os principais efeitos negativos na regulação da tensão em regime permanente, por meios de simulações no qual foram inseridos pontos de carregamento de (VE) no sistema elétrico da Universidade federal de Mato Grosso por meio do software OpenDSS. Portanto, com os resultados obtidos foi visto que a medida que ocorreu a penetração dos veículos elétricos a tensão na rede diminui.

Palavras-chave: Rede de distribuição; Tensão em regime permanente; Veículos elétricos.

ABSTRACT

With the recent increase in environmental personalization related to greenhouse gas emissions, electric vehicles (EVs) switch an optimal alternative to a more sustainable and conventional engine option with respect to greenhouse gas emissions. Of vehicles will provide benefits to society, connecting vehicles to the electrical grid bring challenges, especially for electricity distribution concessionaires, because despite the various impacts that the insertion of these vehicles can bring to the electrical grid. Therefore, it is important to assess which ones can lead to running distribution systems, electrical on the grid, which can provide electrical procurement systems, but which can run on different electrical systems by not coordinating several systems. Consequently, this work was carried out that encompass the studies of impacts generated for different levels of recharge, investigating the main effects on the regulation of permanent voltage, through ordered charging simulation points in which charging of (EVs) electrical system of the Federal University of Mato Grosso through the OpenDSS software. Therefore, with the results obtained it was seen that the measurement that occurred the penetration of electric vehicles the voltage in the network decreases.

Keywords: Distribution network; Voltage in steady state; Electric vehicles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Fig. 1. Esquemático do alimentador da Energisa MT que atende a UFMT. 14
Fig. 2. Tensão no ponto de entrada da UFMT. 14
Fig. 3. Demanda de potência ativa ao longo do dia do SD da UFMT 14
Fig. 4. Potência ativa do transformador da FAET 15
Fig. 5. Faixas de tensão crítica, precária e adequada para circuitos da BT. 17
Fig. 6. Tensão sem nenhum carro conectado ao sistema 17
Fig. 7. Tensão com Np 5% dos carros conectados no sistema 17
Fig. 8. Tensão com Np 25% dos carros conectados no sistema 17
Fig. 9. Tensão com Np 50% dos carros conectados no sistema 17
Fig. 10. Tensão com Np 75% dos carros conectados no sistema 17
Fig. 11. Tensão com Np 100% dos carros conectados no sistema 18
Fig. 12. Tensão mais crítica de todos os cenários. 18
Fig. 13. Demanda de potência ativa de todos os cenários ao longo do dia do SD da UFMT. 18
Fig. 14. Comparação dos senários de Potência ativa do transformador da FAET 18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 14
Tabela 2 15
Tabela 3 15

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
GEE	Gases do efeito estufa.
SD	Sistema de distribuição.
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
MCI	Motor a combustão interna.
VE	Veículos elétricos.
CO2	Dióxido de carbono.
OpenDSS	*Open Distribution System Analysis*
SE	Subestação
MT	Média Tensão
BT	Baixa Tensão
SD	Sistema de Distribuição
NLTCs	*No-Load Tap Changer*
RTBTs	Regulador de Tensão de Baixa Tensão
Np	Nível de penetração

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO 12
II. ESTUDO DE CASO 13
A. Simulador OpenDSS 13
B. Modelagem do sistema elétrico da UFMT 13
C. Estratégia e ponto de recarga 14
III. SIMULAÇÕES 14
A. Analise do ponto de entrada da UFMT 14
B. Analise dos transformadores utilizados 15
C. Características elétricas do veículo elétrico 15
D. Modelo de recarga 15
IV. RESULTADOS 16
A. Analise dos impactos 16
B. Tensão em regime permanente 16
C. Carregamento do sistema 18
D. Soluções propostas 19
V. CONCLUSÕES 19

Despacho Folha de Aprovação (5364241) SEI 23108.103068/2022-61 / pg.

ANÁLISE DA TENSÃO EM REGIME PERMANENTE APÓS A INSERÇÃO DOS PONTOS DE CARREGAMENTO DE VEICULOS ELÉTRICOS NO ALIMENTADOR DA UFMT

Vitor Hugo Brizola de Lima
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e tecnologia/ Universidade Federal de Mato Grosso /Departamento de Engenharia Elétrica, Cuiabá – Mato Grosso, vitor_brizola@hotmail.com

Resumo **- Com o recente aumento da conscientização ambiental relacionada à emissão de gases de efeito estufa, os Veículos Elétricos (VE) viraram uma ótima alternativa por ser uma opção mais sustentável e convencional com relação ao motor a combustão. Apesar dos veículos elétricos proporcionarem benefícios à sociedade, o crescimento da conexão destes veículos à rede elétrica traz desafios, sobretudo para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, pelo fato de ter diversos impactos que a inserção desses veículos pode acarretar à rede. Portanto, é importante avaliar quais consequências podem acarretar nos sistemas de distribuição, dado que uma penetração massiva de carros elétricos na rede, juntamente com uma recarga não coordenada pode provocar diversos danos ao sistema elétrico. Por consequência disso, nesse trabalho foram realizados estudos que englobam os impactos gerados pela recarga descoordenadas para diferentes níveis de penetração, investigando os principais efeitos negativos na regulação da tensão em regime permanente, por meios de simulações no qual foram inseridos pontos de carregamento de (VE) no sistema elétrico da Universidade federal de Mato Grosso por meio do software OpenDSS, Portanto, com os resultados obtidos foi visto que a medida que ocorreu a penetração dos veículos elétricos a tensão na rede diminui.**

Palavras-Chave **- Rede de distribuição; Tensão em regime permanente; Veículos elétricos.**

ANALYSIS OF VOLTAGE IN PERMANENT REGIMEAFTER THE INSERTION OF ELETRIC VEHICLE CHARGING POINTS IN UFMT FEEDER

Abstract **- With the recent increase in environmental personalization related to greenhouse gas emissions, electric vehicles (EVs) switch an optimal alternative to a more sustainable and conventional engine option with respect to greenhouse gas emissions. Of vehicles will provide benefits to society, connecting vehicles to the electrical grid bring challenges, especially for electricity distribution concessionaires, because despite the various impacts that the insertion of these vehicles can bring to the electrical grid. Therefore, it is important to assess which ones can lead to running distribution systems, electrical on the grid, which can provide electrical procurement systems, but which can run on different electrical systems by not coordinating several systems. Consequently, this work was carried out that encompass the studies of impacts generated for different levels of recharge, investigating the main effects on the regulation of permanent voltage, through ordered charging simulation points in which charging of (EVs) electrical system of the Federal University of Mato Grosso through the OpenDSS software. Therefore, with the results obtained it was seen that the measurement that occurred the penetration of electric vehicles the voltage in the network decreases.**

Keywords **- Distribution network; Voltage in steady state; Electric vehicles.**

I. INTRODUÇÃO

No decorrer dos últimos anos, vêm sendo adotadas medidas ao redor do mundo para reduzir emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Dessa forma, o setor de transporte tem um papel crítico a desempenhar, visto que o mesmo é responsável atualmente por quase um quarto das emissões globais de CO2, sendo um contribuinte significativo para a poluição do ar e intensificação dos efeitos do aquecimento global [1]. Por esse motivo, devido às políticas de descarbonização, os Veículos Elétricos (VE) estão proliferando-se globalmente em um ritmo acelerado, por serem uma alternativa automotiva mais sustentável às convencionais com Motor de Combustão Interna (MCI) [2]-[3].

A introdução dos VE e futura substituição total da frota movida a combustíveis fósseis já é dada como certa, desse modo, além da vantagem de serem menos nocivos ao meio ambiente, os veículos elétricos apresentam outros benefícios quando comparados aos veículos à combustão interna. O motor elétrico responsável pela propulsão em um VE é aproximadamente 3 vezes mais eficiente que um motor a combustão interna. Os motores elétricos também são extremamente silenciosos, o que traria mais conforto, reduzindo a poluição sonora principalmente no caso de grandes centros urbanos, tornando o ambiente mais agradável. Ademais, o motor de VE tem um torque instantâneo, alcançando uma performance máxima mais rápida quando exigido pelo condutor. Além disso, veículos elétricos apresentam a vantagem de poderem ser carregados na própria residência do proprietário, visto que a fonte de energia para recarregar suas baterias é a eletricidade, sem a necessidade de se mover até um posto de abastecimento, fazendo com que o carro seja apenas mais um produto que o condutor conecta em uma tomada de sua residência[4].

Desse modo, visto que as principais motivações para promover a expansão de VE no mundo concentram-se nas questões ambientais, devido, sobretudo aos compromissos

Despacho Folha de Aprovação (5364241) SEI 23108.103068/2022-61 / pg.

celebrados no Acordo de Paris, alguns países estabeleceram uma data limite para encerrar as vendas de veículos movidos a combustíveis fósseis, sobretudo na Europa, impulsionando ainda mais o mercado de VE. Neste contexto, pode-se citar a Noruega, Dinamarca, Islândia, Irlanda, Países Baixos, Escócia, Eslovênia, Suécia, Reino Unido, França, Portugal, Espanha e Alemanha. No qual a Noruega, por exemplo, espera-se que a partir de 2025 todos os novos veículos classificados como leves, de passeio a comerciais, sejam de zero emissão; no Reino Unido esta meta é para 2035 e na França para 2040 [5]. Inclusive no Brasil, existe um projeto de lei do senado nº 304/2017, que propõe proibir, a partir de 2030, a comercialização, e, a partir de 2040, a circulação de veículos movidos à combustíveis não renováveis, corroborando com este fato [6]-[7].

Por outro lado, uma das principais barreiras à expansão de VE no país é o elevado custo do mesmo, carência de infraestrutura para recarga e de regulamentação adequada. O Brasil não carrega os mesmos impulsos que os demais países para adoção dos VE, como os que adotam políticas mais rígidas contra veículos com MCI [8]. Mesmo possuindo diversas dificuldades o uso de carros elétricos no Brasil está em fase de crescimento e isso ocasiona um aumento significativo na carga, sendo que um dos maiores desafios para inclusão de VE na mobilidade urbana é a implantação da infraestrutura de recarga nas redes de distribuição. Vinculado a essa concepção, o estudo dos impactos causados pelo aumento de carga e inserção de VE em sistema de distribuição é um tema recorrente [3].

Dessa maneira, a introdução do carro elétrico deve ser acompanhada de um estudo não só referente ao carro em si e suas tecnologias, mas também de toda a cadeia necessária para o seu abastecimento, levando em consideração todos os desdobramentos que sua implantação irá exigir da matriz elétrica brasileira e os efeitos causados por esse aumento de demanda [7]. Em vista dos argumentos apresentados, faz-se necessário, portanto, realizar análises que verifiquem se o sistema elétrico será capaz de suportar a presença dos veículos elétricos na rede.

Desta forma, estudo acerca dos impactos ocasionados pela recarga de VE se faz necessário. Avaliar quais impactos essa tecnologia pode acarretar nos SD, dado que uma penetração massiva de VE na rede elétrica juntamente com uma recarga não coordenada pode provocar sobrecarga em cabos e transformadores, aumento das perdas elétricas e problemas na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) [3]. Neste contexto este artigo tem como objetivo realizar análises relacionadas ao impacto da inserção dos VE na rede de distribuição da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), para este fim as simulações para obtenção dos resultados será o *software Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) utilizado para as simulações realizadas relacionadas ao planejamento da distribuição e qualidade de energia [9].

II. ESTUDO DE CASO

O trabalho desenvolvido para este artigo iniciou-se com uma metodologia para realizar estudos preliminares de impactos da penetração de VE no SD da UFMT. Todos os cenários foram simulados para uma série temporal de 24 horas. Conforme estabelecido anteriormente, para o primeiro cenário, nenhum eletroposto residencial é alocado, portanto esse foi considerado o caso base de análise. Os próximos cinco cenários possuem uma penetração de VE de 5%, 25%, 50%, 75% e 100%, respectivamente.

A. Simulador OpenDSS

Para realizar as simulações foi necessária a modelagem dos componentes elétricos da rede e para isso foi utilizado a ferramenta OpenDSS de simulação de circuitos elétricos, onde os elementos do circuito são modelados por sua matriz de admitância nodal (Y) e os cálculos realizados no domínio da frequência. O programa proporciona o estudo de sistemas de distribuição, disponibilizando análises de parâmetros de QEE, fluxo de potência polifásico desbalanceado, inserção de geração distribuída, entre outras análises em regime permanente senoidal, como a inserção de pontos de carregamentos de veículos elétricos que serão abordados. Ademais, a ANEEL sugere a utilização do OpenDSS para o cálculo do fluxo de potência na apuração das perdas técnicas, pois o simulador é desenvolvido em código aberto, sendo isento de custo e podendo ser modificado de acordo com a necessidade do usuário [10]. Nas simulações deste trabalho utiliza-se a versão 8.6.5.3 (64-bits)[11].

B. Modelagem do sistema elétrico da UFMT

A influência da inserção dos pontos de carregamento na rede elétrica de distribuição é avaliada por meio de um estudo de caso que busca aplicar situações hipotéticas de recarga de carros elétricos em um sistema elétrico real e conhecido. Para tanto, buscou-se aproximar o máximo a modelagem da realidade através de dados de medição e modelos comerciais de equipamentos.

Primeiramente, foi utilizado sistema elétrico da UFMT, campus Cuiabá, os quais os autores representaram através de dados do alimentador providos pela concessionária Energisa MT. Assim, se obteve um fator de carregamento dos transformadores do campus de 41,3%, valor o qual foi assumido na modelagem das cargas conectadas a todos os 73 transformadores deste sistema. A partir dos dados de demanda horária foi possível estabelecer uma relação entre as amplitudes máximas da potência ativa e reativa das cargas, na qual a potência reativa corresponderia a 25% do valor da potência ativa da mesma carga. Assim, essas relações foram aplicadas ao esquemático da topologia do sistema de distribuição da UFMT fornecido pela Secretaria de Infraestrutura da universidade, o qual especifica as posições dos transformadores e postes da rede de distribuição, incluindo a potência de cada transformador. Além das cargas dos transformadores de distribuição da UFMT, foram inseridas mais 5 cargas para representar o circuito equivalente dos alimentadores supridos pelo mesmo transformador da subestação da Energisa MT em que a universidade está conectada, conforme a figura1[12].

Despacho Folha de Aprovação (5364241) SEI 23108.103068/2022-61 / pg.

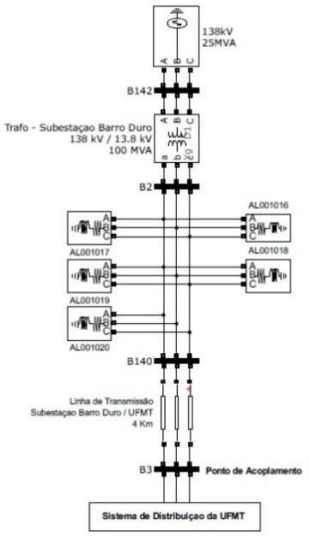

Fig. 1. Esquemático do alimentador da Energisa MT que atende a UFMT.

Posteriormente, o SD da UFMT completo modelado possui 341 barras ao longo de 9370 m de linha, sendo 5413 m dentro do campus. A rede aérea a quatro fios com tensão de linha igual a 13,8 kV sai do secundário do transformador de força da SE da barra AA até a barra P55 onde se encontra a cabine de medição e proteção da UFMT. Não há reguladores de tensão ou banco de capacitores no percurso da linha por ser um alimentador urbano de pequeno porte, assim não apresenta perdas consideráveis nos condutores. Os 73 transformadores de distribuição são trifásicos e têm cargas desbalanceadas conectadas[13].

C. Estratégia e ponto de recarga

A estratégia de recarga adotada foi referente aos horários das aulas de cada departamento da UFMT e a dimensão de seus estacionamentos, foi considerado que os VE começaram a recarregar imediatamente ao serem conectados na rede elétrica. Desse modo, foram considerados pontos de recarga individuais, ou seja, eletropostos localizados exclusivamente nas áreas dos estacionamentos de cada bloco. Ademais, considerou-se que o operador da rede de distribuição não tem controle sobre a localização dos pontos de recarga de VE e nenhum controle direto sobre a duração e a frequência de recarga do mesmo. Assim, os VE foram distribuídos em nove zonas, consequentemente utilizando nove transformadores ilustrado na tabela 1, distribuídos de forma uniforme com base nos níveis de penetração pré-estabelecidos, contendo 30 pontos de carregamentos inseridos em cada um deles e apenas o da PRAE contendo 25 tomadas por ter um espaço no em seu estacionamento reduzido, referente aos demais locas.

Tabela 1
Horário de Carregamento dos Veículos Elétricos

Trafos	08:00	13:00	18:00	Total
DIREIT0	12	6	12	30
SAÚDE	10	10	10	30
FLORESTAL	10	10	10	30
RU	10	10	10	30
FAET	10	10	10	30
PRAE	13	12	0	25
FÍSICA	10	10	10	30
PISCINA	10	10	10	30
TOTAL	95	88	82	265

III. SIMULAÇÕES

A. Analise do ponto de entrada da UFMT

Os dados obtidos antes da inserção dos pontos de carregamento no sistema elétrico da universidade mostram a curva da potência ativa e tensão trifásica do secundário do transformador fictício, Trafo que isola apenas os sistemas elétrico da UFMT, adquirida com a função *Export* do OpenDSS, que exporta os dados do período de 24 horas para um arquivo .csv, é demonstrada na Figura 2.

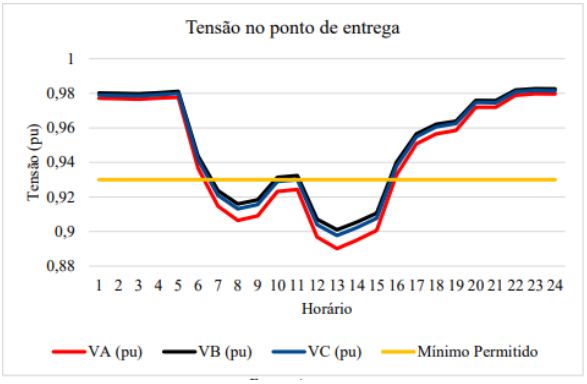

Fig. 2. Tensão no ponto de entrada da UFMT.

Essa tensão diária no ponto de entrada da UFMT atinge 0,89 p.u. no momento de maior demanda. É importante mencionar que aproximadamente 40% do período diário da tensão fornecida pela concessionária no ponto de entrega da UFMT, transgride o valor de tensão mínimo permitido estabelecido pelo PRODIST.

Com base na curva diária de carga do campus, observa-se que a demanda solicitada pelo sistema exibida na Figura 3, varia de 1186 kW (24h) à 4358 kW (13h) e que o valor máximo não excede a demanda contratada (fora de ponta) de 5000 kW [13].

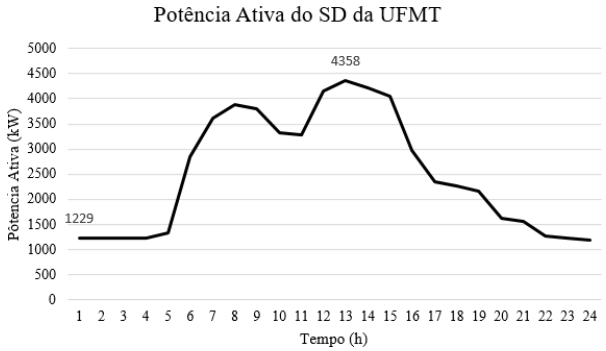

Fig. 3. Demanda de potência ativa ao longo do dia do SD da UFMT

Despacho Folha de Aprovação (5364241) SEI 23108.103068/2022-61 / pg.

B. Analise dos transformadores utilizados

Para o estudo da inserção de pontos de carregamentos de veículos elétricos, serão analisados 9 transformadores de distribuição, com as características resumidas na Tabela 2, como dito anteriormente cada um deles recebendo trinta pontos de carregamento e apenas o Trafo da PRAE com um total de 25 tomadas. O Trafo_45 e Trafo_64 alimentam cargas que demandam mais potência (blocos que funcionam das 7h às 22h), a FAET (Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia) e o IL (Instituto de Linguagens), respectivamente. O Trafo_56 fornece energia a PRAE (Pró-reitora de Assistência Estudantil), carga com perfil comercial com horário de funcionamento das 7h às 18h. desse modo, os demais transformadores selecionados foram utilizados por se localizarem próximos aos estacionamentos, facilitando assim uma instalação dos postos de carregamento.

Tabela 2
Características dos transformadores

Transformador	Carga (Edificação)	Potência Nominal do Transformador (□□□)
Trafo_1	DIREIT0	300
Trafo_7	SAÚDE	225
Trafo_16	FLORESTAL	300
Trafo_40	RU	300
Trafo_45	FAET	500
Trafo_56	PRAE	150
Trafo_64	FÍSICA	300
Trafo_66	PISCINA	225

O transformador Trafo_45 que supre a FAET indica um aumento no fornecimento de potência ativa às 5h da manhã e se mantém significativa durante o dia conforme as aulas no bloco decorrem e volta a diminuir às 15h quando as atividades do bloco são encerradas. Observa-se na Figura 4 um afundamento na demanda no horário do almoço às 10/11h, mas logo em seguida ocorre o pico de potência trifásica às 13h de 156 kW, que representa 31,2% de carregamento no transformador [13].

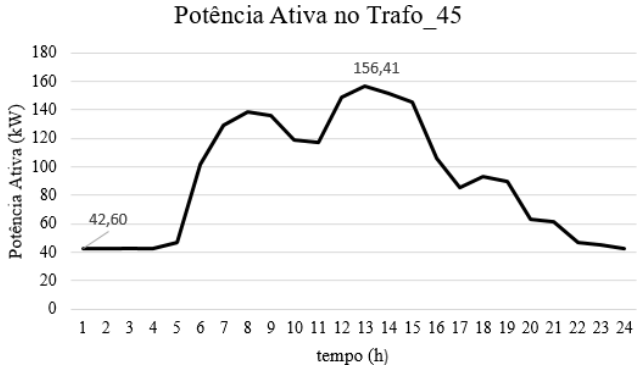

Fig. 4. Potência ativa do transformador da FAET.

C. Características elétricas do veículo elétrico

Nesta pesquisa, as características elétricas dos VE foram extraídas do Nissan Leaf (Nissan, 2020; EV Data-base, 2021), por sua ampla comercialização mundial e por possuir um preço de mercado mais acessível que outros veículos. As principais características do Nissan Leaf encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3

Características	Nissan Leaf
Capacidade da bateria	40 kWh
Capacidade útil da bateria	36 kWh
Autonomia da bateria	240 km[1]
Eficiência	0,164 kWh/km
Máxima potência de recarga	6,6 kW

Portanto, de acordo com o padrão SAE J1772[14] e as características de recarga do Nissan Leaf (Nissan, 2020), foi adotada uma potência de 6,6 kW para recargas bifásicas de nível 2 (fase-fase) em 220 V CA [3].

D. Modelo de recarga

Para análise do carregamento dos VE foram implementados como uma bateria de acordo com o modelo disponível no software OpenDSS e seu funcionamento será explicado a seguir. O elemento "bateria" é projetado para funcionar no OpenDSS tanto como "gerador", fornecendo energia para o sistema, quanto como "carga", consumindo energia do sistema. Para a opção da "bateria" operando como "carga", a quantidade de energia consumida estará dentro da classificação e capacidade de energia. Assim, nesta etapa do trabalho, a "bateria" foi modelada para operar como "carga" de acordo com os dados fornecidos na Tabela 3.

A modelagem do Veículo Elétrico (VE) na metodologia foi por meio do elemento de armazenamento "bateria", "*Storage*" do software OpenDSS. Este elemento é essencialmente um gerador que pode ser utilizado no modo de descarga (fornecendo energia) ou carga (consumindo energia) dentro de sua classificação de potência e sua capacidade de energia armazenada. O mesmo pode atuar de forma independente ou pode ser controlado através de um elemento controlador denominado de "*StorageController*"

Neste trabalho final de curso, o elemento "*Storage*" foi utilizado operando como "carga" para representar a recarga dos VE no Sistema de Distribuição (SD) durante as Simulações do sistema elétrico da UMFT e o mesmo foi controlado através do elemento "*StorageControlle*r". Tanto o elemento "*Storage*" quanto o "*StorageController*" possuem uma variedade de propriedades com diferentes funções, apenas algumas propriedades desses elementos foram utilizadas na modelagem da recarga dos VE e elas serão apresentadas de acordo com o uso específico deste elemento nesta pesquisa, sendo as utilizadas no elemento "*Storage*" [3]:

- *Phases*: número de fases utilizadas na recarga do VE, assim, foram utilizados "*phases*" iguais a 3.
- Bus: O transformador ao qual a bateria está conectada.
- *Kv*: tensão nominal de conexão da bateria no sistema. Para conexões trifásicas, deve-se especificar a tensão fase-fase. Logo, foram utilizados "*kv*" e 0,22 kV.
- *KWrated*: classificação da potência de recarga em kW. Para este caso a potência estabelecida foi de 6,6 kW para recargas bifásicas.

Despacho Folha de Aprovação (5364241) SEI 23108.103068/2022-61 / pg.

- *KWhrated*: capacidade nominal de armazenamento da bateria em kWh. Foi utilizado a capacidade útil de 36 kWh.
- *State*: representa o estado operacional atual da bateria e para esta propriedade há três modos de operação: "*IDLING*", "*CHARGING*" e "*DISCHARGING*". Como a bateria foi utilizada apenas no modo de carga, a propriedade "*State*" foi estabelecida apenas para o modo "*CHARGING*" de operação. Assim, no estado "*CHARGING*", a bateria se comporta como uma carga e a propriedade kW é negativa, por consumir energia. A bateria continua a recarregar até que o kWh máximo de armazenamento seja alcançado.
- *%stored*: representa a quantidade atual de energia armazenada na bateria em porcentagem do kWh nominal estabelecido.

Para o elemento "*StorageController*", as seguintes propriedades foram utilizadas:

- *Element*: nome completo da bateria que o controle está monitorando.
- Terminal: número do terminal da bateria ao qual o controle está conectado. A escolha vai depender da direção da potência e para este caso, por estar operando como carga, a propriedade "terminal" é igual a 1.
- *ModeCharge*: propriedade utilizada para o modo de operação carga deste controlador. Possui dois modos de operação: "*Loadshape*" e "*Time*". Nesta dissertação foi utilizado o modo "Time", no qual a bateria começa a recarregar no sistema somente a partir da hora especificada
- *%RateChar*ge: define a taxa de recarga em porcentagem da capacidade nominal de recarga da bateria para cada elemento da frota de baterias no qual o controlador controla, sendo este valor definido aqui para 100%.
- *TimeChargeTrig*: propriedade que define a hora do dia em horas para iniciar a recarga da bateria. Esta variável aleatória foi estabelecida por meio de uma distribuição uniforme de especificada anteriormente.
- *ElementList*: corresponde a uma lista com os nomes das baterias a serem controladas pelo controlador. Se esta propriedade não for especificada, todas as baterias do sistema são consideradas despachadas por este controlador. Como cada VE possuía um horário de recarga, foi implementado um controlador para cada bateria. Logo, nesta propriedade apenas a bateria correspondente é inserida na lista.

Assim, o código abaixo apresenta um exemplo de modelagem de um VE no software OpenDSS para uma recarga trifásica, com o seu respectivo controlador, conforme utilizado nesta pesquisa de mestrado[3].

‘*’New Storage.Bateria1 phases=3 bus=C45 kv=0.22 kWrated=6.6 kWhrated=36 State=CHARGING %stored=20”*

“New StorageController.Bateria1 element=storage.Bateria1 terminal=1 ModeCharge=Time %RateCharge=100 TimeChargeTrig=8 ElementList=Bateria1’’*

IV. RESULTADOS

Este tópico expõe os principais resultados alcançados por meio das simulações realizadas no OpenDSS, para uma série temporal de 24 horas. Serão apresentados resultados dos seis cenários propostos, apresentando assim a tensão em regime permanente. Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos com as análises para avaliação de impactos, assim como os resultados alcançados com as potenciais soluções empregadas.

No mais, os resultados apresentados neste capítulo consideram o sistema com tensão na SE em 1,04 p.u., pois é a tensão que melhor se adequa ao sistema teste, e as análises desenvolvidas no decorrer do capítulo visam apresentar os resultados para o sistema já considerando sua melhor configuração

A. Analise dos impactos

Diversas simulações foram realizadas considerando a metodologia utilizada, no entanto, por facilidade apenas seis simulações completas foram comparadas e analisadas, e os resultados mais severos obtidos serão apresentados nas subseções que seguem.

Um dos potenciais limitantes à adesão de VE são os níveis de tensão da rede elétrica. Sendo assim, tem-se por objetivo a seguir avaliar o impacto decorrente da conexão de VE no perfil de tensão em regime permanente do sistema elétrico em estudo.

B. Tensão em regime permanente

De acordo com ANEEL (2021), a tensão em regime permanente será classificada na faixa de tensão crítica caso viole os limites de tensão crítica máximo ou mínimo. Não há limite de tensão precária máxima para consumidores atendidos através da MT, redes que possuem tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV, já redes de BT são as que possuem tensão nominal igual ou inferior a 1 kV [14]. Ainda, a tensão se encontrará na faixa em regime permanente caso esta não se enquadre nas faixas críticas ou precárias. Os limites adequados, precários e críticos de operação para os níveis de tensão de redes de BT em regime permanente, são ilustrados na Figura 5 [3].

Despacho Folha de Aprovação (5364241) SEI 23108.103068/2022-61 / pg.

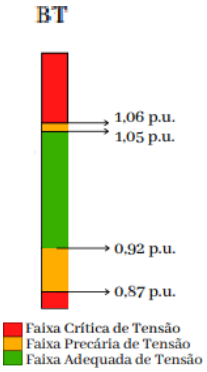

Fig. 5. Faixas de tensão crítica, precária e adequada para circuitos da BT.

Ademais, serão apresentados os resultados obtidos para as tensões do sistema em estudo para cada cenário proposto, considerando uma série temporal de 24 horas. Os limites de tensão em regime permanente encontram-se devidamente estabelecidos para a tensão analisada. O eixo y mostra a amplitude das tensões registradas em p.u., enquanto o eixo x mostra a série temporal de simulação. Observa-se que as tensões registradas na rede para o gráfico da figura 6 representa o cenário com nenhum carro ligado nos pontos de carregamento.

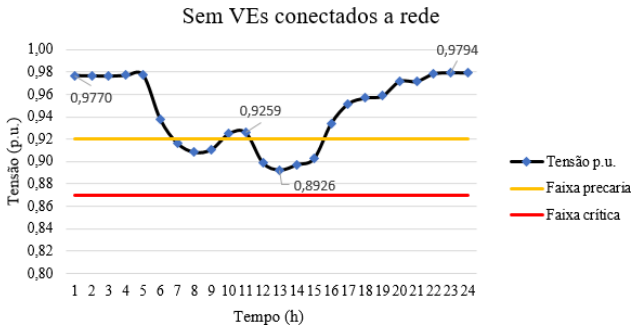

Fig. 6. Tensão sem nenhum carro conectado ao sistema.

Na figura 7 são apresentados os resultados obtidos das tensões para o cenário com 5% dos carros conectados durante 24 horas, é possível observar que a tensão se mantem na faixa precária e seu pior valor obtido em sua tensão é de 0,8918p.u.,

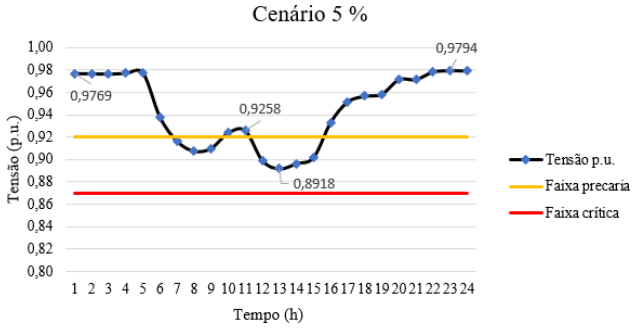

Fig. 7. Tensão com Np 5% dos carros conectados no sistema.

Posteriormente, na figura 8 são ilustrados os resultados obtidos das tensões para o cenário com 25% dos carros conectados durante 24 horas, podendo assim, observar que as tensões ainda se mantem na faixa precária e seu pior valor obtido em sua tensão é de 0,8753p.u.

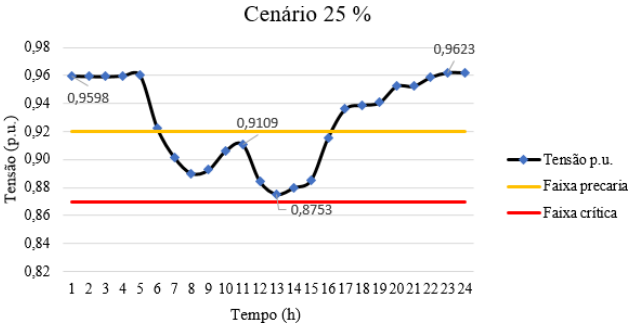

Fig. 8. Tensão com Np 25% dos carros conectados no sistema.

Em seguida, na figura 9 são mostrados os resultados obtidos das tensões para o cenário com 50% dos carros conectados durante 24horas. Desse modo, já com metade dos postos de carregamento sendo utilizados, a tensão está bem próxima de se tornar crítica, mas ainda se mantem na faixa precária e seu pior valor obtido em sua tensão é de 0,8730p.u.

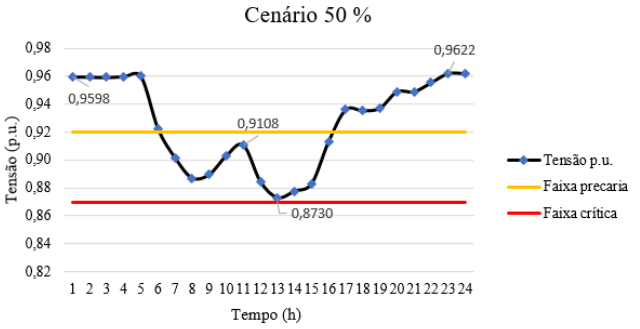

Fig. 9. Tensão com Np 50% dos carros conectados no sistema.

Após, na figura 10 são apresentados os resultados obtidos das tensões para o cenário com 75% dos carros conectados durante 24 horas. Nesse caso, nota-se que a tensão já atinge a faixa crítica de tensão, com um valor de 0,8691p.u.

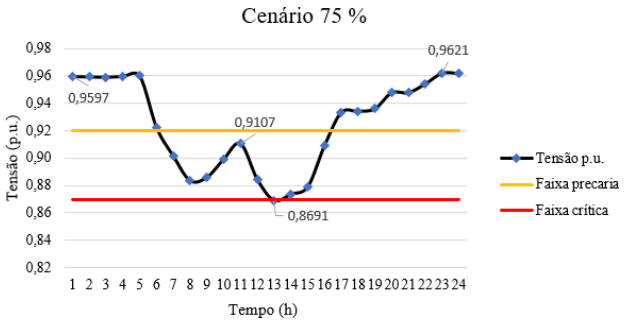

Fig. 10. Tensão com Np 75% dos carros conectados no sistema.

Por fim, na figura 11 é possível observar os resultados das tensões para o cenário com 100%, ou seja, com todos os pontos de carregamento sendo utilizados e analisados durante

24 horas. De fato, nesse cenário, assim como no anterior a tensão se enquadra na faixa critica com uma tensão atingindo 0,8669 p.u.

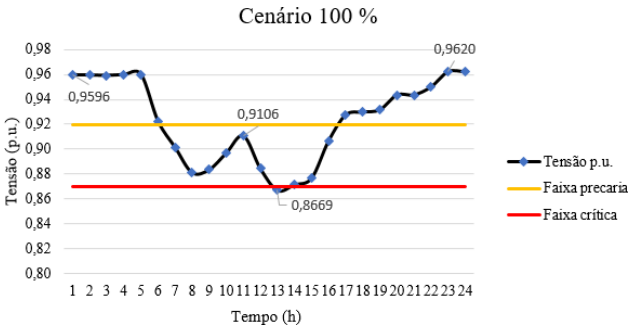

Fig. 11. Tensão com Np 100% dos carros conectados no sistema.

Assim, a partir dos resultados dos gráficos, pôde-se definir o horário de análise para os perfis de tensão do sistema a partir da mínima amplitude registrada. Somado a isto, houve extrapolações do limite critico de tensão para os cenários Np 75% e Np 100%, já os demais senário apenas agravaram a o nível de precariedade da tensão.

Essa constatação infere que deve haver uma preocupação com o limite mínimo de tensão. Com os resultados dos gráficos, para qualquer nível de penetração, visualiza-se que os perfis de tensão resultantes são diferentes do cenário base, o que já era esperado, visto que a recarga de VE representa carga adicional para o sistema, consequentemente modificando o perfil de tensão do mesmo. Observa-se também que para os cenários de 70% e 100% ocorreram uma violação tão grave que as tensões em p.u. entrara na faixa critica estimada pela PRODIST. A violação atingiu um valor de 0,8691p.u. para o cenário 70%, enquanto a violação do limite mínimo foi maior para o cenário Np 100%, atingindo 0,8669 p.u.

Os resultados obtidos com os perfis de tensão na metodologia inferem que para estratégias nos horários determinados de recarga referente aos horários de aulas, o horário de pico do sistema apresenta os piores resultados as 13 horas.

Portanto, as análises realizadas permitiram uma melhor visualização de como se encontra o sistema antes e após determinadas configurações de recarga de VE e seus possíveis impactos no perfil de tensão das redes de BT.

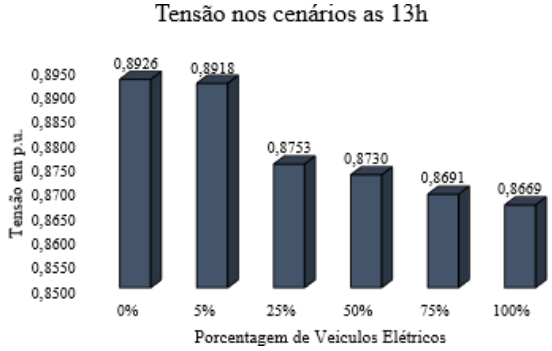

Fig. 12. Tensão mais crítica de todos os cenários.

C. Carregamento do sistema

A recarga de VE altera a demanda agregada de duas maneiras. Primeiro, a demanda geral é aumentada, uma vez que cargas adicionais são introduzidas, e segundo, o perfil da demanda é modificado devido aos diferentes horários de recarga dos VE. No mais, a priori, a recarga inserida nos horários determinados anteriormente para altos níveis de penetração de VE pode levar a um aumento no pico de demanda. No entanto, este aumento é conforme o número de VE alocados no sistema, uma vez que os VE iniciam a recarga nos três horários já selecionados. Este comportamento foi observado nos cenários estudados e a Figura 13 apresenta os perfis de carregamento para os cenários propostos para uma série temporal de 24 horas.

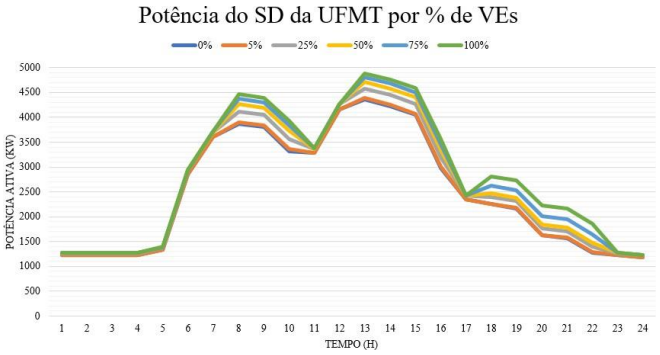

Fig. 13. Demanda de potência ativa de todos os cenários ao longo do dia do SD da UFMT.

Os resultados da Figura 13 mostram que houve aumento da demanda geral próximo aos horários de carregamento dos veículos ao longo do dia, intensificando picos menores de demanda do sistema e alterando o perfil de demanda solicitado da subestação. Este comportamento pode ser observado para o caso do cenário Np 100% em comparação com o cenário base, por exemplo, no qual torna-se perceptível o aumento da discrepância de potência registrada entre as fases do sistema.

De maneira geral, o perfil manteve o horário de pico de demanda do sistema do cenário base, o qual ocorria às 13h, para todos os cenários propostos, apenas intensificando o valor de potência requisitada da SE. Após apresentada a demanda geral do sistema requisitada da SE, expõe a demanda local solicitada do transformador de distribuição da FAET, o qual foi comparado a potência do mesmo sem veículos elétricos e com 100% dos veículos conectados na figura 14.

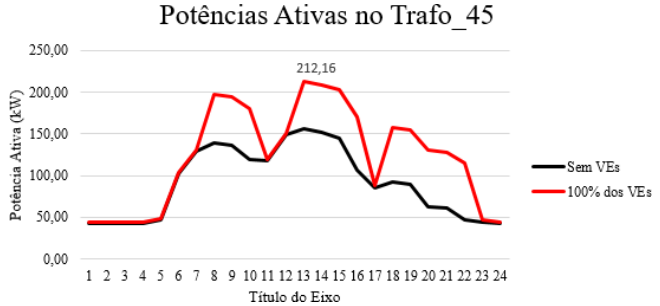

Fig. 14. Comparação dos senários de Potência ativa do transformador da FAET.

Com isso, é notório que a inserção dos veículos elétricos realizou uma mudança significativa na demanda dos da potência do transformador da FAET, aumentando de 156,41kW, conforme informado anteriormente, para um valor de 212,6kW no horário das 13h.

D. Soluções propostas

Após realizadas as simulações para as análises dos impactos decorrentes da conexão de VE nos SD, é possível propor algumas soluções de infraestrutura neste estudo. Assim, entende-se como as mais viáveis em um cenário sem considerar incentivos regulatórios eficientes e adesão por parte dos usuários de VE, sendo soluções exclusivas de ações por parte das concessionárias de distribuição. A seguir serão apresentadas as metodologias propostas para as principais soluções, como:

• Tap do transformador da subestação

O ajuste do tap do regulador de tensão na SE é a primeira intervenção considerada neste trabalho. Dessa forma, alterando o valor do tap do transformador da SE como uma alternativa de solução para o problema da subestação no sistema, e este é alterado para 1,05 p.u. De acordo com a Figura 15 os seguintes passos foram realizados para encontrar o valor que melhor se adequava ao alimentador em estudo:

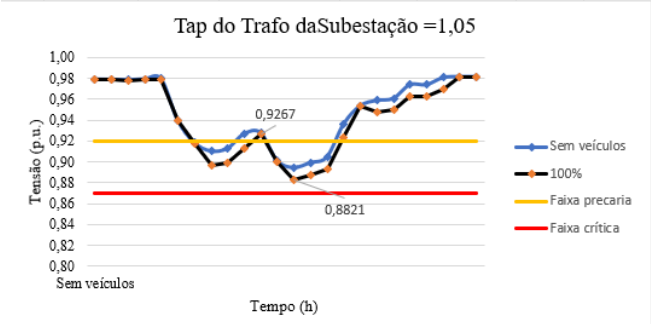

Fig. 15. Tensão com o tap do transformçaõ da substação igual a 1,05.

Em suma, com as simulações para o cenário com os valores de 1,03 p.u. e 1,04 p.u. não foi possível retirar o sistema da faixa crítica, enquanto para 1,05 p.u. não houve nenhuma faixa critica com 100% dos carros conectados e seu menor valor de tensão foi de 0,8821, focando em sustação precária, mas não critica. Constatou-se no passo 4 que manter a tensão em 1,04 p.u. na SE era a melhor opção, visto que resultava em uma porcentagem menor de violações de tensão considerando todos os cenários. Ademais, o valor de 1,05 p.u. se aproxima mais do real valor de uma das opções de tap do transformador da SE, que é de 1,04 p.u. [3].

• Tap dos transformadores de distribuição (NLTCs)

Mantendo o tap do transformador da SE em 1,04 p.u. A diferença destes transformadores para aqueles com comutadores de tap sob carga (OLTCs) é que os NLTCs necessitam ser desligados para que a comutação seja efetuada. Portanto, por não ser uma alternativa tão viável, o ajuste do tap precisa ser feito a quantidade de vezes menor possível, não implicando em compensação compulsória atendidas pelo transformador e não demandando muito da equipe de manutenção das concessionárias de distribuição. Partindo desta ideia, esta ação tem por objetivo um único ajuste no valor dos NLTCs e analisar os resultados a partir das simulações diárias [3].

V. CONCLUSÕES

Este artigo foi integralmente editado conforme as normas apresentadas para orientação de submissão de Trabalhos de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica da UFMT. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo analisar a tensão em regime permanente após a inserção dos pontos de carregamento de veículos elétricos no alimentador da UFMT, a fim de verificar se o sistema elétrico será capaz de suportar a presença dos veículos elétricos na rede. Nas simulações realizadas nesse trabalho o software utilizado foi o OpenDSS[10].

A partir dos resultados obtidos na metodologia, pode-se concluir que apresentou um resultado bastante promissor. Como já esperado, considerando a abordagem para a análise de impactos da recarga de VE, os resultados se mostraram conservadores se comparados aqueles obtidos com uma baixa inserção de veículos elétricos, o qual é o cenário mais apropriado atualmente.

A respeito especificamente da metodologia implementada para as possíveis soluções, durante a avaliação dos impactos, constatou-se que para análises envolvendo as tensões: o nível de penetração e os horários de inserção do VE no sistema são as principais variáveis que devem ser levadas em consideração durante as simulações. Sendo, portanto, essenciais para conclusões uma modelagem realista dos VE e para a identificação dos possíveis impactos ocasionados pela recarga desses veículos nos SD.

Para os demais impactos, algumas soluções de infraestrutura foram citadas, duas potenciais soluções foram implementadas. A primeira delas consistiu na escolha da melhor tensão para o tap do transformador da SE, a qual provou que uma tensão mais elevada na mesma pode diminuir significativamente a quantidade violações de tensão para os diferentes níveis de penetração estudados, desde que não cause violações de sobretensão no sistema. Posteriormente, a solução envolvendo a mudança do valor do tap dos transformadores de distribuição, todavia não é a opção mais viável, pela dificuldade de realizar esse procedimento, pelo fato de ser efetuado em conjunto com o desligamento da rede.

Despacho Folha de Aprovação (5364241) SEI 23108.103068/2022-61 / pg.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEA. Disponível em: https://www.iea.org/. Acesso em: 30 nov. 2022.

[2] WEF. Electric Vehicles for Smarter Cities: The Future of Energy and Mobility. 2018.

[3] NASCIMENTO, Priscila Costa. Avaliação Probabilística dos Impactos de Veículos Elétricos no Desempenho de Regime Permanente de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica :Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, jul./2021. Acesso em: 5 nov. 2022.

[4] BOÇON, Gustavo Schafhauser. Análise do Impacto de Veículos Elétricos na Rede de Distribuição de Energia Elétrica. Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia, Brasília, DF, dez. /2019. Acesso em: 15 nov. 2022.

[5] ANUÁRIO BRASILEIRO DA MOBILIDADE ELÉTRIC. Mudando o Cenário Rumo à Eletrificação da Frota Brasileira. Disponível em: www.pnme.org.br/biblioteca/ 1o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica/. Acesso em: 25 out. 2022.

[6] BRASIL 2017 d. Senado Federal. Projeto de Lei do Senado nº 304 de 2017.

[7] TOSIN, Felipe. A Introdução do Veículo Elétrico na Matriz Elétrica Brasileira. Trabalho de Conclusão de Curso, Curitiba, jun./2019. Acesso em: 21 set. 2022.

[8] PROMOB-E. Estudo de Governança e Políticas Públicas para Veículos Elétricos. Brasília: Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente – PROMOB-e, 2018. 124 p.

[9] BATISTA, Maria Rita; OLIVEIRA, M. E. D. Insersão de Veiculos Elétricos em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. Caderno de Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia, 1 Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara, v. 2, n. 2, dez./2020. Disponível em: doi.org/10.21166/cpitt.v2i2.2026. Acesso em: 2 nov. 2022.

[10] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Nota Técnica n o 0057/2014-SRD/ANEEL - Aprimoramento da metodologia de cálculo de perdas na distribuição regulamentada no Módulo 7”, [Online], disponível: www.aneel.gov.br, 2014.

[11] REINALDO, Pierry M.; DUPCZAK, Bruno S.; NETO, *E.* A. C. A. Análise do Impacto da Geração Distribuída Dotovoltaica na Rede de Baixa Tensão da CELESC, Celesc Distribuição S.A., Florianópolis – SC, Brasil, ago./2020. Disponível em: dx.doi.org/10.18618/REP.2020.3.0013. Acesso em: 30 out. 2022.

[12] ANDRADE, H. D. S. et al. Análise dos níveis de Tensão no Alimentador da UFMT como uma Função de Indice de Penetração da Geração Distribuida Fotovoltaica. Contemporânea, Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, mai./2022. Acesso em: 6 set. 2022.

[13] SOUZA, E. C. C. de. Análise da previsão do aumento de carga do sistema de distribuição da ufmt via OpenDSS. 2020. 114 f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2020.

[14] University of Colorado. Charging infrastructure and chargers. 2020. Disponível em: <http://ecee.colorado.edu/~ecen5017/lectures/CU/L40_slides.pdf>. Acesso em: 6 set.