

Implementação de gêmeos digitais aplicado a um sistema de distribuição de energia elétrica subterrâneo

1st Henrique Kronbauer Fischer
*Programa de Pós Graduação em Modelagem
Matemática e Computacional - UNIJUI*
Ijuí, Brasil
kfhenrique97@hotmail.com

3rd Cristina Schoefer Dessbesell
*Graduação em Engenharia Elétrica
UNIJUI*
Ijuí, Brasil
cristina.dessbesell310@gmail.com

2nd Maurício de Campos
*Programa de Pós Graduação em Modelagem
Matemática e Computacional - UNIJUI*
Ijuí, Brasil
campos@unijui.edu.br

4th Paulo Sérgio Sausen
*Programa de Pós Graduação em Modelagem
Matemática e Computacional - UNIJUI*
Ijuí, Brasil
sausen@unijui.edu.br

Resumo—O surgimento de novas tecnologias, incluindo a Internet das Coisas, Inteligência Artificial, Blockchain e Gêmeos Digitais, possibilitaram uma mudança significativa em direção à transformação digital dos antigos sistemas manuais. Essa transformação acontece pela adaptação gradual, dos processos e mecanismos operacionais tradicionais em direção a uma estrutura digital mais simplificada, eficiente e interconectada. Como geralmente os sistemas de energia são conjuntos complexos, os mesmos se beneficiam dessa transformação digital, facilitando a coordenação e várias situações operacionais por meio de simulações virtuais. O Gêmeo Digital (GD) é uma tecnologia com grande potencial para revolucionar vários setores e a sociedade, pois são projetados para replicar o mundo físico em um ambiente digital. Essa replicação envolve a virtualização dos componentes, das operações, das interações e do software de um sistema. A integração de conexões de dados em tempo real permite a coexistência de sistemas físicos e digitais. As soluções de GD com foco em energia em cidades inteligentes apresentam perspectivas cativantes como ferramentas de apoio à decisão para partes interessadas e tomadores de decisão. Este estudo se concentra na simulação de um sistema subterrâneo de distribuição de energia elétrica usando gêmeos digitais e simulação em tempo real com a tecnologia OPAL-RT.

Palavras Chave—Gêmeos Digitais, Opal RT, Rede Subterrânea, Simulink;

I. INTRODUÇÃO

Um sistema de energia (SE) é um complexo sistema de engenharia que se destaca por sua estrutura complicada, uma ampla variedade de equipamentos utilizados e a necessidade de garantir diferentes condições de operação e coordenação de sistemas individuais como parte de um sistema único de SE. Esses modelos de sistemas demandam alto investimento em projetos, construção, expansão, gestão e manutenção ao longo de sua operação, desempenhando um papel crucial na economia e na sociedade. As características dos SE exigem o uso de ferramentas teóricas para seu projeto e desenvolvimento.

É essencial utilizar ferramentas matemáticas, que abrangem modelos matemáticos, métodos avançados de computação e implementações eficazes de algoritmos em software. O estudo dos SE em modelos computacionais refere-se a diversas possibilidades de construção, envolvendo a criação ou modificação da estrutura de um sistema real de energia, da mesma forma que a alteração das condições de operação. Possibilitando a prevenção de riscos de perdas econômicas e garantindo que as condições de operação dos SE atendam aos requisitos técnicos [1].

Nesse contexto, a importância da eficiência e da confiabilidade é fundamental nesses sistemas. Por esta razão, utilizam-se os gêmeos digitais (GD) que podem contribuir para maximizar o uso de energia, diminuir as falhas e avarias, além de aprimorar a confiabilidade do sistema [2].

No setor energético, os GD apresentam a capacidade de modelar, simular e avaliar sistemas de engenharia complexos, como usinas de energia, armazenamento de energia, gerenciamento de redes e redes de distribuição, além de desenvolver sistemas de gerenciamento energético. Por meio da utilização do GD, os operadores do sistema conseguem aprimorar o funcionamento, reduzir o intervalo sem operação, analisar e apresentar informações e solucionar antecipadamente possíveis questões técnicas antes de surgirem [3].

Embora o conceito de um GD exista há cerca de vinte anos, ele está sempre se desenvolvendo à medida que se expande para diferentes áreas e aplicações industriais. De acordo com [4], o GD é descrito como uma cópia virtual de um sistema físico, englobando seu ambiente e processos nos quais informações são compartilhadas entre os ambientes físico e virtual para manter o gêmeo digital atualizado.

Para aproveitar de forma eficaz todos os recursos da tecnologia GD no setor de energia, é necessário utilizar uma estrutura

abrangente para abordar uma infinidade de desafios, incluindo modelagem, gerenciamento de dados, armazenamento, demandas computacionais e escalabilidade. Embora infraestruturas computacionais avançadas e emergentes, como a computação em nuvem, possam fornecer uma base para lidar com muitos desses problemas, os obstáculos associados à modelagem e a gestão de dados exigem competências que vão além do conhecimento básico de engenharia para uma resolução eficaz. Outro desafio é a coordenação de forma eficaz entre o equilíbrio e a precisão das previsões produzidas pelo GD e o aprimoramento da eficiência computacional exigida por diversos modelos e classificações de dados representará uma dificuldade considerável [5].

Com foco nas aplicações de um sistema de distribuição de energia elétrica subterrânea, este estudo pretende realizar uma simulação computacional de uma rede duplo radial seletiva subterrânea, utilizando o conceito de gêmeos digitais, através de simulação em tempo real com a tecnologia OPAL-RT.

O artigo está estruturado da seguinte maneira. A seção II aborda o conceito sobre as redes elétricas subterrâneas. A seção III trata sobre os Gêmeos Digitais e como eles podem ser utilizados em sistemas elétricos. A seção IV apresenta alguns dos resultados encontrados nas simulações e disserta uma rápida análise sobre os mesmos. Por fim a seção V fornece uma breve conclusão.

II. REDES SUBTERRÂNEAS

A implementação de mecanismos de monitoramento nas infraestruturas de distribuição subterrânea facilita a operação segura dos sistemas de energia elétrica, maximizando assim a capacidade do sistema de energia operar de forma adequada. Consequentemente, as concessionárias de energia têm a oportunidade de diminuir a incidência de manutenções preventivas em suas redes subterrâneas, aumentando assim a disponibilidade do sistema e diminuindo os gastos operacionais [6].

É indispensável estabelecer protocolos de monitoramento para vários componentes da rede de distribuição subterrânea, incluindo cabos, terminações de cabos, gabinetes subterrâneos e transformadores. Ao adotar o monitoramento em tempo real, as concessionárias podem efetivamente reduzir a frequência das atividades de manutenção preventiva e aliviar a necessidade de intervenções corretivas em suas redes subterrâneas, contribuindo para uma avaliação aprimorada do estado do sistema de distribuição subterrânea. A implantação de um sistema de monitoramento abrangente não apenas aumenta a disponibilidade, mas também minimiza os custos operacionais, simultaneamente em que busca reduzir a demanda por interferências nas ruas urbanas [6].

A detecção antecipada de possíveis falhas em redes subterrâneas pode permitir a prevenção de interrupções imprevisíveis no futuro, além disso, a ausência de energia para os usuários finais pode levar a sanções contra os fornecedores de energia por não cumprirem os critérios de continuidade do fornecimento. No entanto, identificar falhas em redes subterrâneas após o incidente envolve um processo prolongado

que exige a implantação de técnicas ativas que frequentemente interrompem a infraestrutura de energia [7].

Os estudos do sistema de energia abrangem várias análises, como restauração, confiabilidade, previsão, incerteza e segurança física, com cada entidade apresentando um exame distinto do comportamento da rede. O estabelecimento e a utilização de uma rede elétrica utilizando a tecnologia GD têm o potencial de aumentar a eficiência da rede em diversos cenários [8].

A degradação é uma ocorrência inevitável em todas as entidades físicas, levando a um declínio na eficiência operacional e a um aumento subsequente nas despesas. Portanto, a formulação de uma estratégia de manutenção que aborde os fenômenos naturais de envelhecimento e degradação é crucial. As estruturas de energia são igualmente suscetíveis a esse fenômeno. Como tal, a rede elétrica e os sistemas de energia necessitam de uma estratégia de proteção para facilitar a manutenção pertinente e as ações corretivas [8].

Para ampliar a confiabilidade dos sistemas elétricos e aumentar sua vida útil, torna-se essencial a utilização de sistemas avançados de monitoramento em diferentes condições de operação. Consequentemente, o conceito de GD pode ser usado nestes casos. Em geral, o GD de um sistema de proteção pode propiciar análises que podem ser feitas durante ou antes da instalação de um sistema real. A modelagem de gêmeos digitais pode rastrear a configuração do sistema de proteção, levando a estimativas precisas, economia de tempo e economia de custos, e também é possível utilizar esta tecnologia de forma mais eficiente, observando, ajustando e corrigindo defeitos em cada etapa do processo [8].

III. GÊMEOS DIGITAIS

Gêmeos digitais (GD) são modelos virtuais de entidades físicas ou sistemas em tempo real, desenvolvidos utilizando dados coletados de sensores, câmeras e outros dispositivos tecnológicos. Essas réplicas digitais têm o propósito de simular vários cenários e condições, permitindo que empresas e instituições aprimorem seu processo de tomada de decisão obtendo resultados detalhados e precisos [9].

Conforme [10], na perspectiva da simulação, a utilização de GD significa um novo avanço no campo das tecnologias de modelagem, simulação e otimização. Nas últimas décadas, o campo da simulação deixou de ser um domínio exclusivo para computadores e especialistas numéricos para se tornar uma ferramenta onipresente empregada diariamente por engenheiros para tratar de questões relacionadas a projeto e engenharia. Nesse contexto, a simulação desempenha um papel fundamental na tomada de decisões de projeto, bem como na validação e no teste, não apenas de componentes individuais, mas também de sistemas completos.

Por outro lado, um GD não é uma predefinição abrangente de um produto físico, em vez disso, ele compreende dados operacionais e modelos de simulação adaptados à finalidade específica e que evoluem ao longo do ciclo de vida do sistema. Consequentemente, o GD não oferece apenas resultados representacionais, mas também permite previsões sobre

o comportamento previsto do sistema. A particularidade dos modelos de simulação se ajusta à função pretendida, evoluindo dos estágios iniciais do projeto, onde modelos básicos de produto são empregados para a tomada de decisões sobre projetos de produtos e especificações do projeto, para estágios avançados em que modelos de simulação sofisticados suportam o design de componentes e subconjuntos [11].

Os GD têm o potencial de serem utilizados em uma variedade de modelos de sistemas de energia, incluindo detecção de falhas, previsão de carga, avaliação do desempenho do operador, bem como controle e avaliação de sistemas de energia e condições de equipamentos elétricos. O acesso em tempo real aos sistemas de energia normalmente é limitado, mas arquiteturas dos GD podem permitir operação e supervisão ativas. Consequentemente, os GD desempenham um papel crucial em preencher as lacunas existentes e agilizar os processos de tomada de decisão por meio de um gerenciamento completo e simplificado [8].

Segundo [8], especialmente nas áreas de sistemas de energia e gêmeos digitais, pode-se abordar tópicos específicos, como os abordados a seguir:

- Através de um gêmeo digital de planejamento e operação, estimar a demanda futura de energia para cada consumidor por meio de aprendizado de máquina;
- Melhorar o gerenciamento e a distribuição da rede utilizando modelos de simulação que se baseiam em dados em tempo real para fontes de energia distribuídas;
- Aperfeiçoar o concerto e a manutenção de redes de distribuição identificando possíveis comportamentos incomuns;

IV. SIMULAÇÕES

Para realização do estudo proposto, é necessário utilizar simulações de forma que seja possível avaliar a rede radial seletiva subterrânea em estudo. A metodologia adotada envolve a utilização do sistema OPAL-RT para simular em tempo real a rede em questão, que está sob concessão da CEEE Equatorial e está situada na cidade de Porto Alegre/RS.

A. Simulações em tempo real

Os simuladores digitais avançaram de seus antecessores analógicos como ferramentas para simulação nas últimas décadas. Utilizando tecnologias de computador contemporâneas, esses simuladores são econômicos e oferecem desempenho aprimorado. Atualmente, eles são amplamente utilizados em vários setores devido à sua operabilidade virtual, eliminando a necessidade de protótipos de hardware. Os cálculos dos resultados precedem sua aplicação ao modelo de hardware físico. A simulação em tempo real depende da geração de código, um fator fundamental em vários campos e aplicações da engenharia, como o design de acionamentos de motores industriais, testes estatísticos para proteger redes elétricas e o desenvolvimento de controladores robóticos complexos. Nos últimos trinta anos, simuladores em tempo real foram empregados em sistemas de energia e acionamentos elétricos. Dada a natureza intrincada e não linear dos sistemas

de energia, controladores sofisticados são necessários para a operação. A simulação em tempo real, no entanto, apresenta vários benefícios, incluindo redução de tempo, eficiência de custos, maior complexidade e flexibilidade e mitigação de riscos [12].

Na tecnologia OPAL-RT o computador *host* é responsável por gerar códigos executáveis em tempo real, modificar parâmetros e registrar dados do simulador. A conexão entre o computador *host* e o simulador é facilitada por meio de uma conexão *Ethernet-LAN*. O simulador RT-LAB, em conjunto com o computador *host*, suporta a implementação em tempo real de sistemas integrados complexos. O computador *host* gera códigos executáveis em tempo real, ajusta os parâmetros em tempo real e grava os dados do simulador, tudo isso enquanto está conectado ao simulador por meio de uma conexão *Ethernet-Lan*. A Fig. 1 apresenta o conjunto do computador *host* em conjunto com o simulador OPAL-RT utilizados para a simulação.

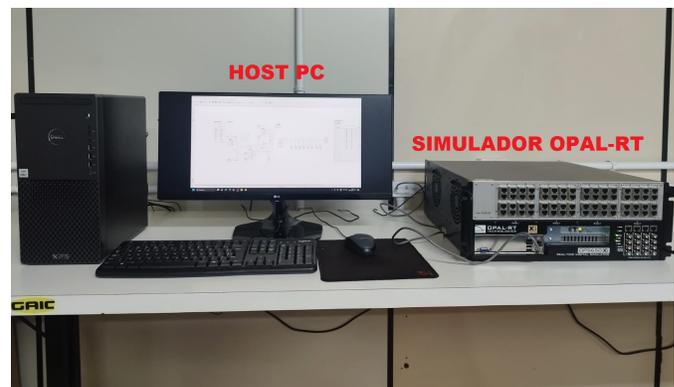


Fig. 1: Simulação em tempo real entre o *Host PC* e o simulador OPAL-RT

Quatro locais específicos dentro da rede que está sendo examinada foram definidos, nos quais as antigas chaves seccionadoras manuais preenchidas de óleo serão substituídas por chaves seccionadoras a gás SF₆ da empresa ORMAZABAL. Essas novas chaves possibilitam o acionamento remoto para reconfiguração do sistema. Com a modernização das chaves, torna-se possível a comunicação e a aquisição de dados entre a rede elétrica e a simulação, onde os dados serão coletados em tempo real utilizando o protocolo *Modbus*.

A área designada é composta por 4 unidades com 2 chaves de gás cada, situadas no núcleo histórico de Porto Alegre - RS. Esta área apresenta um volume substancial de fluxo de carga e alimenta vários consumidores, principalmente entidades governamentais, instituições financeiras, hospitais, clínicas e estabelecimentos de varejo em geral. Dessa forma os quatro locais onde as chaves irão ser substituídas com suas respectivas configurações estão listados a seguir:

- I Praça da Alfândega - 2 Chaves de 3 vias;
- II Fundação Banrisul - 2 Chaves de 4 vias;
- III Edifício Califórnia 2 Chaves de 3 vias;
- IV Praça Padre Thomé - 2 Chaves de 2 vias.

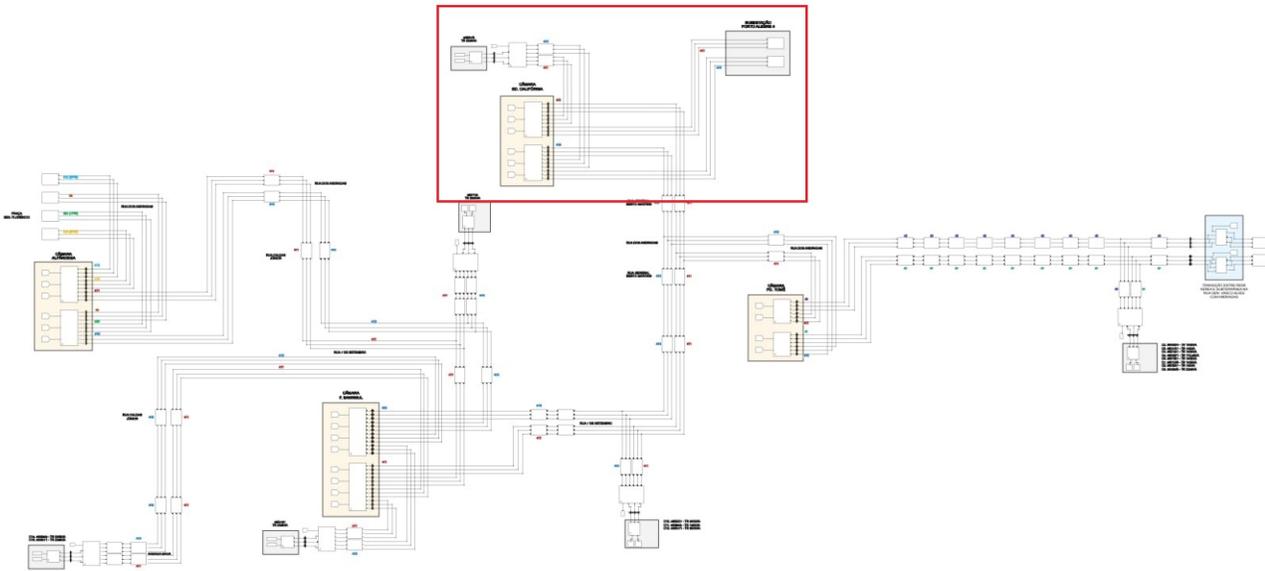


Fig. 2: Simulação em tempo real entre o *Host PC* e o simulador OPAL-RT

A partir do diagrama unifilar do sistema de alimentação duplo radial da CEEE-D do centro de Porto Alegre - RS, foi possível a modelagem computacional do modelo completo da rede em estudo, representado pela Fig. 2, que foi reproduzida no *software* MATLAB Simulink e executada juntamente com o *software e hardware* OPAL-RT. Na mesma figura um trecho da rede foi demarcado em vermelho e os resultados das simulações serão retirados deste trecho em específico. A Fig. 3 demonstra o trecho selecionado onde a área verde representa o bloco de simulação para a chave seccionadora, a área em cinza as cargas representando os consumidores que estão conectados na rede e em azul a conexão entre a rede aérea da subestação com a rede subterrânea.

desenvolvido utilizando o *software* SIMULINK, seguindo os mesmos critérios empregados na fabricação dos modelos das chaves de seccionadores atualmente instaladas na seção designada.

Deste modo, construiu-se os subsistemas das chaves seccionadoras de 2 vias, 3 vias e 4 vias da empresa ORMAZ-ABAL. O subsistema da chave seccionadora de 3 vias da ORMAZABAL, que está apresentada na figura anterior, estão apresentados na Fig. 4 a seguir.

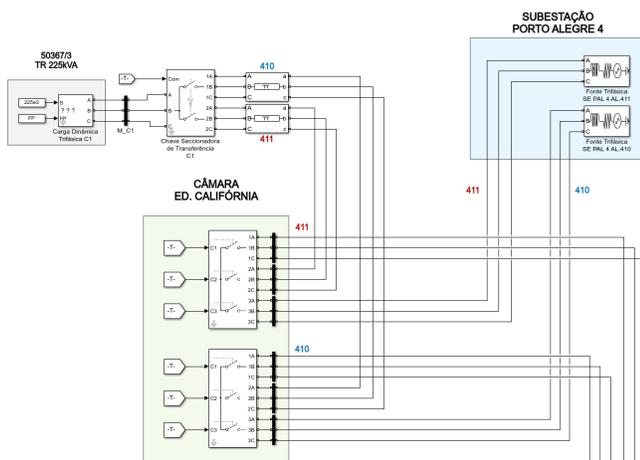


Fig. 3: Trecho retirado da simulação

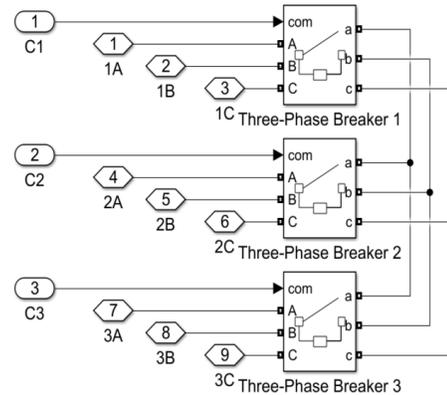


Fig. 4: Trecho retirado da simulação

A fim de validar e verificar a eficácia operacional dos subsistemas dos modelos acima mencionados, projetados especificamente para as chaves, uma extensa série de simulações foi conduzida, aderindo a uma variedade de critérios e metodologias estabelecidos, onde demonstrou-se o funcionamento eficiente do modelo associado às chaves seccionadoras que estão programadas para serem substituídas futuramente nos quatro

O modelo das chaves que serão utilizadas no projeto foi

locais definidos dentro do sistema elétrico.

B. Resultados das simulações

Após a modelagem computacional do trecho da rede no *software* MATLAB Simulink, a mesma estrutura também foi aplicada na simulação do RT-LAB. Os resultados definidos para serem analisados durante a simulação são: tensão eficaz (V_{rms}), corrente eficaz (I_{rms}), fator de potência (FP), e as potências ativa (P), reativa (Q) e aparente (S).

Através do protocolo *Modbus* que é um método de comunicação de dados que permite a troca de informações entre dispositivos eletrônicos, foi realizada a comunicação entre o GD e o sistema físico sendo assim possível obter os dados reais instantâneos junto com a simulação. A Fig. 5 a seguir representa os níveis de corrente após a troca da primeira chave seccionadora manual pela nova chave da ORMAZABAL, no trecho denominado Edifício Califórnia, percebe-se que os níveis máximos da corrente alcançam aproximadamente de 122 amperes.

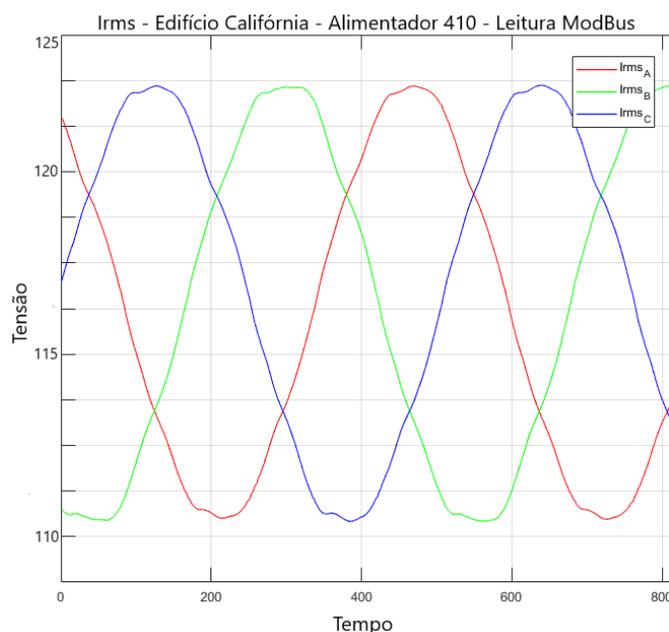


Fig. 5: Níveis de corrente eficaz obtidos no Edifício Califórnia - Alimentador 410

A Fig. 6 indica os níveis efetivos de corrente eficaz (I_{rms}) que foram simulados no mesmo local correspondente à figura anterior. Ao realizar uma análise da representação gráfica que descreve os diferentes níveis de corrente, pode-se julgar que a simulação indica a ocorrência de um valor de pico que se aproxima de um limite de aproximadamente 116 amperes.

Os níveis de tensão eficaz simulados, indicados como V_{rms} , são representados na Fig. 7, que ilustra os dados que foram adquiridos durante o processo de simulação conduzido em um local idêntico ao da chave seccionadora localizada no trecho denominado Edifício da Califórnia e, por se tratar de um ponto no centro da cidade de Porto Alegre - RS, após uma breve

observação da mesma torna-se evidente que os níveis de tensão ultrapassam a faixa de 8200 volts.

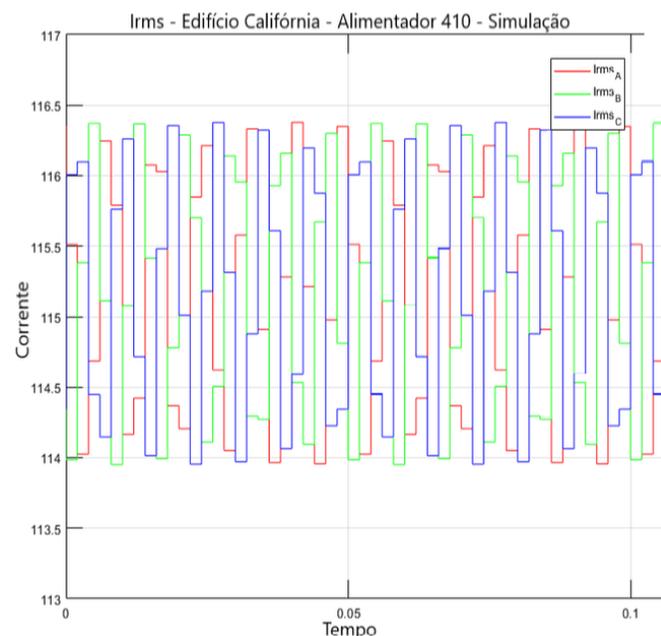


Fig. 6: Níveis de corrente eficaz simulados no Edifício Califórnia - Alimentador 410

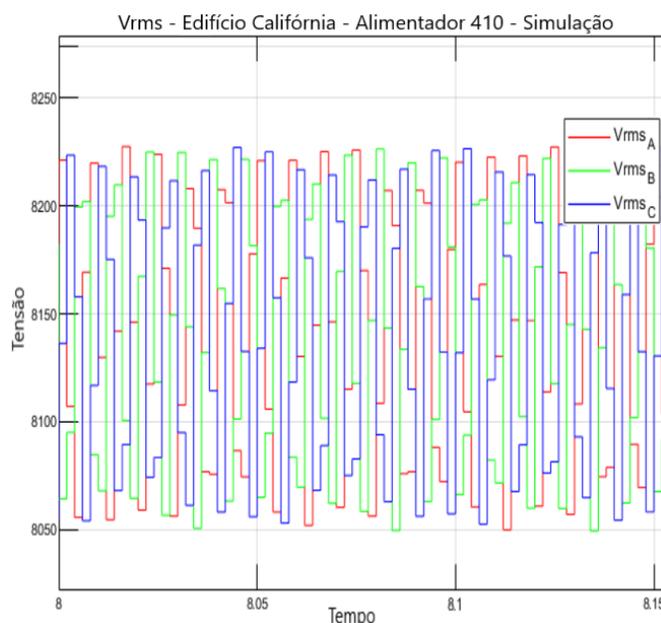


Fig. 7: Níveis de tensão eficaz simulados no Edifício Califórnia - Alimentador 410.

A Fig. 8 ilustra o comportamento da corrente eficaz ao longo do tempo durante a simulação da abertura de uma chave seccionadora na simulação. No primeiro momento é possível perceber que antes da abertura da chave, os valores de corrente permanecem estáveis, indicando o fluxo contínuo

de energia no sistema. No momento da abertura, próximo ao instante 5,5 de tempo, há uma interrupção repentina no fluxo de corrente, que podem estar associadas a fenômenos transitórios, comum em processos de abertura de seccionadoras sob carga. Essas informações das simulações são importantes para demonstrar futuras manobras que possam ocorrer no sistema, pois fornecem dados essenciais para evitar avarias e proteger o equipamento contra possíveis danos.

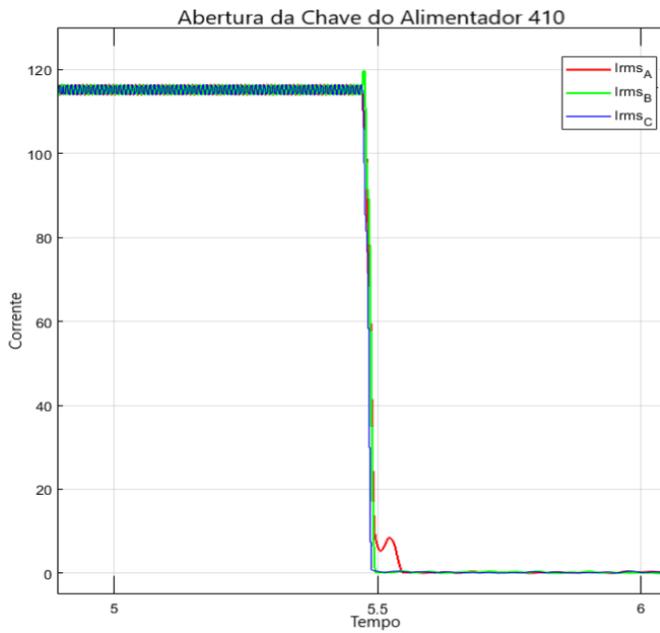


Fig. 8: Níveis de corrente eficaz simulados durante a abertura de chave

V. CONCLUSÃO

Os gêmeos digitais têm o potencial de aumentar a segurança energética, a eficiência, a confiabilidade e a resiliência cibernética do sistema. Os GDs combinam sistemas físicos e digitais em tempo real, aumentando assim a segurança, eficiência e simplicidade da infraestrutura de energia. Apesar dos obstáculos e restrições associados à tecnologia, os GDs oferecem perspectivas substanciais para otimizar o desempenho dos sistemas de energia e promover a sustentabilidade em áreas urbanas inteligentes. Os GDs permitem a produção e o consumo eficazes de energia, reduzem o desperdício de energia e aumentam a confiabilidade. Eles fornecem recursos de prognóstico, permitindo previsões precisas das necessidades de manutenção e diminuindo o tempo de inatividade e as despesas de manutenção.

Como constatado anteriormente, a simulação computacional do segmento que engloba as câmaras de manobra localizadas entre a Praça da Alfândega, Fundação Banrisul, Edifício Califórnia e Praça Padre Tomé, foi completamente modelada e simulada no *software* MATLAB Simulink em conjunto com o *software/hardware* OPAL-RT. Neste primeiro estudo a simulação teve como objetivo representar o cenário atual. A

aplicação do conceito de gêmeos digitais na simulação permite a fácil criação de novos cenários para fins de simulação, auxiliando assim na transição entre os diferentes estados das chaves seccionadoras nas câmaras de manobra. Além disso, a integração de faltas significativas na rede e validação de suas consequências.

Como resultado, a simulação foi considerada satisfatória devido à sua capacidade de avaliar diversos aspectos dentro da seção do sistema de alimentação, considerando a influência de cada cenário possível no sistema. Porém a partir da comparação dos dados simulados com os dados obtidos da rede percebe-se que o modelo ainda apresenta um erro de aproximadamente de 5%. O próximo passo é aguardar a troca das outras chaves seccionadoras nos outros três pontos do sistema, para que deste modo seja possível a comunicação completa entre os sistema físico e virtual, facilitando assim a verificação dos resultados derivados das simulações em relação ao ambiente real e dessa forma o sistema possa reduzir os erros do gêmeo digital, possibilitando assim a simulação sempre evoluindo.

REFERÊNCIAS

- [1] V. Stennikov, E. Barakhtenko, D. Sokolov and G. Mayorov, "Principles of building digital twins to design integrated energy systems". *Computation* 2022, 10, 222. <https://doi.org/10.3390/computation10120222>.
- [2] A. K. Sleiti, J. S. Kapat, and L. Vesely, "Digital twin in energy industry: proposed robust digital twin for power plant and other complex capitalintensive large engineering systems", *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3704–3726, 2022.
- [3] U. Cali, B. D. Dimd, P. Hajjaligol, A. Moazami, S. N. G. Gourisetti, G. Lobaccaro, and M. Aghaei, "Digital twins: shaping the future of energy systems and smart cities through cybersecurity, efficiency, and sustainability". June, 2023. In *2023 International Conference on Future Energy Solutions (FES)* (pp. 1-6). IEEE.
- [4] E. VanDerHorn and S. Mahadevan, "Digital twin: generalization, characterization and implementation", *Decision support systems*, vol. 145, p. 113-524, 2021.
- [5] P. Palensky, M. Cvetkovic, D. Gusain and A. Joseph. "Digital twins and their use in future power systems" [version 2; peer review: 2 approved]. *Digital Twin* 2022, 1:4.
- [6] F. Bassan, et al. "Multi-Parameter Optical Monitoring Solution Applied to Underground Medium-Voltage Electric Power Distribution Networks." *Sensors* 23.11 (2023): 5066.
- [7] J. Mousavi Mirrasoul and K. L. Butler-Purry. "A novel condition assessment system for underground distribution applications." *IEEE Transactions on Power Systems* 24.3 (2009): 1115-1125.
- [8] M. Jafari, et al, "A review on digital twin technology in smart grid, transportation system and smart city: Challenges and future." *IEEE Access* 11 (2023): 17471-17484.
- [9] F. Tao, et al, "Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94 (2018): 3563-3576.
- [10] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, K. D. Bettenhausen, "About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing." *Ifac-papersonline* 48.3 (2015): 567-572.
- [11] S. Boschert and R. Rosen, "Digital twin—the simulation aspect." *Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers* (2016): 59-74.
- [12] J. Bélanger, et al. *The what, where and why of real-time simulation.* *Planet Rt*, v. 1, n. 1, p. 25-29, 2010.