

# Proposta de planejamento, gerência e otimização de recursos de redes em tempo de execução utilizando Gêmeo Digital

Lucas B. Oliveira<sup>1</sup>, Fernando N. N. Farias<sup>3</sup>, Marcos F. Schwarz<sup>3</sup>,  
José F. Rezende<sup>2,3</sup>, Antônio J. G. Abelém<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Pesquisa em Redes de Computadores e Comunicação Multimídia (GERCOM)  
Universidade Federal do Pará (UFPA) – Pará – Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Rio de Janeiro – Brasil

<sup>3</sup>Rede Nacional de Pesquisa (RNP) – Campinas, SP – Brasil

lucas.borges@itec.ufpa.br, abelem@ufpa.br,  
{fernando.farias, marcos.schwarz, jose.rezende}@rnp.br

**Abstract.** *The Digital Twin is a promising concept, which is being adopted by several industries by integrating a number of technologies. However, the adoption of this approach in computer networks is still timid. Thus, this paper proposes a digital twin system structured in four layers that uses a multilayer SDN testbed as the physical entity, the CNetLab emulator as the digital twin and a data processing environment as the intermediate layer establishing a bidirectional connection between these environments.*

**Resumo.** *O Gêmeo Digital (Digital Twin) é um conceito promissor e vem sendo adotado por diversos setores, integrando uma série de tecnologias. Entretanto, a abordagem em redes de computadores é ainda tímida. Desse modo, este trabalho propõe um sistema de gêmeo digital estruturado em quatro camadas, utilizando o testbed SDN Multicamada como entidade física, o emulador CNetLab como gêmeo digital e um ambiente de tratamento de dados como camada intermediária estabelecendo uma conexão bidirecional entre os ambientes.*

## 1. Introdução

A transformação digital fornece recursos para habilitar novos modelos de negócios e sistemas de apoio à decisão [VanDerHorn and Mahadevan 2021]. Nessa linha, o conceito de gêmeos digitais emerge, tornando-se intensamente investigado e utilizado nos últimos anos, tanto na academia como na indústria [Fuller et al. 2020]. O gêmeo digital é capaz de representar virtualmente o ambiente físico em tempo real e permitir o monitoramento, controle e otimização dos seus processos e funções por meio de tomadas de decisão inteligentes. Ainda, a partir da obtenção de dados reais, pode-se simular e testar novas configurações em ambientes virtuais realísticos.

Operações e manutenções de sistemas de comunicação em tempo de execução podem ser mais simples, automáticas e resilientes [Cheng Zhou 2021]. A inserção de gêmeos digitais nesses sistemas pode reduzir custos de otimização da rede, otimizar a tomada de decisão e torná-lo mais seguro. O ambiente, entregue a projetistas e operadores, mostra virtualmente o estado atual da rede física além de permitir a realização de testes mais realísticos, seguros e inovadores. Inclusive, pode-se utilizar este ambiente

para testar e avaliar cenários hipotéticos mas com características reais, enviando automaticamente novas configurações, mas sem o risco de eventuais problemas alcançarem o ambiente físico.

Em consequência disso, o objetivo deste trabalho é propor e discutir com a comunidade um modelo de gêmeo digital para redes de computadores, capaz de representar virtualmente o ambiente físico, destinando-se a analisar, diagnosticar, planejar, otimizar os recursos, reduzir custos, emular e controlar a rede física através de um modelo em camadas. Para isso, é feita uma breve apresentação sobre o novo paradigma e os setores que o adotam na Seção 2. A proposta e os componentes do ambiente são descritos na Seção 3. Por fim, são apresentadas as considerações finais do trabalho e vislumbrados possíveis trabalhos futuros na Seção 4.

## 2. Gêmeo Digital

O conceito de Gêmeo Digital (*Digital Twin*) foi originado sobre a óptica de auxiliar o gerenciamento de produtos em todo o seu ciclo de vida, buscando reduzir custos e promover inovação e qualidade na fabricação de produtos [Grieves 2015]. Com o avanço do conceito para outras áreas, foram propostos diferentes entendimentos e atributos sobre Gêmeo Digital, ocasionalmente incluindo referência a casos de uso específicos [VanDerHorn and Mahadevan 2021]. Entretanto, a essência se manteve, seguindo três componentes principais: um objeto físico no espaço real, um objeto virtual no espaço virtual e uma conexão bidirecional proporcionando a troca de informações entre os espaços.

O espaço real abrange a totalidade do ambiente físico, ou seja, inclui os objetos, o ambiente em que eles estão inseridos e a interação com os componentes do sistema. Do espaço real, são obtidas as características dos objetos e do ambiente, e informações geradas a partir das interações. Esses dados são coletados e armazenados, proporcionando o conhecimento sobre o comportamento do gêmeo físico em um determinado instante para obtenção de um determinado resultado. Então, os dados são traduzidos e utilizados pelo espaço virtual para construir a representação virtual, em níveis de abstração distintos. Ao utilizar somente os detalhes necessários do ambiente físico, criam-se versões leves dos modelos virtuais agilizando o processamento e comunicação no meio digital.

A primeira abordagem para conexão bidirecional, utiliza um repositório unificado, populado por ferramentas de desenvolvimento virtual e de coleta de dados. As informações do ambiente real auxiliam a construção de modelos virtuais ideais que atuam como referência. Então, as características ideais são repassadas ao ambiente físico, através do repositório, para incorporar à produção. Feito isso, o ambiente real passa a trabalhar nesse novo estado e atualiza o repositório, impulsionando o ambiente virtual ao mesmo processo. A partir de então, o ambiente virtual passa a espelhar o mundo real, exibindo, baseado nos dados obtidos, os estados atuais do objeto físico no meio virtual.

Visto a geração de grandes quantidades de dados, foram adicionadas tecnologias que realizam o tratamento e as tomadas de decisões a partir deles, como Big Data, aprendizado de máquina e inteligência artificial. Então, o gêmeo digital passa a ser capaz de ir além de só reconhecer e representar em tempo real o seu gêmeo físico, agora ele pode otimizar os processos e funções através de análises descritivas, preditivas e prescritivas. Assim, configurações são simuladas e testadas, proporcionando melhorias contínuas ao ambiente [Barricelli et al. 2019], além de promover eficiência, redução de custos e riscos,

apoio à tomada de decisão e oferta de serviços com segurança, confiabilidade e resiliência [VanDerHorn and Mahadevan 2021]. Diante desse potencial, áreas como aviação, saúde, logística, educação, energia, gerência de tráfego e cidades inteligentes estão adotando o conceito [Barricelli et al. 2019], [Fuller et al. 2020], [Pei et al. 2021].

Mesmo diante da capacidade e versatilidade, a utilização de gêmeos digitais em redes ainda é tímida. [Cheng Zhou 2021] aborda e define *Digital Twin Network* (DTN) como uma representação virtual da rede física, destinada a analisar, diagnosticar, emular e controlar a rede a partir de elementos-chave, como: dados, mapeamento, modelo, interface e pilha de orquestração. Além disso, propõe a arquitetura DTN em três camadas, sendo elas: Rede Física, Entidade Gêmea Digital de Rede e Aplicação.

### 3. Proposta

Este trabalho propõe a criação de um gêmeo digital em redes de computadores para viabilizar operações e manutenções de forma mais simples, autônoma e resiliente. A partir de dados reais obtidos, tem o potencial de permitir planejamento, engenharia de tráfego, analisando e diagnosticando a rede física para propor a otimização do uso dos recursos. Além disso, viabiliza a criação de ambientes virtuais reais para testar e implementar novas aplicações em tempo de execução. Então, o modelo proposto é estruturado em modo de camadas e apresentado na Figura 1, são elas: camada física, camada de tratamento de dados, camada digital e camada de aplicação.

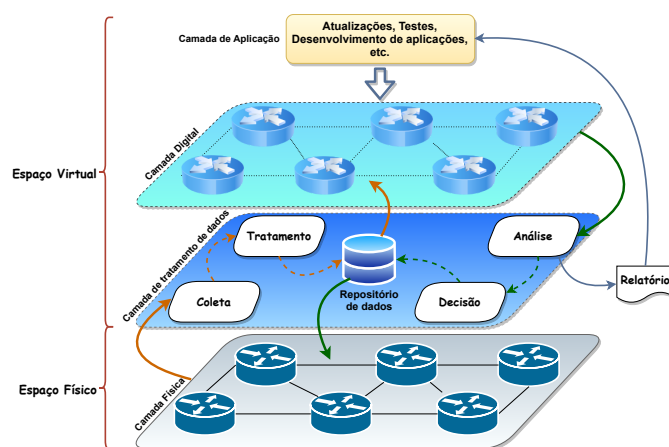


Figura 1. Modelo proposto para gêmeo digital em redes.

A camada física representa o espaço real e engloba os objetos físicos, o ambiente em que ele está inserido e a relação entre eles. Combinado com dispositivos e aplicativos reais com potencial de gerar resultados realistas [Wang et al. 2013], é possível utilizar ferramentas de testbed para compor o espaço real dentro do ambiente de gêmeos digitais e conseqüentemente, seus dispositivos serem a contraparte real, ou seja, os gêmeos físicos.

Neste contexto, nossa proposta é que o testbed SDN Multicamada faça parte do cenário assumindo o papel de ambiente real, na camada mais baixa. Os dados gerados por ele, como configurações, características dos dispositivos, informações da rede e etc., são coletados e armazenados no repositório. E a partir deste mesmo repositório, as mudanças de estado sugeridas pela camada superior são lidas e incorporadas ao ambiente físico.

A camada de tratamento de dados é a camada intermediária que hospeda o repositório de dados e conseqüentemente conecta o ambiente real ao ambiente virtual e vice-versa. A partir dos dados recebidos, é feita engenharia de tráfego, com auxílio de aprendizado de máquina ou inteligência artificial, analisando preditivamente ações de otimização dos recursos de rede e prevendo falhas, reduzindo congestionamentos e custos. Assim, cria-se um ambiente em constante evolução para atender os critérios de qualidade definidos pelos operadores da rede.

A camada digital, baseada nos dados gerados pelo espaço real, constrói o gêmeo digital da camada física, com o nível de abstração requerido. Como ferramentas de emulação criam ambientes isolados para realizar testes, avaliações de desempenho e reprodutibilidade de experimentos [Farias et al. 2019], tornam-se ótimas candidatas a fornecer ambientes virtuais com propriedades realísticas, em linha com o proposto pelos gêmeos digitais. Em tal caso, nossa proposta utiliza o emulador CNetLab para construir virtualmente a camada física, assumindo o papel de gêmeo digital. A conexão do emulador à rede física ocorre através da leitura constante do repositório de dados e baseado nas informações obtidas a partir dele, torna-se capaz de espelhar a rede em tempo real.

Atualizações, aplicações e testes são lançados para a rede por meio da camada de aplicação. Ao exercer o papel de filtro de implementações defeituosas para a rede real, as alterações são aplicadas e testadas primeiramente na camada digital. Se não houver problemas durante os testes, a mudança de estado é gravada no repositório para que seja aplicada no ambiente físico automaticamente. Agora, diante de problemas na aplicação, o repositório permanece inalterado e o ambiente físico seguro.

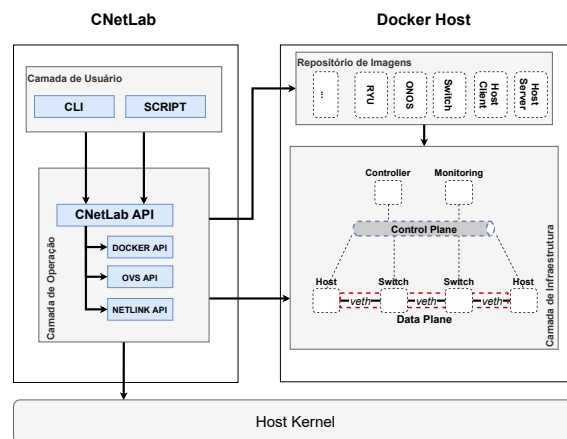
### 3.1. Ambiente SDN Multicamada

O testbed SDN Multicamada é fruto da plataforma homônima a ele, desenvolvido a partir de convênio de cooperação técnica e científica da RNP com a empresa Huawei. Incluso a um laboratório óptico de experimentação remota, é possível estudar e desenvolver soluções de orquestração multicamada (óptica e L2/L3) através do paradigma SDN (*software-defined networking*), com hardware e software abertos, disponíveis para o uso de qualquer usuário. Atualmente possui dois sistemas finais DTNs (*Data Transfer Nodes*), dois *switches whitebox* (L2/L3), dois *transponders* e um *switch whitebox* funcionando como *patch panel* programável para integrar, automatizar serviços e ferramentas, e mantê-los isolados.

O CNetLab foi construído como parte da plataforma SDN Multicamada, sendo possível utilizá-lo para emular redes modernas e tradicionais. Baseado em containerização, beneficia-se dos contêineres Docker para realizar isolamento total entre nós e interconecta-los através de enlaces ou túneis virtuais. De modo totalmente isolado, pode-se utilizar nos contêineres diversos sistemas operacionais, protocolos, serviços de rede e aplicações. Assim, é possível criar um ambiente virtual espelhando o ambiente físico completo de redes com *hosts*, servidores, *switches*, roteadores e etc, neutro ao uso de SDN ou outras arquiteturas.

A arquitetura do CNetLab é dividida em quatro camadas, mostrado na Figura 2, e nomeadas: camada de usuário, camada de operação, camada de infraestrutura e o repositório de imagens. Uma breve descrição das camadas é feita a seguir.

- Camada do Usuário: responsável pela interatividade do usuário às funcionalidades



**Figura 2. Arquitetura CNetLab.**

do emulador através de linhas de comando e scripts Python.

- **Camada de Operação:** fornece bibliotecas para alocação de recurso no ambiente virtual, construção dos enlaces, manipulação de elementos do experimento e extensão de novas funcionalidades e modelos utilizados pelo emulador;
- **Camada de Infraestrutura:** camada de software que contém todos os elementos lógicos alocados para a construção da topologia. Possui dois canais independentes de conectividade, sendo um canal de controle e outro de dados;
- **Repositório de imagens:** armazena a imagem dos contêineres disponíveis, como: switches, roteadores, servidores e clientes.

### 3.2. Fluxo de dados

Uma das características primordiais do gêmeo digital é a interconexão entre o ambiente físico e sua representação virtual, promovendo troca de informações em dois sentidos: físico-virtual e virtual-físico. No sentido físico-virtual são coletadas configurações, características, *logs* e qualquer outra informação relevante do ambiente real. Após a coleta, é realizada uma triagem nos dados, separando-os para que, baseado nessas informações, seja criado o ambiente virtual de forma consistente com o nível de abstração requerida. Depois de separados, os dados são armazenados no repositório de dados e disponibilizados ao emulador para a criação do ambiente virtual. Todo esse fluxo é retratado na Figura 1 em laranja.

No sentido virtual-físico são encaminhadas as mudanças de estado ao ambiente real, como representado em verde na Figura 1. O estado atual do gêmeo digital é analisado para verificar incompatibilidades e comparado a estados anteriores para determinar a necessidade de alterações. Nesse processo podem ser utilizados modelos de aprendizado de máquina para aplicar técnicas preditivas e prescritivas para prever falhas, testar resultados de possíveis soluções e ativar mecanismos de autocontrole, tornando o modelo mais robusto. Em seguida, as atualizações, baseadas nas análises, são armazenadas no repositório de dados para que, o ambiente real ao detectar alterações nos parâmetros, mude e otimize o seu estado.

A proposta prevê o uso do modelo para além da replicação do ambiente real em meio virtual. A criação do ambiente virtual, utilizando dados reais, gera um ambiente de desenvolvimento realístico para que aplicações e atualizações sejam desenvolvidas e

testadas fora de cenários idealizados sem colocar em risco o ambiente de produção. Então, na Figura 1 o fluxo para esse cenário é apresentado em azul, com as novas configurações sendo submetidas através da camada de aplicação diretamente ao emulador que, se adequa às novas informações e gera novos dados. Durante o processo de análise, as alterações podem ser consideradas como melhorias ao sistema, se não houver indicativo de erros, então o ambiente físico as recebe seguindo o fluxo em verde. Ou então, se for indicado que o ambiente será deteriorado, relatórios são gerados e entregues aos desenvolvedores e as alterações não são repassadas para o ambiente físico.

#### 4. Considerações Finais

Este trabalho apresentou o tema e espera estimular discussões a respeito de um modelo em camadas para o uso de gêmeo digital em redes de computadores. Ao utilizar em sua estrutura o emulador CNetLab e o testbed SDN Multicamada, realiza uma nova abordagem para a construção do ambiente real e sua contraparte virtual. Ademais, por meio da camada de tratamento de dados é possível estabelecer uma conexão bidirecional entre os ambientes e visando a construção de um sistema robusto, é possível utilizar aprendizado de máquina e inteligência artificial para registrar, controlar e monitorar as condições e mudanças do sistema físico permitindo aplicar técnicas preditivas e prescritivas. Além disso, a partir de um ambiente virtual com características reais e atuante como filtro de aplicações, as correções, aplicações e soluções podem ser testadas seguindo os parâmetros reais sem oferecer risco ao sistema.

Nesse primeiro momento, o trabalho segue uma abordagem teórica sobre o tema. Entretanto, os próximos passos estarão alinhados à necessidade de implementação e validação do modelo proposto. Com o dimensionamento do uso do modelo, será possível definir casos de uso e provar, através de aplicações práticas, a viabilidade da proposta. Após essa etapa, será possível definir as características e tipos de dados necessários para desenvolver o modelo de aprendizado de máquina que será utilizado na proposta.

#### Agradecimentos

Agradecemos à RNP que, através do projeto SDN Multicamada, proporcionou o desenvolvimento deste trabalho.

#### Referências

- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., and Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications.
- Cheng Zhou, Hongwei Yang, X. D. D. L. A. P. Q. W. M. B. C. J. (2021). Concepts of Digital Twin Network. Technical Report 9, Internet Engineering Task Force.
- Farias, F. N., Antônio de, O., da Costa, L. B., Pinheiro, B. A., and Abelém, A. J. (2019). vSDNEmul: A software-defined network emulator based on container virtualization. *arXiv*.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., and Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8:108952–108971.
- Grieves, M. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.
- Pei, F. Q., Tong, Y. F., Yuan, M. H., Ding, K., and Chen, X. H. (2021). The digital twin of the quality monitoring and control in the series solar cell production line. *Journal of Manufacturing Systems*, 59:127–137.
- VanDerHorn, E. and Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, page 113524.
- Wang, S. Y., Chou, C. L., and Yang, C. M. (2013). EstiNet openflow network simulator and emulator. *IEEE Communications Magazine*, 51(9):110–117.