

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VICTORINO OGURA

**GÊMEOS DIGITAIS EM TELECOMUNICAÇÕES:
O DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO DE CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2021**

VICTORINO OGURA

**GÊMEOS DIGITAIS EM TELECOMUNICAÇÕES: O DESENVOLVIMENTO DE UM
ESTUDO DE CASO**

**Digital twins in telecommunication: the development of a proof of concept
digital twin**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Frederic Conrad Janzen.

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VICTORINO OGURA

**GÊMEOS DIGITAIS EM TELECOMUNICAÇÕES: O DESENVOLVIMENTO DE UM
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 25 de agosto de 2021.

Marcella Scoczynski Ribeiro Martins
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Murilo Oliveira Leme
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Frederic Conrad Janzen
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2021

Dedico este trabalho à minha mãe, à
minha família e aos meus amigos, pelos
vínculos duradouros e confiança.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas e instituições às quais presto minha homenagem. Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

A minha mãe, pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos e pela confiança depositada.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho. Em especial ao Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font que me orientou em uma iniciação científica.

A UTForce e-Racing, pelos anos de aprendizado e crescimento profissional.

Aos meus colegas que estiveram ao meu lado nessa caminhada.

A empresa Automa Vision, na figura de Charles Roberto Stempniak.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A luta é a lei da vida, devendo ser enfrentada uma e mil vezes, não com insegurança, senão com plena consciência de que é inevitável(Pecotche, Carlos Bernarndo, 1942).

RESUMO

OGURA, Victorino. **Gêmeos digitais em Telecomunicações : o desenvolvimento de um estudo de caso**. 2021. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Este trabalho se propõe a revisar, desenvolver e expor resultados da aplicação de gêmeos digitais na área de telecomunicações. Em especial, se dedica a desenvolver o tema visando sua aplicação para o usuário final, mesmo se tratando de uma prova de conceito. Satisfazendo as necessidades correntes por mais informação, seja na indústria, saúde e segurança, os gêmeos digitais vêm enquanto ferramentas para fornecer uma interface entre a informação e o usuário. Trata-se portanto de conceitos como indústria 4.0 e Internet das coisas em sua aplicação.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Gêmeos Digitais. Fotogrametria. POC. Telecomunicação.

ABSTRACT

OGURA, Victorino. **Digital twins in telecommunication: the development of a proof of concept digital twin**. 2021. 43 p. Thesis (Bachelor's Degree in Electrical Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Satisfying current needs for more information, whether in industry, health and safety, digital twins come as tools to provide an interface between information and the final user. It is, therefore, about concepts such as industry 4.0 and the Internet of Things in its application. This work aims to review, develop and expose results of the application of digital twins in the telecommunications area. In particular, it is dedicated to developing the theme with a view to its application to the end user, even if it is a proof of concept.

Keywords: Industry 4.0. Digital Twins. Photogrammetry. POC. Telecommunication.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gêmeo digital em tempo real de uma fábrica.	15
Figura 2 – Gêmeo digital de Shanghai.	18
Figura 3 – Interface WEB Azure.	20
Figura 4 – Exemplo aplicado de fotogrametria.	20
Figura 5 – Drone utilizado para captação de dados.	23
Figura 6 – Sobrevoos para melhor captura de dados.	24
Figura 7 – Comparação malha e nuvem de pontos, à direita a nuvem de pontos e à esquerda a malha.	25
Figura 8 – Comparação malha reconstruída e nuvem de pontos. Nuvem de pontos à direita e malha reconstruída ao seu lado.	26
Figura 9 – Ambiente de desenvolvimento Unity.	27
Figura 10 – Ambiente de desenvolvimento Unreal.	27
Figura 11 – Cubo.	31
Figura 12 – Modelamento a partir da nuvem de pontos.	32
Figura 13 – Interface do usuário.	33
Figura 14 – Ferramenta de medição.	35
Figura 15 – Ferramenta de corte vertical.	36
Figura 16 – Classificação quanto a existência torre GreenField.	38
Figura 17 – Classificação quanto a existência torre RoofTop.	39
Figura 18 – Minilink Rooftop.	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO	11
1.1.1	Objetivos específicos	11
1.2	JUSTIFICATIVA	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	O QUE SÃO GÊMEOS DIGITAIS?	14
2.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DE MERCADO	16
2.3	APLICAÇÕES ATUAIS	17
2.4	FOTOGRAMETRIA	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	REVISÃO DAS FERRAMENTAS USADAS	22
3.1.1	Captação de dados brutos	22
3.1.2	Digitalização	23
3.1.3	Malhas ou nuvem de pontos	24
3.1.4	Ambiente de desenvolvimento do Gêmeo Digital	26
3.2	ESPECIFICIDADES DO CASE	27
3.2.1	Objetos de interesse	28
3.2.2	Informações de interesse	29
3.3	MODELAMENTO E PROGRAMAÇÃO	30
3.3.1	Objetos, scripts e colisões no Unity	30
3.3.2	Modelamento	32
3.3.3	Programação	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	41
5.1	TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de conclusão de curso descreve as atividades desenvolvidas no período de graduação do aluno Victorino Ogura na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Ponta Grossa, Brasil. Este labor foi vinculado ao Departamento de Engenharia Elétrica da mesma universidade e orientado pelo Dr. Frederic Conrad Janzen. Este trabalho foi realizado na área de gêmeos digitais, com ênfase nas aplicações através de fotogrametria.

Com a necessidade crescente do mercado em informações tanto como uma evolução dos tempos modernos como uma necessidade da indústria 4.0, faz-se necessário também criar ferramentas que, para além de armazenar dados, os mostrem de forma clara, classificada e simples. Como solução a essa demanda surgem os gêmeos digitais.

Tratou-se nesse trabalho de conclusão de curso um gêmeo digital ligado à ambientes 3D, para tanto faz-se uso da fotogrametria. Essa ciência da medição através de fotos vem despontando recentemente devido à capacidade computacional e evolução dos sensores. Em outras palavras, a popularização de drones e câmeras de alta resolução possibilitou a evolução dessa ciência a precisões milimétricas.

Assim, surgindo da necessidade de uma empresa de telecomunicações a empresa Automa Vision iniciou um *POC*, prova de conceito, visando analisar possíveis ganhos financeiro e qualidade de sinal vindos da aplicação de um gêmeo digital nas torres. Fazendo o uso das ferramentas da fotogrametria e ambientes de programação para desenvolvimento programas 3D.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo geral projetar e desenvolver um aplicativo de gêmeo digital e sua possível aplicação no mercado.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do projeto podem ser resumidos em:

1. Fazer uma revisão geral de temas relacionados a gêmeos digitais;
2. Desenvolver um estudo de caso no mercado de telecomunicações;
3. Criar um passo a passo de seu desenvolvimento;
4. Validar a aplicação dos gêmeos digitais através dos resultados encontrados;

1.2 JUSTIFICATIVA

Solução proeminente no futuro da indústria, saúde, segurança e cidades inteligentes, os gêmeos digitais destacam-se por serem de baixo custo operacional e alto retorno financeiro. Tema atual se torna ainda mais relevante quando entendida sua essencialidade perante a revolução tecnológica da Indústria 4.0 e *IoT*, diz Siemens (2021).

Conclui-se de Siemens (2021) que em países de primeiro mundo a necessidade por tecnologias de validação e manutenção preventiva transformou-se em realidade em muitos casos através do gêmeo digital. Um bom exemplo da aplicação de gêmeos digitais é através do sensoriamento em tempo real de processos fabris, permitindo decisões de prevenção e produção mais eficientes e rápidas.

Existem diversos usos para o gêmeo digital em especial tratando-se Indústria 4.0 e *IoT*, nestes casos os gêmeos se tornam imprescindíveis. Para além das aplicações citadas os gêmeos digitais se firmam no mercado como ferramenta precisa de validação, controle e simulação de projetos.

A realidade da indústria brasileira quando comparada à realidade de países de primeiro mundo ainda se encontra um pouco defasada, ainda mais quando o assunto é gêmeo digital. Contudo, não seria exagero pensar que do mesmo modo que a utilização desta tecnologia vem crescendo no exterior crescerá em terras nacionais. Essa propensão ainda se intensifica quando empresas multinacionais se adaptam a essa tendência.

Assim, desenvolver aplicações e soluções para empresas na área de gêmeos digitais é essencial para o crescimento em eficiência da indústria nacional.

De um ponto de vista de pesquisa com esse trabalho inicia-se na UTFPR-PG uma nova área de pesquisa, que se bem desenvolvida pode gerar o interesse

de empresas que buscam adaptar-se à realidade das novas tecnologias dentro da realidade nacional.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Buscando uma melhor compreensão da importância do tema abordado neste trabalho faz-se necessário abordar alguns temas mais amplos para então aprofundar no trabalho: gêmeos digitais e suas aplicações. Considerou-se como tema importante: o que são gêmeos digitais, contextualização de mercado, aplicações atuais e fotogrametria.

2.1 O QUE SÃO GÊMEOS DIGITAIS?

Para compreender o que são gêmeos digitais é interessante observar as tecnologias precessoras, deste modo fará-se uma breve contextualização dos métodos de produção.

Durante a segunda revolução industrial surgiram três grandes métodos de produção: o Taylorismo, o Fordismo e o Toyotismo. Cada um representava o modo pelo qual entendia-se como a produção industrial deveria caminhar. Destes três destacam-se dois por sua oposição o Fordismo, que buscava o máximo de produção independentemente da demanda, e o Toyotismo, que enfatizava a eficiência da produção buscando estoques mínimos.

Mesmo representando pontos opostos, tais métodos se formaram um a partir do outro. Em especial para o conceito de indústria 4.0, e, posteriormente, gêmeos digitais, o modelo Toyotista representa fundamental importância. A fábrica da Toyota, empresa que deu origem a esse método de produção e seu nome, dada sua realidade de escassez de matérias primas, teve de se adaptar para linhas de produção mais flexíveis (terceirização) e eficientes. Com o advento da terceira revolução industrial, a revolução da comunicação e dos meios de transportes, e intensificação da produção tal método, exemplo de sucesso no país do sol nascente, foi exportado para o resto do mundo. Isto segundo Costa ().

Como exemplo desta exportação do método de produção pode-se citar a empresa Boeing que em seus aviões produzidos possuem partes de 80 países diferentes, estes que só são produzidos sob demanda.

Seguindo neste caminho de produção cada vez mais eficiente tanto em custo,

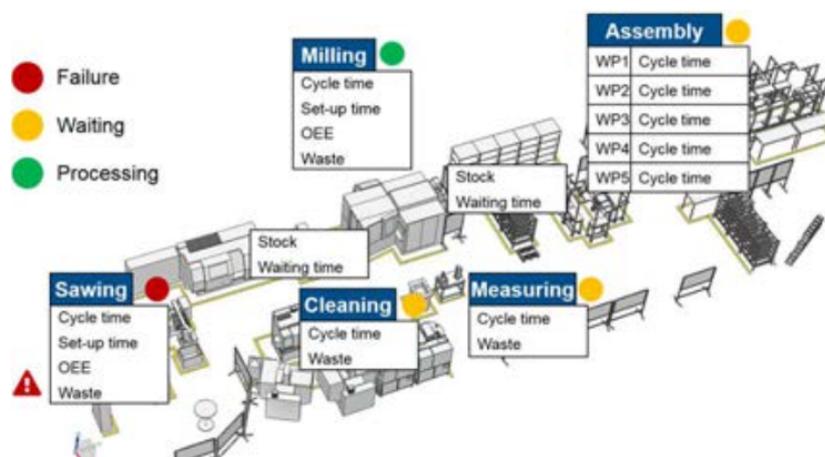
como em mão de obra quanto em qualidade insere-se a 4ª revolução industrial ou indústria 4.0. Esta por sua vez busca automatizar e inteligir todos os processos industriais, proporcionando em tempo real informações de produção e informações de demanda.

E para resolver essa demanda de monitoramento de dados de processos e produtos surgem os gêmeos digitais. Segundo Fuller et al. (2020) "A tecnologia de Gêmeo Digital é um conceito emergente que tem se tornado o centro das atenções para a indústria e, nos anos mais recentes, para a academia. Os avanços nos conceitos da indústria 4.0 tem facilitado seu crescimento, particularmente na indústria de manufatura. O Gêmeo Digital pode ser definido extensivamente, contudo é melhor descrito como a integração sem esforço de dados entre uma máquina física e virtual".

Seguindo o conceito de (FULLER et al., 2020) os gêmeos digitais não se limitam somente ao monitoramento de produtos como também de processos. Assim, o diagrama apresentado na 1 pode-se constatar um gêmeo digital simples de uma linha de manufatura, poderia-se considerar um gêmeo digital caso essas informações fossem somente de uma das máquinas ou processos.

Nota-se também que o modo que são demonstrados os dados permite a compreensão tanto de um leigo quanto de um técnico, essa nota demonstra uma característica importante dos gêmeos digitais que é a possibilidade de uma gestão mais simples tanto para o gestor administrativo quanto para o técnico.

Figura 1 – Gêmeo digital em tempo real de uma fábrica.



Fonte: Wank et al. (2016)

Infere-se do diagrama mostrado anteriormente que do uso deste gêmeo digital

permite a empresa algumas melhoras significativas abaixo listadas:

- Melhora na tomada de decisão: quanto mais atuais os dados retirados melhor pode ser feita as decisões de uma empresa.
- Fácil leitura: os gêmeos podem representar um processo complexo ou simples, porém irá dispor destes dados de modo de fácil acesso e leitura.
- Fidedignidade: os dados demonstrados dos gêmeos muitas vezes não são apenas um modelo, mas também a própria realidade representada.
- Previsibilidade e confiabilidade: cada processo e produto que é monitorado seu percurso é também muito mais previsível em seu estado futuro. E processos monitorados tornam-se mais confiáveis também.
- Entre outros que vão das idiossincrasias de cada aplicação.

Estes aspectos foram retirados de Eckhart e Ekelhart (2019).

Para além da aplicação industrial anteriormente descrita esta tecnologia tem tomado espaço em conceitos como cidades inteligentes e medicina. Cidades inteligentes são cidades capazes de se autogerir através do sensoriamento da mesma.

A ideia de gêmeos digitais como explicado existe desde início dos anos 2000, mas tornou-se mais conhecido em 2012 em virtude de um artigo publicado pela NASA (*National Aeronautical Space Administration*) intitulado "*The Digital Twin Paradigm for Future Nasa and U.S. Air Force Vehicle*". Posteriormente existiram algumas outras definições, visto que a definição dada pela NASA restringia a sua área de atuação.

E, para encerrar esta seção, o conceito de Fuller et al. (2020). Para ele, se os dados fluem entre um objeto físico para um objeto digital, e este fluxo está integrado nas duas direções então pode-se chamar de Gêmeo Digital. Uma mudança feita no objeto físico automaticamente leva a uma mudança no objeto digital e vice-versa, conclui Fuller et al. (2020).

2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DE MERCADO

Caso se questionasse qualquer empresa quanto sua necessidade de monitoramento de seus processos ou validação de projetos muito dificilmente ela negaria

essa demanda, nota-se isso pela crescente demanda do mercado GVR (2021). Contudo, diferem-se as disposições para gastos com tal informação de modo que uma empresa menor pode não dar tanto valor para o cálculo preciso da data de entrega de seu produto para seu cliente. Por outro lado, uma empresa multinacional sempre verá muito valor em uma estimativa precisa deste mesmo cálculo.

Deste ponto de vista a questão central é: qual o custo de um gêmeo digital? No geral este conceito na prática tem um custo baixo, seu valor deve-se principalmente aos sensores e ao trabalho intelectual. Observando que os custos dos sensores caíram significativamente e que muitas máquinas hoje produzidas já são integradas a certo nível de IoT a perspectiva de mercado tende somente a crescer.

Para corroborar com a afirmação anterior a *Grand View Research*, empresa focada em pesquisa de inteligência de negócios mais especificamente pesquisa de mercado, lançou seu relatório prevendo uma taxa composta de crescimento anual de 42,7% e alcançando um tamanho de mercado de 86,09 bilhões de dólares em até 2028.

De acordo com o relatório, um fator importante para esse crescimento foi a pandemia causada pelo vírus COVID-19. Fato é que para as empresas se adaptarem às normas sanitárias de distanciamento muitas empresas da área de saúde, agricultura e até mesmo o governo tiveram de adotar em menor ou maior grau essa tecnologia.

Destaca-se que o conceito aqui apresentado está intimamente ligado a conceitos como inteligência artificial, *machine learning*, IoT e *smart cities*, de modo que qualquer crescimento em um destes mercados representa um crescimento no mercado de gêmeos digitais.

Como expoente desta tecnologia no mercado existem algumas empresas: ABB, AVEVA Group plc, Dassault Systemes, General Electric, Hexagon AB, IBM Corporation, SAP. Todos os dados retirados de GVR (2021).

2.3 APLICAÇÕES ATUAIS

Se tratando de um tema tão amplo existem inúmeras aplicações de grande relevância, vale no entanto ressaltar a primeira e talvez mais famosa aplicação e utilização de gêmeos digitais: a missão Apollo 13. Logo após a saída da espaçonave da

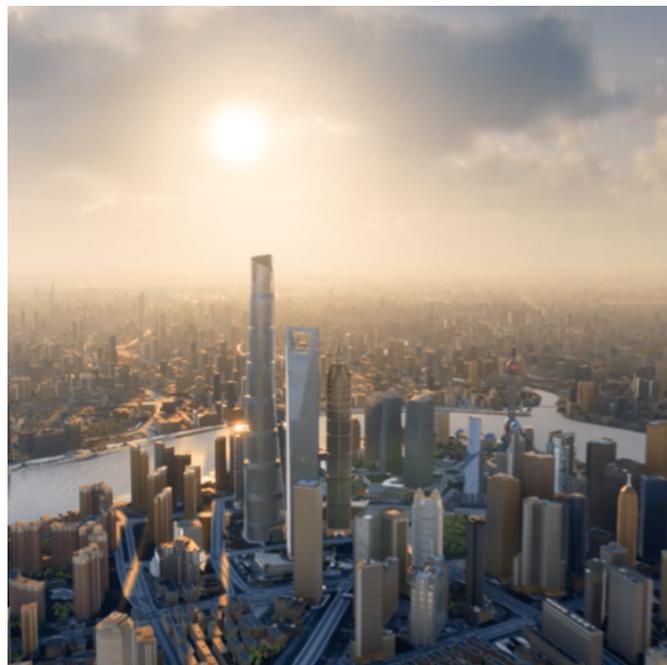
órbita terrestre o tanque de oxigênio explodiu e colocou em sérios riscos a vida dos três tripulantes. Sem um diagnóstico claro do que poderia ter ocorrido, os astronautas ficaram com as informações de apenas alarmes que disparavam.

Ao lado da agência espacial americana existiam 15 simulações puramente computacionais que a partir do acidente passaram a trabalhar em possíveis soluções. Assim, à medida que os tripulantes se comunicavam o modelo digital simultaneamente ia se atualizando e buscando possíveis soluções para evitar um desfecho trágico. Assim, com o esforço conjunto de inúmeros engenheiros e dos gêmeos digitais, os astronautas puderam chegar ao planeta azul sãos e salvos.

Deixando a corrida espacial de lado e observando as aplicações atuais pode-se observar algumas áreas proeminentes dos gêmeos digitais que serão citadas e exemplificadas.

Cidades inteligentes, do ponto de vista de gestão de uma cidade qual o valor de um trânsito mais fluido ou de um melhor planejamento urbano ou até mesmo da segurança desta? Sem dúvida alguma um valor altíssimo. É isto que se propõe a empresa 51world.

Figura 2 – Gêmeo digital de Shanghai.



Fonte: Savage (2020)

A empresa pretende fazer um gêmeo digital de toda cidade, hoje representado virtualmente já existem 4000 quilômetros quadrados da cidade de Shanghai que

serão usados para o planejamento inteligente da cidade. A empresa pretende manter atualizado o gêmeo através das cidades de sensores, satélites e drones.

Machine Learning, a principal ligação de gêmeos digitais com *Machine Learning* está justamente onde um começa o outro termina. Os gêmeos digitais podem ser um banco de dados para o aprendizado da máquina. Deste modo uma possível aplicação seria por exemplo a atualização da fase de construção de um prédio, onde um drone realiza a digitalização dos dados. E, a partir desse banco de dados atua o aprendizado de máquina. Resultando em um estado atual da construção, permitindo atuar na obra de acordo com a necessidade aferida.

Poucos conceitos estão tão intimamente interligados como a Inteligência das Coisas (*IoT*) e gêmeos digitais, estão tão ligados que foi justamente o aumento de sensoriamento para *IoT* que trouxe à tona os gêmeos digitais. Assim, de maneira oposta ao aprendizado de máquina, o gêmeo digital usa como base as informações da internet das coisas.

De um ponto de vista simples de explicar uma aplicação é uma empresa de máquinas de venda automática que estão conectadas à internet. A partir dessa base de dados alinhados à um gêmeo digital pode-se: prever a necessidade de reabastecimento, planejar o percurso mais eficiente a se percorrer, prever manutenções da máquina, entre outras possibilidades.

A Microsoft já desenvolveu uma plataforma para desenvolver gêmeos digitais conhecida como Microsoft Azure, que permite à empresa desenvolver um ambiente web seguro.

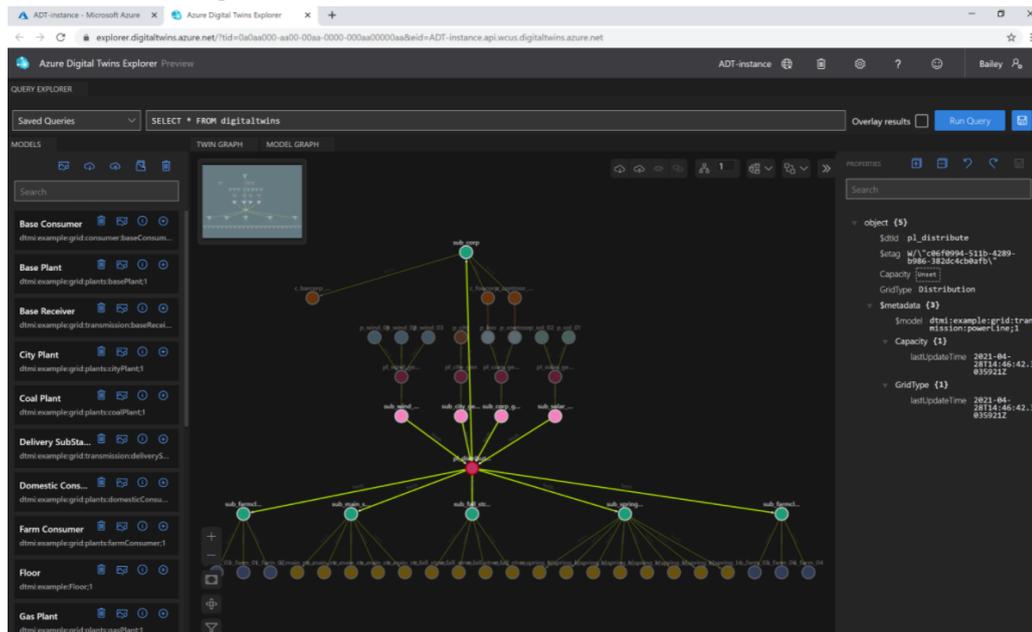
2.4 FOTOGRAMETRIA

O conceito mais simples de fotogrametria é explicado por sua raiz etimológica "medição através da luz". Academicamente falando fotogrametria é a ciência de extrair informações métricas de imagens, segundo Esmaeili e Thwaites (2016).

Apesar de não ser uma ciência nova a fotogrametria ainda não atingiu sua maturidade, afirma Esmaeili e Thwaites (2016), isto devido a superfícies refletoras, transparência em materiais, formas complicadas com pequenos componentes.

A fotogrametria pode chegar a uma precisão impressionante de 25 micrômetros é o que aponta o estudo de Dodson et al. (2009). A título de comparação, um fio

Figura 3 – Interface WEB Azure.

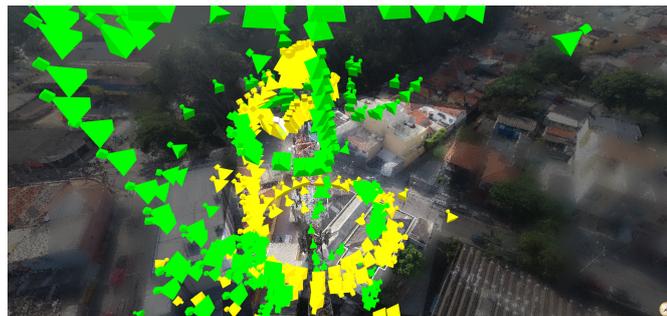


Fonte: Cite da Azure

de cabelo humano tem entre 60 a 120 micrômetros. Vale ressaltar que como método de metrologia seu requisito para que funcione são de ao menos duas fotos retiradas pontos de vistas diferentes com pontos semelhantes.

A aplicação de Dodson et al. (2009) foi em um instrumento de fusão por confinamento magnético, onde a precisão é alta. Contudo no geral as medidas realizadas por fotogrametria possuem alta precisão dependendo geralmente somente de poder computacional. Contudo aplicações mais recorrentes da fotogrametria está ligada a sua interação com drones, na 4 temos um exemplo onde cada frustum representa o local e inclinação que cada foto foi retirada durante um sobrevoo do drone sobre uma torre de telecomunicações. Onde cada ponto possui sua respectiva localização em UTM.

Figura 4 – Exemplo aplicado de fotogrametria.



Fonte: Autoria própria

Assim, para cada ponto dentro da nuvem de pontos geradas através da fotogrametria existe uma posição e uma cor atribuída. Deste modo qualquer medida métrica pode ser realizada, seja ela distância, posição ou volume.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Antes de desenvolver os materiais usados e seus métodos algumas escolhas das ferramentas usadas deve ser justificada, por isso o capítulo se inicia com uma revisão das ferramentas utilizadas.

3.1 REVISÃO DAS FERRAMENTAS USADAS

Buscando uma maior clareza quanto às ferramentas usadas para o desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso se fará uma revisão das ferramentas usadas. Deste modo, evitar-se-á futuras discussões quanto às escolhas de tais ferramentas.

Assim foram listadas todas ferramentas em ordem cronológica de uso durante a implementação do gêmeo digital: aquisição de dados brutos, conversão de dados em nuvem de pontos, transformação da nuvem de pontos em informação, exposição dessa informação para o produto final.

3.1.1 Captação de dados brutos

Para captação de dados, ou seja, a fonte de alimentação do gêmeo digital foi usado um drone com captação de fotos com resolução de 3840x2160p, popularmente conhecida como 4k.

A escolha de drone para captação de imagens é justificada através da precisão do voo perto do objeto de interesse, sendo possível também a automação do drone para o sobrevoo em cada site (site refere-se ao local onde se localiza a torre de transmissão e seus respectivos equipamentos).

O sensor usado para captação da realidade 3D desejada usou-se câmeras, assim através da comparação de pixel e interpolação de posição da foto capturada obtém-se a nuvem de pontos. Quando comparado com outros sensores no mercado, especificamente falando o lidar, o uso da fotografia se destaca principalmente por seu custo. Essa diferença existe em virtude de que lidares 3D têm seu custo muito elevado, e por outro lado ao realizar a compra de um drone este já vem com a câmera de alta resolução. Outro aspecto interessante é que o uso da câmera permite detecção de

material por cor, aspecto esse que o lidar ignora por não trabalhar no espectro visível.

Figura 5 – Drone utilizado para captação de dados.



Fonte: (INNOVATIONS,)

Para a transformação dos dados da câmera em qualquer tipo de malha ou nuvem de pontos faz-se necessário a comparação de imagens. Conclui-se disto que mesmo quando o arquivo bruto usado é um vídeo os dados usados são imagens, ou seja, cada frame do vídeo. Conseqüentemente, torna-se mais válido retirar fotos ao redor do objeto desejado, ao contrário de filmar um vídeo. Isto pois os frames do vídeo podem sofrer com a movimentação do drone, já por outro lado as fotos se tornam mais precisas uma vez que o drone sempre estabiliza antes de fotografar.

Assim, tanto do ponto de vista de futuras implementações ou evoluções e de precisão o uso de drones mais câmera se torna a opção mais viável financeiramente sem perder precisão.

O processo de captação destes dados brutos foi feito manualmente, em outras palavras, o sobrevoo do drone foi feito de modo manual sobre o site estudado.

3.1.2 Digitalização

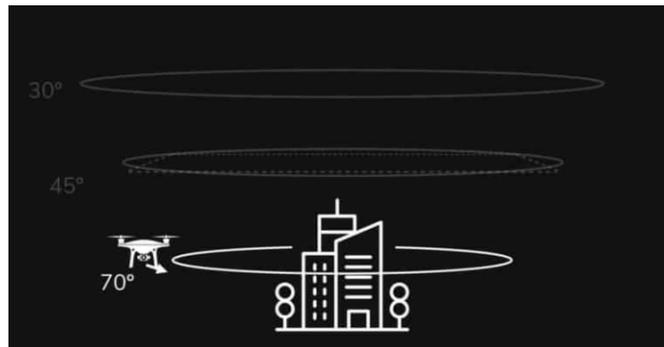
Uma vez sobre posse destas imagens capturadas no processo anterior 3.1.1 faz-se necessário agora digitalizar em uma nuvem de pontos ou em um malha 3D.

Tal como o ser humano consegue ter noção de profundidade a partir de dois pontos de visão diferentes, ao comparar duas imagens do mesmo local que possuam pontos em comum pode-se calcular matematicamente a distância e localização do ponto. Assim, subseqüentemente para pixel que possui correspondência em outra imagem pode-se gerar um ponto de acordo com a posição da câmera. Tal característica gera uma necessidade de 60 à 70% de redundância de uma imagem para um

resultado ótimo.

Para mais precisão das medidas recomenda-se 3 sobrevoos sobre a área ou objeto desejado. Tal como Doggett (2020) explica, o primeiro voo seria a uma distância média com angulação da câmera a 45° em relação a vertical, em seguida um voo a uma maior altitude com um ângulo menor de 30° em relação a vertical e por último um voo perto do objeto em 70° . Tal como mostra a figura

Figura 6 – Sobrevoos para melhor captura de dados.



Fonte: (DOGGETT, 2020)

Alinhado as fotos retiradas existe a localização geográfica da mesma, ou seja, todos os pontos gerados também são georeferenciados. Informação essa que dependendo da aplicação se torna de fundamental importância.

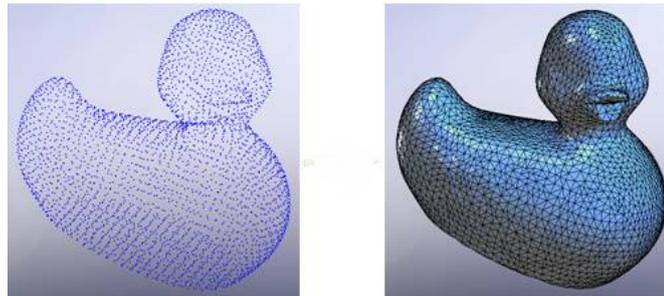
Existem uma série de empresas no mercado que trabalham com essa funcionalidade, são as mais conhecidas: Metashape, precisionhawk, Pix4d, DroneDeploy, Maps, simactive, autodesk, 3Dflow. Dentre elas, optou-se por usar Pix4D por sua versão gratuita.

3.1.3 Malhas ou nuvem de pontos

Como saída de dados destes *softwares* existem 2 opções: malhas(*meshes*) e nuvem de pontos. Visto de um ponto mais simplificado uma nuvem de pontos é o objeto 3D com somente os vértices e sua respectiva cor, ou seja, em seus dados existem apenas dados de localização de posição e dados de cor. Já uma malha além dos vértices possuem faces e arestas interligadas.

Para cada face de uma malha existem 3 pontos associados, e, ao contrário da nuvem de pontos as malhas geralmente possuem uma imagem 2D que tem por função dar a colorização da mesma. Essa imagem é chamada de textura da malha,

Figura 7 – Comparação malha e nuvem de pontos, à direita a nuvem de pontos e à esquerda a malha.



Fonte: (RAPPONOTTI; SNOWDEN; ZENG,)

que quanto mais detalhada forem as cores da malha maior será o arquivo.

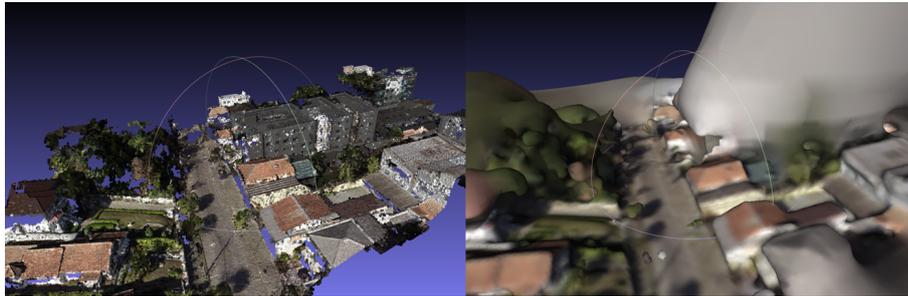
As malhas geradas são feitas através de reconstrução da nuvem de pontos geradas, e deste modo se considerar o mesmo número de vértices/pontos de uma malha e uma nuvem de pontos o tamanho da malha sempre será maior. Mesmo com a captação de fotos do site feita da melhor forma possível quando o processo de reconstrução da malha através da nuvem de pontos é feita muita informação se perde, visto que a nuvem de pontos não abriga informações de vetor normal levando a uma reconstrução em alguns pontos deficientes. Isto pode-se observar na figura 8, onde a ausência do vetor normal gera grande imprecisão na malha.

Já observando quanto à visualização 3D, ou seja, do quando demanda para a placa de vídeo expor essas informações no geral a nuvem de pontos é mais leve. Contudo é possível simplificar malhas sem perder muita informação da malha original, pois muitos pontos de uma malha são redundantes. Nesses casos de uma malha simplificada pode se tornar dezenas de vezes menos intensivo para o processamento.

Adiantando um pouco da secção seguinte, todo ambiente de *game engine* é desenvolvido para malhas. Deste modo toda otimização de renderização é feita visando a utilização de malhas e não de nuvem de pontos.

Conclui-se que em virtude da perda de informação ao reconstruir a malha pela nuvem de pontos, mesmo a nuvem não sendo muito otimizada para o usuário final, usou-se a nuvem de pontos para futuros modelamentos.

Figura 8 – Comparação malha reconstruída e nuvem de pontos. Nuvem de pontos à direita e malha reconstruída ao seu lado.



Fonte: Autoria própria

3.1.4 Ambiente de desenvolvimento do Gêmeo Digital

De um modo mais abrangente um gêmeo digital pode ser desenvolvido em inúmeras plataformas de programação, para inúmeras plataformas. Contudo dada a aplicação onde o ambiente de dados é 3D diminuem-se a plataformas que permitem a programação e dependendo da linguagem que se pretende mostrar o gêmeo pode-se limitar o ambiente.

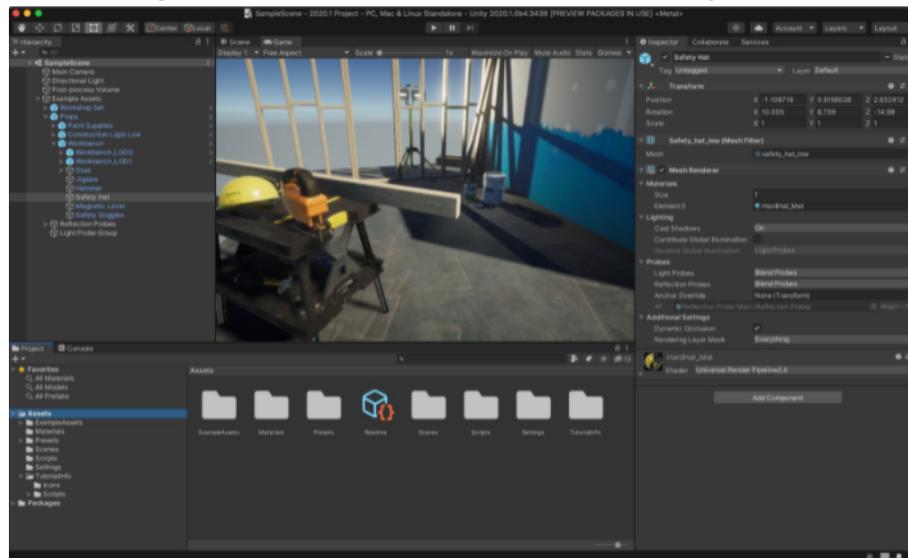
Exemplificando: opta-se usar a linguagem C para gerar o gêmeo. Por padrão ela não vem com um vasto suporte a ambientes 3D, nem tão pouco com grandes possibilidades WEB. Deste modo a escolha feita restringe a capacidade 3D do gêmeo como também onde o cliente poderá ver os dados.

Visando a maior abrangência de plataformas no qual o gêmeo pode estar e um amplo suporte ao ambiente 3D, optou-se por usar a engine de desenvolvimento de jogos Unity. Sua linguagem de programação é C#, e, por se tratar de *engine* é possível gerar executáveis compatíveis com a maioria das plataformas sejam elas windows, ios, android, web, entre outras.

Quando comparada com outras *games engines* o unity se destaca por sua customização quanto a criação de bibliotecas específicas na comunidade de desenvolvimento. A maior concorrente, Unreal Engine, é mais amigável àqueles que não tem noção de programação o que por outro lado também limita em partes a capacidade criativa em alguns usos específicos.

Como pode-se observar nas figuras 9 e 10 os ambientes de desenvolvimento são bem semelhantes. Na parte inferior tem-se a área dos arquivos e bibliotecas. No canto direito o inspetor de objetos, e, no Unreal o espaço superior direito existe

Figura 9 – Ambiente de desenvolvimento Unity.



Fonte: (UNITY...,)

Figura 10 – Ambiente de desenvolvimento Unreal.



Fonte: (ENGINE,)

também a hierarquia de objetos da cena. A hierarquia por sua vez no unity se encontra no canto esquerdo.

3.2 ESPECIFICIDADES DO CASE

A oportunidade de criação deste estudo de caso veio de uma necessidade da própria Accenture, empresa referência em gestão, consultoria, tecnologia da informação e terceirização. Esta empresa multinacional fornece serviços para grandes empresas de telecomunicações aqui no Brasil. E, algo que a própria empresa necessitava eram estes gêmeos digitais para principalmente validação de seus próprios dados.

Assim, a empresa Automa Vision foi contratada para fazer um POC (*Proof of Concept*), ou seja, uma prova de conceito de dois sites. Como premissa inicial o objetivo era localizar e classificar cada objeto existente na torre, e, após classificação e identificação comparar com o documento PPI (Projeto Preliminar de Instalação) existente de cada site.

Como resultado buscava-se encontrar incoerências tanto em número de objetos classificados, quanto em posição e modelo. Como resultado para a Accenture ela possuiria duas ferramentas: um aplicativo de gêmeo 3D e uma planilha com todas as coerências e incoerências. Isto pois o primeiro permite a empresa, que é terceirizada, vender mais uma solução em seu catálogo, enquanto o segundo é de mais simples verificação do site como um todo.

A partir do resultado com as devidas ações de melhoria feita se alcançará esses fatores:

- Melhora no sinal da empresa: com a correção das posições e rotações de cada antena.
- Redução de custo operacional: antes do gêmeo se fazia necessário um agente ir até o local do site e inferir as mudanças necessárias, passando por situações de periculosidade.
- Redução do custo em equipamentos: uma vez aferido uma antena ou unidade de processamento ausente, ou um modelo diferente.
- Noção da competição: muitos dos objetos encontrados em um site que não se encontram no PPI geralmente pertencem a uma empresa concorrente.

3.2.1 Objetos de interesse

Quais são os objetos da torre que são de interesse para a empresa contratante do gêmeo? Existem objetos ligados à estrutura e outros ligados ao processamento de sinal. Os primeiros são importantes para a empresa para confirmação de dados, já os segundos possuem são só os de maior importância.

Ligados a estrutura são:

- Altura do pára raios.

- Altura de cada lâmpada presente na torre.
- Contorno terreno.

Ligados ao sinal:

- RFs: sigla para Radio Frequência, é uma antena que opera em rádio frequência.
- RRU: sigla para *Remote Radio Unit*, tem por função processar dados para transmitir as RFs.
- Minilinks: são antenas de *feedback*, ou seja, antenas de confirmação de sinal.

Assim, todos esses objetos serão modelados no gêmeo 3D.

3.2.2 Informações de interesse

Uma vez definido quais são os objetos de interesse, faz-se necessário também definir quais informações são úteis para a empresa ter no gêmeo. Antes de decidir as informações que o gêmeo irá mostrar primeiramente recebeu-se as informações presentes no PPI, eram elas:

- Operadora: a qual operadora pertence cada objeto.
- Tecnologia: qual tecnologia do objeto.
- Frequência: a frequência de operação, dada em mega hertz.
- Função: classificação de RF, RRU e minilink.
- Modelo: modelo do objeto.
- Dimensões: dimensões do objeto, dada em milímetros.
- Altura: altura em relação ao chão da torre, dada em metros.
- Azimute: rotação em relação ao norte, dada em graus.
- Tilt mecânico: rotação em relação ao eixo vertical, dada em graus.
- Observação: estado atual.
- AEV total: área de exposição ao vento, dada em metros quadrados.

Assim, independentemente das informações do gêmeo estas devem estar presentes no mínimo para comparação. Entretanto existem algumas informações que não são possíveis de se retirar apenas do gêmeo, o que por um lado pode ser um caminho futuro para se implementar o gêmeo e por outro são aspectos muito difíceis de se aferir apenas com a visualização digital 3D.

As informações possíveis de se comparar e aferir são: todas informações ligadas a posição e rotação do objeto, a existência ou não existência de um objeto na torre e modelo da antena existente. E algumas mais como o estado físico da antena. Mais especificamente as informações possíveis de se aferir e comparar com o real são:

- Posição do objeto em UTM.
- Altura do chão em metros.
- Dimensões em milímetros.
- Tilt mecânico em graus.
- Azimute em graus.
- AEV em metros quadrados.
- Estado externo do objeto.

3.3 MODELAMENTO E PROGRAMAÇÃO

Como resultado da digitalização das imagens retiradas do site de interesse, possui-se a nuvem de pontos sobre o qual será construído o gêmeo digital. Primeiramente, faz-se necessário fazer o modelamento dos objetos de interesse como objetos primitivos como esferas, cones, cilindros e cubos. Após isto foram implementadas todas as funcionalidades de um gêmeo através da programação.

Antes de entrar profundamente nos conceitos de modelamento e programação faz-se necessário uma introdução mais descritiva do funcionamento do Unity.

3.3.1 Objetos, scripts e colisões no Unity

O Unity trabalha com sistema de *GameObjects*, ou seja, todo e qualquer objeto presente na cena é um *GameObject*. E, alinhado a todo *gameobject* sempre um

componente chamado transform que contém a posição, rotação e escala do gameobject.

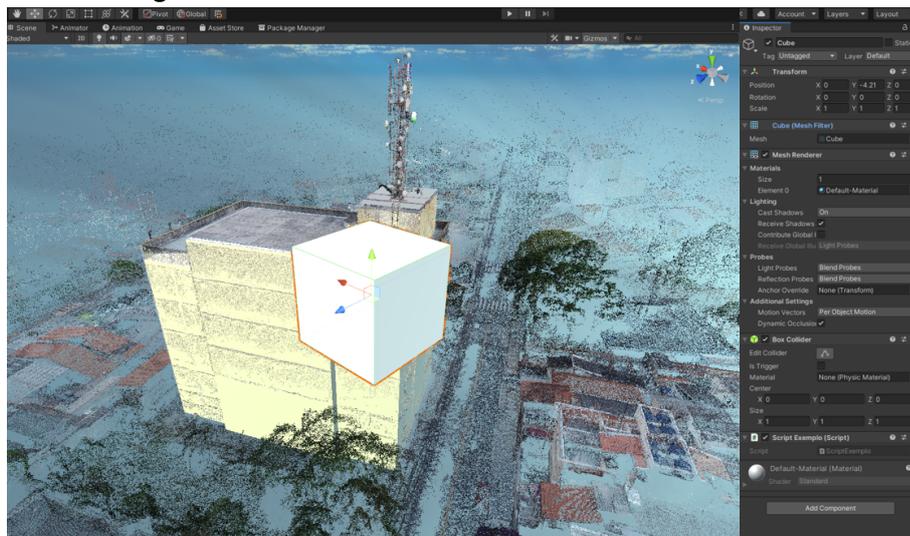
Para além deste componente essencial existem inúmeros outros, mas irá-se dar atenção a quatro: *Mesh Filter*, *Mesh Renderer*, *Mesh Collider* e *Scripts*. Estes serão componentes importantes para explicar o funcionamento do código e do modelamento. Todos esses componentes estão visíveis na figura 11, no canto direito.

O *Mesh Filter* é o componente responsável por receber os dados da malha, em outras palavras, recebe os dados de vértices, faces e arestas.

O *Mesh Renderer* é o componente responsável por tornar a malha visível à câmara do programa, e deste modo é nela onde se atribui o material da malha.

O *Mesh Collider* é o componente responsável por definir se o objeto detectará colisões sejam elas físicas ou não. Físicas ou não, pois uma caixa pode ter apenas a função de ser o gatilho de alguma função.

Figura 11 – Cubo.



Fonte: Autoria própria

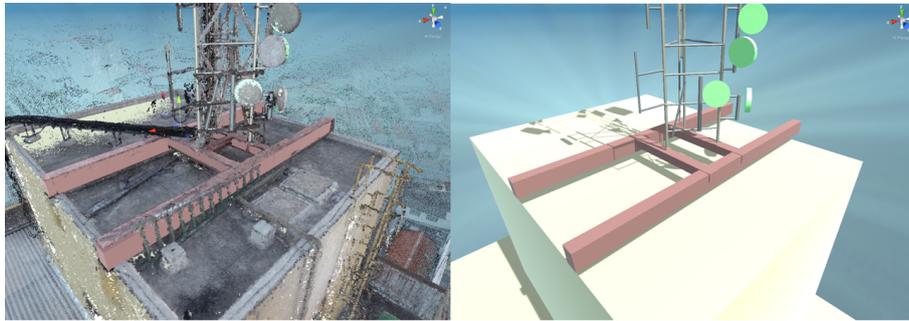
O *Script* é a parte do código propriamente dito, é onde todos os comportamentos do programa são feitos. Como dito anteriormente os scripts do unity usam a linguagem C#, que é voltada a objetos. Assim, é possível que múltiplos *scripts* sejam executados ao mesmo tempo.

3.3.2 Modelamento

A partir de algumas ferramentas do unity é possível modelar cada objeto da torre de telecomunicações, para tanto alterando sua propriedades no *transform* do objeto. Para o modelamento têm-se como referência os pontos da nuvem de pontos.

O modelamento dos objetos de interesse como definido anteriormente na seção 3.2.1 é feito com alta precisão. Apesar do modelamento disponível no Unity não ser tão preciso para grandes estruturas longas como a própria torre de metal, pode-se também modelá-la como foi feito mais a título de melhor visualização.

Figura 12 – Modelamento a partir da nuvem de pontos.



Fonte: Autoria própria

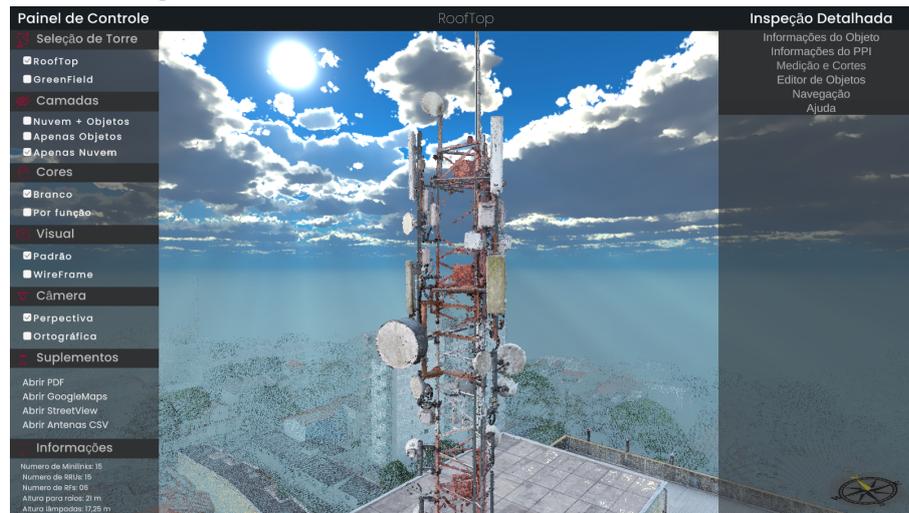
Como pode-se observar na figura 12 os objetos são modelados incluindo os suportes de base, o edifício e os suportes menores de fixação. Isto pois futuramente antes de fazer a instalação de uma antena na torre pode-se verificar, por exemplo, como ficará sua posição e rotação.

3.3.3 Programação

Como existe um número grande de *scripts* não será explicado cada um deles, mas sim as funções que representam para o usuário. Isto pois só um dos scripts existentes no programa possui mais de 2000 linhas de código, o que estenderia mais do que o necessário o presente trabalho. Apresenta-se na figura 13 algumas funções da interface do usuário.

O programa é visto da perspectiva de uma câmera que se movimenta simulando um drone, podendo também ser movimentada de um modo mais amigável ao usuário com sua rotação sempre focando o centro da torre.

Figura 13 – Interface do usuário.



Fonte: Autoria própria

Existem 3 grandes área de importância na interface:

- Painel superior: na parte superior da UI encontra-se os botões com a função de mostrar e esconder os painéis esquerdo e direito. Cada um representando respectivamente o painel de controle e inspeção detalhada. E ao centro existe o nome do site exposto.
- Painel esquerdo: no lado esquerdo da UI encontra-se o painel de controle cujas funções estão ligadas à configurações de preferência de usuário.
- Painel direito: no lado direito da UI encontra-se o painel de inspeção detalhada cujas funções estão ligadas a ferramentas e informação detalhada dos objetos de interesse do gêmeo digital.

Começando pelo painel de controle, dentro dele existem 7 abas são elas:

- Seleção de torre: permite ao usuário selecionar o site que necessita acessar.
- Camadas: permite ao usuário selecionar o modo de visualização de acordo sua necessidade e de acordo com a capacidade de sua máquina. O modo com apenas objetos é o modo menos intensivo para o computador, já a nuvem mais objetos o mais intensivo.
- Cores: possibilita a visualização dos objetos importantes de acordo com sua função. Por padrão o material é branco quando possui correspondência no PPI e vermelho quando não possui.

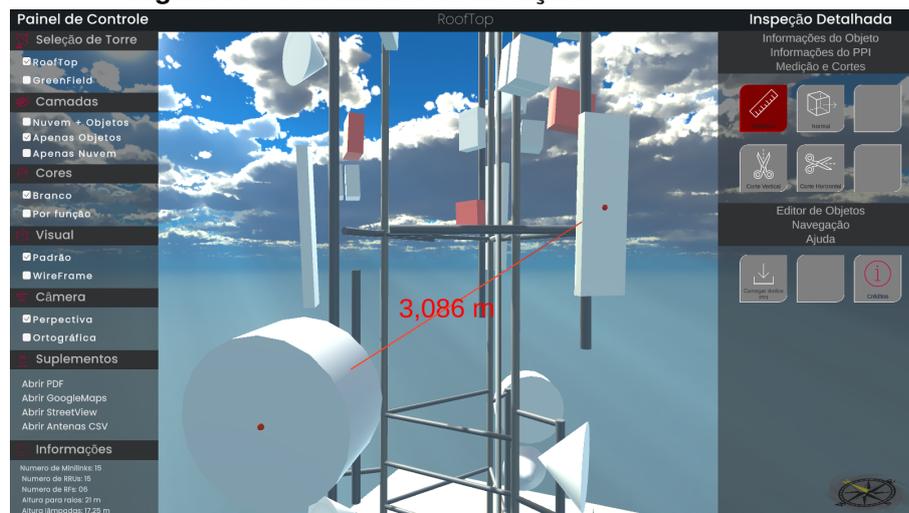
- Visual: permite ao usuário ver o contorno dos objetos de um modo destacado.
- Câmera: permite ao usuário escolher o modo pelo qual a câmera vê a cena, em outras palavras, se quer uma visão isométrica(ortográfica) ou em perspectiva.
- Suplementos: permite ao usuário acessar algumas informações presentes fora do programa como o PPI, google maps, google streetview e o banco de dados do site.
- Informações: mostra ao usuário informações gerais do site selecionado. Destaque para os objetos de interesse que estão ligados a estrutura, discutidos na seção 3.2.1.

No painel de inspeção detalhada é onde é possível ver as informações do gêmeo, do PPI e também a confrontação. Além destes painéis existem outros ligados a edição de objetos e navegação que serão abordados superficialmente.

- Informações do Objeto, todas essas informações são as calculadas pelo gêmeo.
 - Nome do objeto: nome de identificação do gêmeo.
 - AEV: área de exposição ao vento calculado pelo gêmeo.
 - Posição UTM: posição do objeto calculado pelo gêmeo.
 - Altura do chão: altura em relação à base da torre calculada pelo gêmeo.
 - Profundidade: dimensão de posição dada pelo modelamento.
 - Largura: dimensão de posição dada pelo modelamento.
 - Altura: dimensão de posição dada pelo modelamento.
 - Tilt mecânico: dimensão de rotação dada pelo modelamento.
 - Azimute: dimensão de rotação dada pelo modelamento.
 - Foto do objeto: foto do objeto selecionado. Pode-se clicar na imagem para vê-la com mais detalhes.
- Informações do PPI, todas essas informações são dadas pelo PPI.
 - Estatus: resultado da comparação do gêmeo digital com o PPI.

- No mais repetem-se as informações discutidas anteriormente na seção 3.2.1.
- Medições e cortes.
 - Distância: dados dois cliques em locais diferentes desenha uma linha mostrando a distância absoluta, tal como é possível visualizar na figura 14.

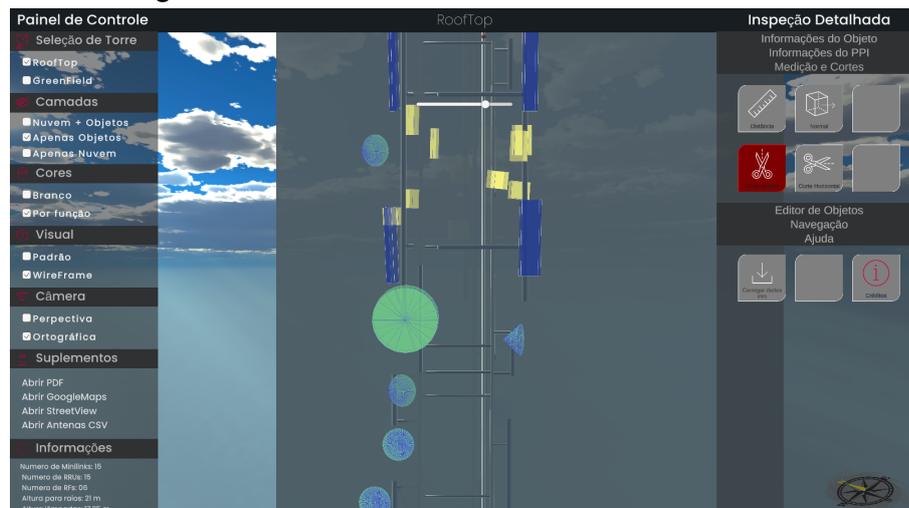
Figura 14 – Ferramenta de medição.



Fonte: Autoria própria

- Normal: calcula o vetor normal de um clique em uma superfície.
- Corte vertical: cria um plano de corte vertical no centro da torre que permite ser rotacionado. Quando usado em conjunto com a visão ortográfica torna-se uma ótima ferramenta de *blueprint*.
- Corte horizontal: cria um plano de corte horizontal na base da torre que permite ser elevado. Quando usado em conjunto com a visão ortográfica e movimentação livre torna-se uma ótima ferramenta de *blueprint*.
- Editor de objetos.
 - Adicionar: adiciona um novo objeto.
 - Deletar: deleta objeto selecionado.
 - Mover: move a localização do objeto selecionado.
 - Rotacionar: rotaciona o objeto selecionado.
 - Escalar: aumenta ou diminui a escala do objeto selecionado.

Figura 15 – Ferramenta de corte vertical.



Fonte: Autoria própria

- Voltar: volta um estado anterior de edição.
- Navegação, opções de navegação.
 - Movimentação fixa: a movimentação fixa mantém a rotação no eixo vertical sempre centrada no centro da torre.
 - Movimentação livre: torna a movimentação da câmera semelhante a de um drone.
 - Mais velocidade: aumenta a velocidade de movimentação.
 - Menos velocidade: diminui a velocidade de movimentação.
- Ajuda, painel de ajuda ao usuário.
 - Carregar dados PPI: carrega informações da planilha de informações com dados do PPI.
 - Créditos: mostra painel de informações da versão e informações da empresa.

Grande parte das funcionalidades propostas e desenvolvidas são secundárias para o gêmeo em si, desenvolverá-se então a principal funcionalidade que é a comparação de dados do PPI e do gêmeo.

Uma vez feito o modelamento da malha que representa o objeto de interesse é inserido nele um componente *script*, este componente é responsável por calcular

todas as informações de seu correspondente objeto. Estes cálculos são feitos na rotina de inicialização do programa. Uma vez calculada as informações necessárias o programa roda uma rotina de salvar esses dados em um arquivo separado no formato csv.

Realiza-se externamente então em uma planilha automática a comparação dos dados do PPI com os dados salvos pelo gêmeo digital. Uma vez feita a comparação, então o gêmeo lê tanto os dados do PPI como o resultado na forma de estatus. Para isso é necessário ir na aba de ajuda e carregar os dados do PPI.

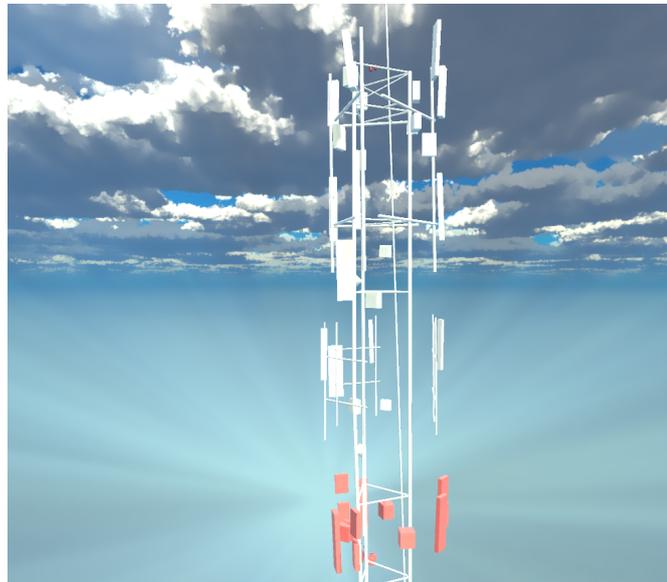
Uma vez realizado o processo de carregar os dados do PPI, toda vez que o usuário clicar em um objeto da torre ele ficará em destaque e todos os dados mostrados nos painéis de informações serão deste respectivo objeto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Enquanto resultado nada salta mais aos olhos da parte interessada, neste caso a empresa, do que os resultados que não batem do teórico com a realidade, conseqüentemente, serão apresentados dois casos ondem o gêmeo se mostrou efetivo em esclarecer e apontar possíveis falhas.

Como resultado geral apresenta-se o número de objetos que foram encontrados no gêmeo e não foram no PPI. Tal como explicado anteriormente foram feitos dois sites neste estudo de caso, um chamado de GreenField outro de RoofTop.

Figura 16 – Classificação quanto a existência torre GreenField.

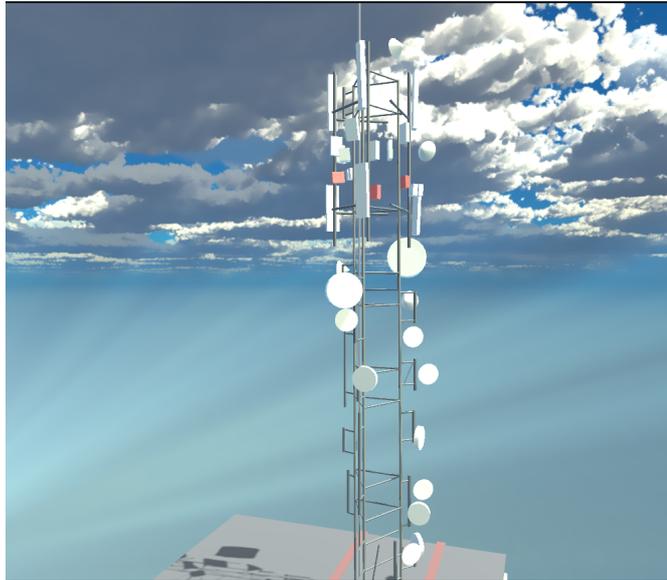


Fonte: Autoria própria

Observa-se nas figuras 16 e 17 os resultandos. Na torre Rooftop foram encontrados 3 RRUs que não consta no PPI. Já na torre Greenfield 18 objetos, sendo eles: 14 RRUs, 3 RFs e 1 minilink. No caso do site Rooftop concluiu-se que são RRU que não estão presentes no PPI e é importante que esteja. No segundo caso compreendeu-se que provavelmente são elementos de outra operadora que não foram adicionados no PPI.

Explicita um caso onde pode-se ganhar uma qualidade de sinal, vide figura 18. Como o ângulo de azimute é o ângulo da antena em relação ao norte e como essas antenas podem tanto enviar sinal diretamente para outras antenas de outros sites como para o usuário final então em ambos os casos uma vez corrigido esse

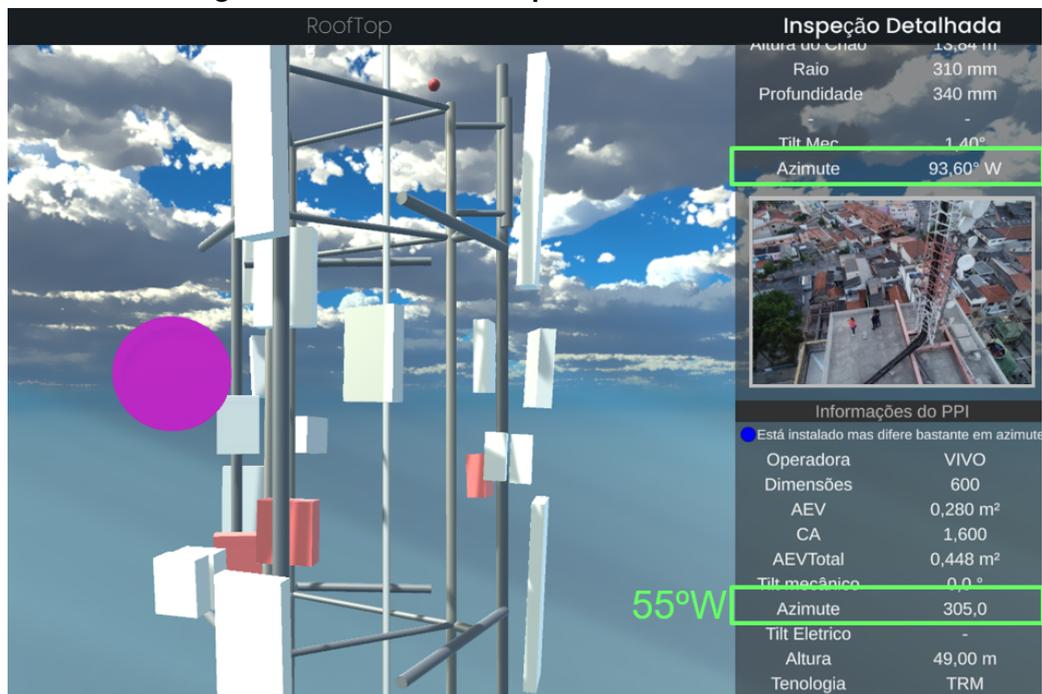
Figura 17 – Classificação quanto a existência torre RoofTop.



Fonte: Autoria própria

ângulo.

Figura 18 – Minilink Rooftop.



Fonte: Autoria própria

O cálculo do azimute do PPI é feito sempre em sentido horário de modo que os 305° mostrados equivale a 55°W. Deste modo observa-se uma diferença de cerca de 40°, isso pode representar que foi feita alguma alteração para o minilink apontar para outra antena e os dados no PPI não foram atualizados, ou mesmo, menos provável,

um possível erro de posicionamento levando uma perda financeira para empresa.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este trabalho se propôs a fazer uma revisão dos temas abordados por ele, visto que muito do que se tratou pouco se conhece e se aplica em terras nacionais. Além disto, tratando-se de um tema complexo, propôs a explicitar de forma didática os passos e decisões seguidas no desenvolvimento do gêmeo digital. E, como resultado alcançado encontrou uma série de possíveis ganhos financeiros e de possíveis melhoras de sinal para a empresa.

Revisou-se de forma clara as ferramentas usadas e seus respectivos prós e contras, buscando tornar o gêmeo uma ferramenta simples e completa para o usuário final. Explicitou-se o motivo da escolha do uso de fotos ao contrário de um sensor lidar, para captação da realidade 3D. Justificou-se o modo de captura do drone bem como o software usado para transformar as fotos em nuvem de pontos. Após isto discutiu-se o motivo de escolher o formato de nuvem de pontos como também a escolha do ambiente de desenvolvimento do gêmeo. E, por fim, como foram escolhidas as informações e objetos importantes para o gêmeo digital, bem como seu desenvolvimento.

Portanto conclui-se que este trabalho alcançou os objetivos propostos em sua introdução como também desperta em seu desenvolvimento uma área inexplorada no ambiente acadêmico da UTFPR-PG de grande importância para sociedade.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Analisando o trabalho e observando o futuro dos gêmeos digitais destaca-se a automação de alguns processos, o principal deles sendo o modelamento 3D a partir da nuvem de objetos. Deste modo ter a capacidade de identificar o modelo do RF, RRU ou Minilink dado uma nuvem de pontos é o maior e mais importante passo a ser dado.

Para além disto a automação do próprio drone para capturar a torre representa um grande ganho de confiabilidade na nuvem de pontos feita, de modo que não seja mais necessário um operador capacitado para operar o drone.

REFERÊNCIAS

COSTA, Ricardo Dalla. Modelos produtivos industriais com ênfase no fordismo e toyotismo: o caso das montadoras paranaenses. **Revista Eletrônica da FEATI—Faculdade de Educação, Administração e Tecnologia de Ibaiti**. Citado na página 14.

DODSON, T. et al. Advantages of high tolerance measurements in fusion environments applying photogrammetry. In: **2009 23rd IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

DOGGETT, Stetson. **Aerial photogrammetry - create 3d models with drone photos**. Dronegenuity, 2020. Disponível em: <<https://www.dronegenuity.com/aerial-photogrammetry/>>. Citado na página 24.

ECKHART, Matthias; EKELHART, Andreas. Digital twins for cyber-physical systems security: State of the art and outlook. **Security and Quality in Cyber-Physical Systems Engineering**, Springer, p. 383–412, 2019. Citado na página 16.

ENGINE, Unreal. **Unreal Engine Products**. Unreal. Disponível em: <<https://www.unrealengine.com/en-US/unreal>>. Citado na página 27.

ESMAEILI, Human; THWAITES, Harold. Virtual photogrammetry. In: **2016 22nd International Conference on Virtual System Multimedia (VSMM)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 19.

FULLER, Aidan et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. **IEEE Access**, v. 8, p. 108952–108971, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

GVR. **Digital Twin Market Size, Share Trends Analysis Report by End-use**. California, USA, 2021. GVR-2-68038-494-9. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-twin-market?utm_source=prnewswire&utm_medium=referral&utm_campaign=ICT_18-May-21&utm_term=digital-twin-market&utm_content=rd1>. Citado na página 17.

INNOVATIONS, Da-Jiang. **Phantom 4 Pro V2.0 - DJI**. DJI. Disponível em: <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=eol_phantom-4>. Citado na página 23.

RAPPONOTTI, Brett; SNOWDEN, Michael; ZENG, Allen. **Point cloud to Mesh project proposal FOR Cs184 - brett Rapponotti, Michael Snowden, and Allen Zeng**. Disponível em: <<https://cs184team.github.io/cs184-final/>>. Citado na página 25.

SAVAGE, Adam. **How China Cloned Shanghai**. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.theb1m.com/video/how-china-cloned-shanghai>>. Citado na página 18.

SIEMENS. **Gêmeos Digitais O Futuro da Indústria**. 2021. Media Lab Estadão. Disponível em: <<http://patrocinados.estadao.com.br/siemens/digitalizacao/gemeos-digitais-o-futuro-da-industria/>>. Citado na página 12.

UNITY 2020.1b. Unity. Disponível em: <<https://unity3d.com/pt/beta/2020.1b>>. Citado na página 27.

WANK, Andreas et al. Using a learning factory approach to transfer industrie 4.0 approaches to small- and medium-sized enterprises. **Procedia CIRP**, v. 54, p. 89–94, 2016. ISSN 2212-8271. 6th CIRP Conference on Learning Factories. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711630525X>>. Citado na página 15.