



Digital Twin – Um aliado da simulação à melhoria contínua industrial

Ana Carolina Oliveira da Silva

UMinho | 2024

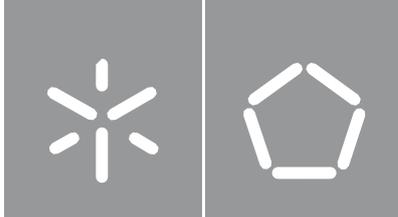


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Carolina Oliveira da Silva

***Digital Twin – Um aliado
da simulação à melhoria
contínua industrial***

Janeiro de 2024



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Ana Carolina Oliveira da Silva

***Digital Twin* – Um aliado da simulação
à melhoria contínua industrial**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Sistemas

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Luís Miguel da Silva Dias

Janeiro 2024

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Não foi uma jornada fácil, no meio de trabalho, amigos, crises mundiais e família, consegui concluir um pequeno pedaço da minha carreira acadêmica.

Agradeço todas as horas disponibilizadas por parte dos contribuintes para este trabalho.

Women in STEM.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A tecnologia gémeo digital (GD) tem sido cada vez mais procurada para colmatar problemas atuais em diversas áreas, mas primordialmente para o diagnóstico e previsão do estado futuro. Através do *digital twin* é possível criar uma ponte sólida entre o mundo virtual e o mundo físico, bem como potenciar a cada dia uma análise mais automatizada de dados em momento real. Porém, construir um gémeo digital não é tarefa fácil, pois requer um elevado conhecimento de diversas tecnologias complexas e não existe uma definição consensual para o termo na comunidade científica.

A presente dissertação foi elaborada em contexto de investigação da literatura, com um pequeno caso de estudo que demonstra parte de uma das inúmeras possibilidades de aplicação e foi realizada no âmbito do último semestre do Mestrado de Engenharia de Sistemas da Universidade do Minho (UMinho).

A autora não se compromete à criação de um GD, mas sim à elaboração do modelo virtual e a sua integração com a base de dados. Através da integração de sensores no mundo físico e da recolha dos seus sinais para a base de dados implementada, fica definido um caminho para o fluxo de informação nos dois sentidos.

O modelo de simulação foi elaborado no *Simio* e a base de dados no *Microsoft Azure*.

Palavras-chave: Gémeo Digital, Simulação, Base de Dados, Indústria 4.0, Rota de Resíduos

Abstract

Digital twin (GD) technology has been increasingly in demand to solve current problems in various areas, but primarily for diagnosing and predicting future states.

However, building a digital twin is no easy task, as it requires a great deal of knowledge of various complex technologies and there is no agreed definition of the term in the scientific community. This dissertation was written in the context of literary research, with a small case study that demonstrates part of one of the countless application possibilities and was carried out in the final semester of the Master's Degree in Systems Engineering at the University of Minho (UMinho).

The author does not undertake to create a DG, but rather to develop the virtual model and integrate it with the database. By integrating sensors into the physical world and collecting their signals for the implemented database, a path is defined for the flow of information in both directions.

Keywords: Digital Twin, Simulation, Database, Industry 4.0, Waste Route

Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas.....	xi
Siglas e Acrónimos.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	1
1.2 Objetivos e Resultados Esperados.....	2
1.3 Metodologia de Investigação.....	2
1.4 Estrutura da Dissertação.....	4
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Produção lean.....	5
2.1.1 Conceitos TPS.....	5
2.1.2 Melhoria Contínua.....	7
2.2 Indústria 4.0.....	8
2.3 Simulação.....	10
2.3.1 Introdução à Simulação.....	11
2.3.2 SIMIO.....	11
2.4 Gémeo Digital.....	13
2.4.1 Paradigma Gémeo Digital.....	15
2.4.2 Arquitetura do Gémeo Digital.....	17
2.4.3 Desafios e utilização do Gémeo Digital.....	22
2.4.4 Gémeo Digital aliado à Produção Inteligente.....	24

2.4.5	Integração de um Gémeo Digital.....	28
3.	Sistema de recolha de resíduos na produção de componentes eletrónicos	30
3.1	Gestão de Resíduos.....	30
3.2	Aplicação de um Gémeo Digital ao Sistema de Gestão de Resíduos.....	31
3.3	Análise da rota de resíduos a contemplar.....	32
3.4	Principais componentes e fontes de dados para a criação do gémeo digital.....	33
4.	Implementação de um <i>digital twin</i> na monitorização da recolha de resíduos.....	35
4.1	Definição do Objetivos e do Âmbito do Projeto	35
4.2	Criação do protótipo	35
4.3	Construção do Modelo.....	37
4.3.1	Controlo do sistema através de variáveis	41
4.3.2	Conceção de processos	42
4.3.3	Interação com o utilizador	46
4.4	Integração da Base de Dados no Modelo de Simulação.....	46
4.4.1	Criação da Base de Dados no <i>Microsoft Azure</i>	47
4.4.2	Orientação da Simulação aos Dados.....	49
4.4.3	Criação das Tabelas na Base de Dados	54
4.4.4	Teste de Simulação.....	56
4.4.5	Integração com o <i>Microsoft Power BI</i>	59
5.	Conclusão.....	60
5.1	Sinopse do Trabalho Elaborado e Utilidade	60
5.2	Limitações	61
5.3	Apreciação Final.....	61
	Referências Bibliográficas	62

Índice de Figuras

Figura 1 - Ciclo investigação-ação (Adaptado de Koshy, 2005).....	3
Figura 2 - Alicerces de um sistema de produção Toyota (da UC de Lean do MES, 2023).....	6
Figura 3 - Metodologias associadas a melhoria contínua e respetivas características (Desenvolvido pela autora com base em Bhuiyan & Baghel, 2005).....	7
Figura 4 - Parâmetros da cadeia de abastecimento de uma rede ciberfísica (Tradução de Autili et al., 2012).....	9
Figura 5 - Fases de implementação de um gémeo digital, de acordo com informação presente no Website do <i>Simio</i>	12
Figura 6 - Paradigma Gémeo Digital (Semeraro et al., 2021)	17
Figura 7 - Modelo Digital, Sombra Digital e Gémeo Digital (Kritzinger et al., 2018)	17
Figura 8 - Arquitetura de um gémeo digital na camada ciber (Ashtari Talkhestani et al., 2019).	18
Figura 9 - Arquitetura de segurança de um gémeo digital (Gehrmann & Gunnarsson, 2020)	20
Figura 10 - Níveis de aplicação do gémeo digital na indústria produtiva	26
Figura 11 - Interação entre os gémeos digitais do produto e do processo (Onaji et al., 2022) ...	26
Figura 12 - Integração de um modelo ciberfísico numa fábrica (Y. Cheng et al., 2018).....	29
Figura 13 - Processo de tratamento de resíduos interno a uma organização	30
Figura 14 - Layout com as diferentes rotas de resíduos (Elaborado pela autora, 2023)	32
Figura 15 - Esquema representativo do sistema a elaborar (Elaborado pela autora,2023)	35
Figura 16 - Interface do software SIMIO.....	36
Figura 17 - Três entidades que representam os resíduos das três zonas	37
Figura 18 - Propriedades da chegada de resíduos a um caixote resíduos	38
Figura 19 - Propriedades da entrada de caixotes e modelação da zona de despejo de resíduos	38
Figura 20 - Número máximo de resíduos que cada caixote acomoda	39
Figura 21 - Depósito de resíduos.....	39

Figura 22 - Propriedades lógicas do transporte.....	39
Figura 23 - Tabela de Sequência da Rota de Recolha	40
Figura 24 - Propriedades do veículo	40
Figura 25 - Legenda do número de entidades presentes no veículo.....	40
Figura 26 - Número de resíduos presentes no caixote que demanda a recolha do mesmo	41
Figura 27 - Tabela de relação entre a condição e os eventos de recolha e espera de caixotes ..	41
Figura 28 - Definição lógica do processo do Caixote 3 resíduos.....	42
Figura 29 - Processos de controlo da quantidade de resíduos.....	43
Figura 30 - Sensores que monitorizam o nível de resíduos em caixote	43
Figura 31 - Gatilho do processo complementar de entrada de entidades no output do Caixote .	44
Figura 32 - Processo de direcionamento das entidades	44
Figura 33 - Processo de recolha dos caixotes (Captura do Software)	45
Figura 34 - Processos de controlo da rota do veículo	45
Figura 35 - Processos para a criação de caixotes.....	45
Figura 36 - Tabela Caixotes.....	46
Figura 37 - Zona1_1 <i>server</i>	46
Figura 38 - Servidor da base de dados	47
Figura 39 - Autenticação do servidor	47
Figura 40 - Criação da base de dados "SimioResultsDB" no servidor "carolsim"	48
Figura 41 - Conexão entre o <i>Azure Data Studio</i> e a base de dados "SimioResultsDB".....	48
Figura 42 - Variáveis de armazenamento para a tabela de resultados	50
Figura 43 - Adição de resíduos às variáveis de armazenamento do valor de resíduos à saída das zonas.....	50
Figura 44 - Criação de uma tabela <i>output</i>	51
Figura 45 - Processos de adição de linhas à tabela "Output_Zonas"	51

Figura 46 - Adição de carregamentos às variáveis de armazenamento do carregamento dos caixotes.....	52
Figura 47 - Processos de adição de linhas à tabela “Output_Carregamento”	53
Figura 48 - Adição de caixotes de um tipo à variável destinada	53
Figura 49 - Processos de adição de linhas à tabela “Output_Depositos”	54
Figura 50 - Tabela "ResultadosZonas" no <i>Azure Data Studio</i>	55
Figura 51 - Tabela "ResultadosCarregamento" no <i>Azure Data Studio</i>	55
Figura 52 - Tabela "ResultadosDeposito" no <i>Azure Data Studio</i>	55
Figura 53 - Categoria “Report Turnos”	56
Figura 54 - Conector “DBConnect_SimioResultsDB”	56
Figura 55 - Modelo <i>Facility</i> da Rota de Resíduos	57
Figura 56 - Tabelas de <i>output</i> do simulador.....	57
Figura 57 - Visualização dos dados nas tabelas do <i>Azure Data Studio</i> extraídas do <i>Simio</i>	58
Figura 58 - Conector de importação dos dados da <i>BDAzure</i> ao <i>Simio</i>	58
Figura 59 - Tabela “Input_Teste”	59
Figura 60 - <i>Dashboard</i> da Análise da Rota de Resíduos no <i>Power BI</i>	59

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Definições de GD consequentes das variadas perspetivas (Semeraro et al., 2021)..	13
Tabela 2 - Diferentes abordagens do modelo do GD (Análise de Semeraro et al., 2021)	15
Tabela 3 - Quatro tipos de gémeo digital (Análise do documento de Grieves & Vickers, 2017)..	18
Tabela 4 - Tempo disponível por operador em três turnos (Elaborado pela autora, 2023)	33
Tabela 5 - Rascunho do conteúdo desejado para análise de resultados.....	49
Tabela 6 - Tabela esperada em “Output_Zonas”	51
Tabela 7 - Tabela esperada em “Output_Carregamento”	52
Tabela 8 - Tabela esperada em “Output_Depositos”	54

Siglas e Acrónimos

AGD – Agregação do Gémeo Digital

AMR – *Autonomous Mobile Robot*

BD – Base de Dados

CPS – Cyber-physical systems

DT – *Digital Twin* (Gémeo Digital)

EGD – Envoltente do Gémeo Digital

GD – Gémeo Digital

IGD – Instância do Gémeo Digital

IA – Inteligência Artificial

IdC – Internet das Coisas

PGD – Protótipo do Gémeo Digital

SIGC – Sistemas Integrados de Gestão e Controlo

UC – Unidade Curricular

UPR – Unidade de Processamento Rápido

TI – Tecnologia da Informação

WIP – *Work In Progress*

1. Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida como requisito para a obtenção do Mestrado de Sistemas em parceria com o Departamento de Produção e Sistemas da Universidade do Minho. No capítulo exposto é realizado um enquadramento da temática abordada e apresentada a motivação para a sua escolha, bem como são delineados os objetivos a atingir e a metodologia de investigação adotada e, por fim, é exibida a estrutura do relatório.

1.1 Enquadramento e Motivação

Com a evolução do panorama industrial, condicionantes como a exigência do mercado e a complexidade dos processos tendem a definir a atualidade da indústria da transformação (Olasveengen et al., 2021). Os produtos tornam-se cada vez mais complexos, bem como os métodos de produção capazes de responder às exigências esperadas. A Indústria 4.0 surge com a necessidade das organizações se imergirem em formatos digitais e a sua principal funcionalidade é a integração de sistemas *cibefísicos*, baseados na heterogeneidade e na integração do conhecimento (Lu, 2017). De acordo com J. Womack, D. Jones e D. Ross (1990), o quinto princípio da filosofia japonesa *lean* prevê a constante agregação de valor e a eliminação de desperdício, focados na melhoria contínua. Para caminhar em busca da perfeição, é necessária uma análise integrada dos dados de produção e a tecnologia *Digital Twin* (DT) esboça um caminho para a integração simultaneamente virtual e física da produção, colmatando esta dificuldade (Qi & Tao, 2018). A criação de uma cópia virtual permite colecionar e analisar os dados, bem como simular dados no sistema virtual de forma a melhorar a performance do sistema real e prever o seu comportamento (Pires et al., 2019). A falta de consenso na descrição do conceito DT e as limitações apresentadas nos casos estudos, serão consideradas ao longo da análise crítica. A autora analisa um método existente para a elaboração de um modelo complexo e tenta elaborar um caso de estudo integrado com melhoria contínua.

1.2 Objetivos e Resultados Esperados

O desenvolvimento do presente estudo no que concerne o impacto da adaptação da indústria produtiva aos sistemas de *digital twin*, e conseqüente elaboração de um caso de estudo, proporciona maior proximidade às atuais exigências do mercado. De tal forma, é fundamental:

- Analisar o conceito de *digital twin*;
- Compreender a importância da digitalização dos processos industriais e os possíveis obstáculos;
- Definir o processo de construção de um gêmeo digital;
- Calcular a viabilidade econômica desta tecnologia de acordo com o setor de trabalho;
- Identificar a relação entre o gêmeo digital e as novas tecnologias e como combiná-los de forma a obter a máxima eficiência;
- Construir um caso de estudo.

A concretização desta investigação visa compreender a importância da transformação da indústria para o paradigma 4.0, tendo em conta um dos seus conceitos mais esquecidos devido à elevada dificuldade de implementação. A autora pretende elaborar um processo de implementação de gêmeos digitais e parametrizá-lo.

1.3 Metodologia de Investigação

A identificação da metodologia de investigação utilizada desde a fase inicial até à sua conclusão, apela ao respeito dos valores e normas da comunidade científica, garantindo o universalismo, o ceticismo organizado, a neutralidade, o comunalismo e a honestidade (Apontamentos disponibilizados na UC de Métodos de Investigação, MES). Tendo a temática e o método em conta, a metodologia que se aplica é denominada de “investigação-ação”. O propósito desta é a solução de um problema específico, e não especificamente a contribuição para a comunidade científica, sendo que é “qualquer investigação sistemática conduzida por professores (...) ou outros intervenientes no ambiente ensino-aprendizagem” (Gay et al., 2012).

O processo da metodologia anteriormente definida é composto por quatro momentos chave. Começa por identificar uma área de interesse, a partir da qual é possível iniciar a recolha de dados para que, posteriormente, estes sejam analisados e interpretados e surja um plano de ação (Gay et al., 2012). O investigador deve optar por escolher o modelo que se adapte mais ao seu propósito

(Koshy, 2005). A seguinte figura (Figura 1) apresenta uma abordagem ao ciclo investigação-ação com a identificação expandida das etapas.

Considerando este esquema, é possível agrupar os diversos capítulos a fases do processo de investigação:

- Tópico de interesse e contexto: na secção 1.1 é possível encontrar a temática enquadrada de forma geral e a motivação da autora;
- Limitação do tópico: a proposta de dissertação apresentada previamente à elaboração da mesma permite limitar o trabalho e planejar ao longo do tempo as medidas a tomar, como também na secção 1.2 são encontrados os objetivos inicialmente definidos para o projeto;
- Análise da literatura: o capítulo 2 é composto pela revisão literária onde estão espelhados variados artigos e a análise resultante dos mesmos;
- Temática refinada: a definição exata do problema e o acesso aos dados necessários está presente em todo o capítulo 3;
- Ação, monitorização e ajustes: o capítulo 4 apresenta o desenvolvimento da solução desenhada em software e, deste modo, os ajustes foram sendo executados ao longo de toda a simulação.
- Conclusão e recomendações: após a realização do projeto foram identificados os resultados do mesmo de acordo com as limitações e os objetivos da autora, assim como foram eboçadas algumas recomendações para futuros trabalhos.



Figura 1 - Ciclo investigação-ação (Adaptado de Koshy, 2005)

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada de forma a agrupar as diferentes fases da exploração do conceito, facilitando a elaboração do conteúdo e a leitura a qualquer indivíduo. Assim sendo, para contemplar as necessidades da temática, este relatório encontra-se composto por cinco capítulos.

No primeiro capítulo é possível encontrar uma breve introdução ao tópico juntamente com a motivação na retaguarda da sua escolha. Foram listados os objetivos a atingir e elucidada a metodologia de investigação na qual a atuação se baseia. Este relato da estrutura a encontrar encontra-se também neste capítulo inicial.

O segundo capítulo é dedicado à revisão bibliográfica e divide-se em quatro subcapítulos. O primeiro destes destina-se ao levantamento do tema de Produção *Lean* e das metodologias a este associado. De seguida, é elaborado um pequeno resumo sobre a Indústria 4.0 e são enumeradas as suas premissas. Posteriormente, é apresentada a Simulação com maior foco nas possibilidades de simulação recorrendo à ferramenta escolhida pela autora. Por fim, a temática principal, Gémeo Digital, é abordada desde o seu paradigma, até à sua integração. São levantados os desafios da sua adoção e é descrita uma possível arquitetura, e detalhadamente, é apresentada a sua associação à produção inteligente.

O terceiro capítulo é referente à descrição e análise da rota de resíduos a utilizar. Também são detalhados alguns componentes que poderiam ser integrados para uma melhor e real aplicação.

No quarto é apresentado o trabalho realizado na idealização da implementação de um gémeo digital. Este capítulo encontra-se dividido naquilo que a autora acredita serem as quatro fases de implementação na perspetiva apenas virtual. Sendo estes: Definição do Objetivo e Âmbito, Criação do protótipo, Construção do Modelo e Integração com uma Base de Dados.

O quinto e último capítulo visa o levantamento das conclusões finais e é efetuada uma análise dos objetivos atingidos.

2. Revisão Bibliográfica

O presente capítulo dedica-se à introdução de conceitos fundamentais para a abordagem do *digital twin* na Indústria 4.0. Inicialmente, são apresentados conceitos e princípios relevantes à produção *lean*, com particular foco na melhoria contínua, e é feito o paralelismo dos mesmos para a quarta revolução industrial. Relevantemente, é realizada uma revisão dos métodos aplicados ao desenvolver o modelo no SIMIO. Por fim, são estruturados os estudos realizados acerca da tecnologia *digital twin* e apresentadas as dificuldades sentidas na sua implementação, bem como, as potenciais vantagens na sua aplicação na indústria.

2.1 Produção lean

A filosofia japonesa *lean* foi introduzida por Eiji Toyoda e Taiichi Ohno, após a segunda guerra mundial, com o objetivo de obter uma vantagem competitiva face aos seus concorrentes. Este sistema, denominado de “*Toyota Production System*” (TPS), visa eliminar ou reduzir aquilo que não agrega valor ao produto (Sugimori et al., 1977). John F. Krafcik utilizou o termo *Lean Thinking* pela primeira vez em 1998 aquando da sua publicação de “*Triumph of the Lean Production System*”. Com o principal objetivo de gerar produtos de máxima qualidade ao menor custo possível, as suas diretrizes apresentam um sistema mais “magro”. Para o alcançar é necessário criar um ambiente que favoreça os trabalhadores a utilizarem o máximo das suas capacidades, é fundamental “tratar os trabalhadores como seres humanos e com consideração” (Sugimori et al., 1977).

2.1.1 Conceitos TPS

“O TPS foi estabelecido com base em dois conceitos: *jidoka* (...) e *just in time* (...)”. A filosofia *jidoka* demanda que o equipamento pare imediatamente quando ocorre um problema, prevenindo produtos com defeitos. Já o conceito *just in time* refere que os produtos apenas devem ser produzidos quando necessário. Assim, com bases nestes dois conceitos, é possível organizar eficientemente a produção de forma a reduzir os custos e o desperdício, sem comprometer a qualidade oferecida (Apontamentos disponibilizados na UC de Gestão e Organização *Lean* do MES, 2023). Contudo, o TPS também se divide em dois conceitos: a Casa TPS e o Método Toyota. A Figura 2 apresenta a estrutura desses mesmos conceitos, que permite a estabilidade da sua aplicação.

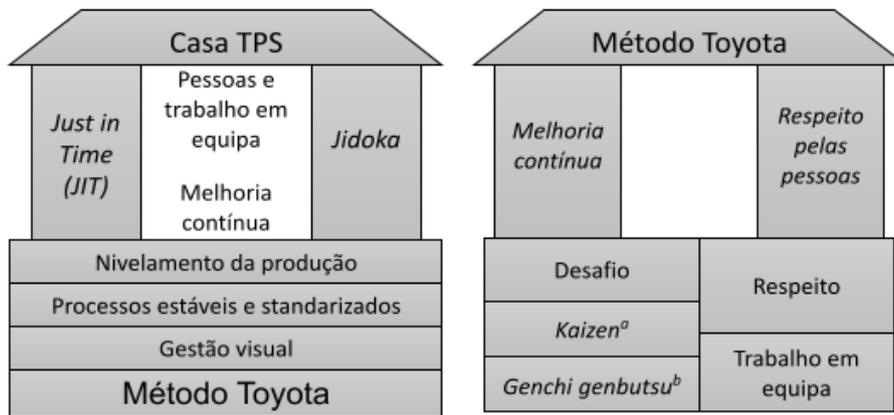


Figura 2 - Alicerces de um sistema de produção Toyota (da UC de Lean do MES, 2023)

Os princípios *lean* foram definidos de forma a moldar o pensamento de gestão dos processos e a visão dos desafios. Assim, conduz a organização a criar valor nos produtos e nos processos e a eliminar os desperdícios. Segundo Ohno (1988) os principais sete tipos de desperdícios podem ser identificados como: **(1)** Sobreprodução; **(2)** Esperas; **(3)** Transportes; **(4)** Sobre processamento; **(5)** Stocks ; **(6)** Movimentação ; **(7)** Defeitos. De acordo com J. Womack, D. Jones e D. Ross (1990), os cinco princípios *lean* podem ser identificados e definidos da seguinte forma:

1. **Definir valor pela perspectiva do cliente:** O cliente é responsável por definir o que é valor no seu produto e o que não está disposto a pagar será considerado desperdício e eliminado;
2. **Identificar a cadeia de valor:** O estudo dos processos de uma empresa permite identificar quais as atividades que acrescem valor ao produto, as atividades que não acrescem valor, mas são necessárias e as atividades que não acrescem valor e não são necessárias. Posteriormente, as últimas são consideradas desperdícios e devem ser eliminadas;
3. **Fluxo contínuo:** De forma a produzir fluidamente, quando eliminados os desperdícios, é necessário conjugar as atividades que agregam valor com as atividades que não agregam, mas são necessárias. Assim, a capacidade de resposta ao cliente aumenta.;
4. **Produção Puxada:** O fabrico é comandado pela procura, ou seja, o cliente “puxa” pela produção, evitando a sobreprodução e reduzindo os níveis de inventário nas etapas da cadeia;
5. **Busca pela perfeição:** O objetivo principal passa por constantemente agregar valor e eliminar desperdícios, procurando constantemente a melhoria contínua.

2.1.2 Melhoria Contínua

A atenção à melhoria contínua tem origem em projetos sustentados por empresas desde 1800, onde a apresentação de iniciativas apresentadas pelos trabalhadores era incentivada pela gestão (Singh & Singh, 2015). A ideia de melhoria contínua foi-se adaptando ao longo dos anos, sendo fortemente associada ao sistema TPS. Esta conquistou a sua importância no Japão devido a Deming, que acreditava que “Iniciativas de melhoria aumentam os sucessos e reduzem os fracassos” (AliHaddas et al., 2014). As metodologias de melhoria contínua desenvolveram-se, ao longo do tempo, focando-se em três objetivos complementares: a redução do desperdício, a simplificação das linhas de produção e, a melhoria da qualidade (Bhuiyan & Baghel, 2005). O seguinte esquema (Figura 3) resume as metodologias mais utilizadas e as suas principais características.



Figura 3 - Metodologias associadas a melhoria contínua e respetivas características (Desenvolvido pela autora com base em Bhuiyan & Baghel, 2005)

Pode se perceber que a melhoria contínua tem impacto em diferentes níveis de uma organização, encontrando-se o próprio conceito em constante evolução. Fundamentalmente, é necessário

perceber quais as novas áreas a atuar para atingir objetivos cada vez mais rigorosos, assim como tornar as métricas utilizadas cada vez mais absolutas.

2.2 Indústria 4.0

A mudança dos paradigmas da indústria está fortemente associada a avanços tecnológicos, sendo que a linha cronológica passa pelas seguintes etapas: a mecanização, a energia elétrica, a digitalização e os objetos inteligentes (Lasi et al., 2014). De forma a permitir uma operação mais simples, eficiente e eficaz, os processos tornam-se cada vez mais automáticos (Vaidya et al., 2018).

A quarta revolução industrial abrange um leque de conceitos que, de acordo com Lasi et al. (2014), podem dividir-se em sete tópicos fundamentais:

1. Fábricas Inteligentes: produção repleta de sensores e sistemas automáticos, conta com a digitalização dos produtos e das fábricas;
2. Sistemas ciberfísicos: comunhão total entre o sistema físico e o sistema ciber;
3. Organização automática: os sistemas mudam o paradigma e deixa de ser válido separá-los, a tendência é descentralizar e terminar com a hierarquia dos mesmos;
4. Novos sistemas de distribuição e aquisição: utilização de diferentes canais para conectar os processos;
5. Novos sistemas de desenvolvimento de produtos e serviços: foco em conceitos como inovação e produtos inteligentes;
6. Consideração das necessidades humanas: os sistemas devem ser desenhados para corresponder às necessidades humanas;
7. Responsabilização social: o sucesso dos produtos depende de aspetos como a sustentabilidade e a eficiência dos recursos.

A Figura 4 permite visualizar a interligação entre os diferentes parâmetros da cadeia de valor.

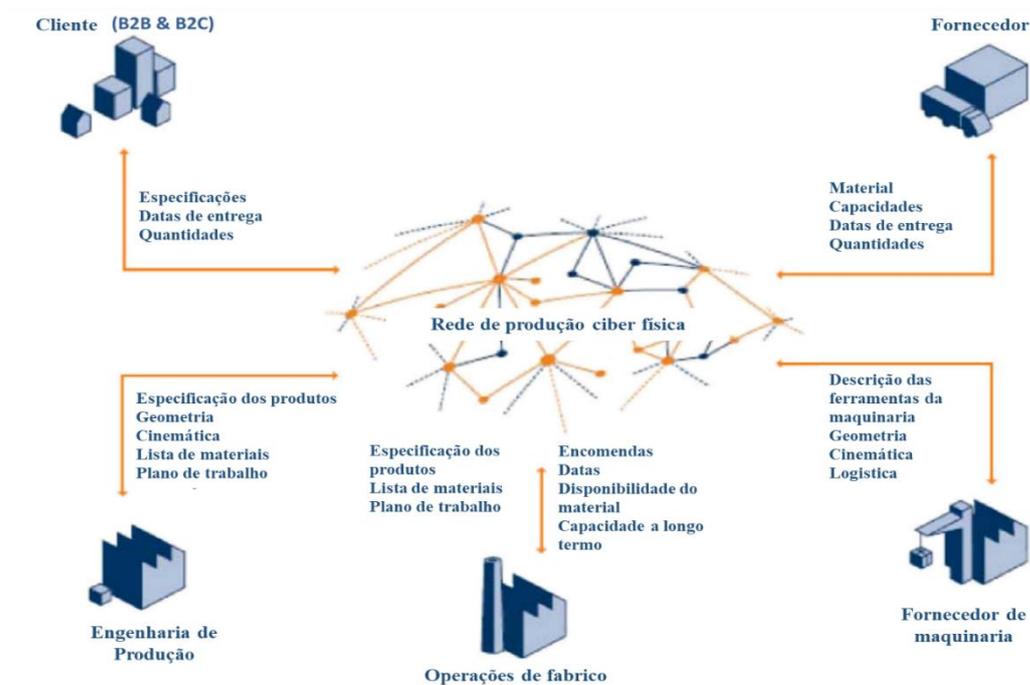


Figura 4 - Parâmetros da cadeia de abastecimento de uma rede ciberfísica (Tradução de Autili et al., 2012)

De acordo com Brettel et al. (2014), o âmbito da Indústria 4.0 incorpora todos os aspetos da organização, bem como do setor de fabrico e até mesmo da sociedade. O artigo “Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review” (Sony & Naik, 2020) presume a adaptação das organizações a uma estratégia benéfica para a integração dos princípios da quarta revolução industrial em 17 premissas. Estas são enumeradas da seguinte forma:

- P1. A estratégia da organização deve ter em consideração as relações entre a organização e os diversos parâmetros envolventes, como o ambiente, a comunidade, a cadeia de valor e as pessoas.
- P2. Devem ser criadas estratégias para a parte técnica da implementação das diversas tecnologias.
- P3. Mudança dos elementos que definir a estratégia da organização.
- P4. Medição do sucesso através do nível de integração de sistemas ciberfísicos.
- P5. Uma melhor gestão automatizada dos dados permite uma melhor criação de modelos automáticos de tomada de decisão.
- P6. A utilização dos recursos é otimizada através da integração dos bens.
- P7. Os sistemas de Tecnologia da Informação (TI) devem ser incorporados em todos os processos.

- P8. Criação de novos algoritmos de forma a suportar desafios como a imersão em data, a dinamização das estruturas e a necessidade de agir em tempo real.
- P9. Implementação de sistemas de rastreamento automáticos, de forma a implementar o conceito de logística inteligente.
- P10. Implementação de sistemas de reação automática ao longo da cadeia de valor.
- P11. Proteção dos dados e gestão dos *stakeholders*¹ através de sistemas de segurança de TI e gestão de dados em *cloud*.
- P12. Integração de produtos e serviços com outros CPS (*cyber-physical systems*), de forma a monitorar, regular e otimizar recursos automaticamente.
- P13. O design do produto ou serviço deve ser inovador.
- P14. Os clientes finais deviam estar integrados no CPS da organização.
- P15. Integração dos princípios de gestão dos serviços na Indústria 4.0, de forma a atingir uma satisfação mais elevada.
- P16. Desenvolvimento de modelos de adaptação dos funcionários durante a implementação da Indústria 4.0.
- P17. Comprometimento e envolvimento da gestão de topo.

Em suma, a criação de meios que permitam a completa implementação de sistemas ciberfísicos irá colmatar as necessidades atuais da indústria e permitir atingir a Indústria 4.0.

2.3 Simulação

No presente capítulo serão introduzidos os conceitos de simulação e de modelação, assim como os passos necessários para a simulação de um modelo. A autora delineou um caso de estudo, a ser apresentado posteriormente. Será necessário seleccionar uma ferramenta de simulação que garanta as necessidades básicas do sistema a elaborar e cumpra o principal propósito do experimento: a criação de um gémeo digital. Para tal, a autora seleccionou o software SIMIO, pela proximidade, devido à sua utilização na unidade curricular de Simulação, e pela posição do mesmo em diversos *rankings* de avaliação.

¹ Todas as pessoas, empresas ou instituições que têm algum tipo de interesse na gestão e nos resultados de um projeto ou organização, influenciando ou sendo influenciadas - direta ou indiretamente - por ela (Neoway, 2023).

2.3.1 Introdução à Simulação

A presente introdução trata-se de uma análise do artigo “*Introduction to modeling and simulation*” de Anu Maria (1997). Para a simulação de um sistema coeso com a sua realidade física devem ser compreendidos os conceitos de modelação e simulação. De acordo com o trabalho realizado por Maria, “modelação é o processo de produzir um modelo e um modelo é a representação da construção e do trabalho de algum sistema de interesse”. Porém, mesmo incorporando parâmetros fixos do sistema, o modelo não deve ser demasiado complexo, de forma a evitar a sua incompreensão. Normalmente, o modelo matemático é constituído por modelos determinísticos, estocásticos, estatísticos ou dinâmicos. Já a simulação desse sistema é “a operação de um modelo do sistema”, que tem em conta comportamentos do sistema ou dos seus subsistemas. A simulação pode garantir diferentes aspetos: a redução da possibilidade de fracassar a corresponder às exigências, a eliminação de estrangulamentos, a utilização dos recursos apenas necessários e a otimização da performance do sistema. De acordo com Maria, é necessário ressaltar que é necessária interação humana em todas as fases de um estudo de simulação, desde o desenvolvimento do modelo a utilizar até à tomada de decisão de alterar o sistema.

2.3.2 SIMIO

A modelação e a análise de sistemas complexos, particularmente na área da simulação de eventos discretos, são possíveis graças ao avançado software de simulação conhecido como SIMIO, acrónimo de “Simulation Modeling Framework with Intelligent Objects”. Este oferece um ambiente de modelação visual que permite aos utilizadores simular o comportamento de vários sistemas ao longo do tempo e criar modelos dinâmicos dos mesmos. De acordo com a análise do *website* do *software*, este pode dividir-se nas seguintes especificações:

- **Demonstração 3D:** a capacidade de conceber e visualizar a disposição física, as entidades, os recursos e os processos envolvidos num clima de demonstração 3D, permite desenvolver uma representação aprofundada dos sistemas.
- **Objetos animados:** a integração de substâncias genuínas e as suas formas de comportamento de objetos inteligentes, como por exemplo máquinas, veículos, transportadores, filas de espera e uma variedade de outras ferramentas e conceitos, tornam mais simples a demonstração de estruturas complexas.
- **Lógica do fluxo do processo:** através de uma interface gráfica sobre o layout à escala do respetivo sistema, onde se constrói numa lógica simplificada de *building blocks* ou recorrendo

à programação textual em C# ou VB.NET, o fluxo do processo e o comportamento das entidades do sistema podem ser definidos pelos utilizadores, sendo as atividades, a lógica de encaminhamento, a tomada de decisões e as interações de recursos exemplos do mesmo.

- **Visualização e animação:** a capacidade de movimento e representação contínua permite observar exteriormente o comportamento da estrutura, assim é possível reproduzir de forma progressiva, analisar as principais medidas de execução, validar o modelo, e tomar decisões informadas.
- **Eventos individuais:** é possível dissecar a execução de estruturas, reconhecer estrangulamentos, avançar na designação de ativos e avaliar diversas situações, os utilizadores podem modelar e simular o comportamento dinâmico de sistemas que se baseiam em processos e eventos discretos.
- **Fontes externas de informação:** é possível coordenar modelos de reprodução com informações constantes para obter resultados precisos adicionais.

Todas estas vantagens podem ser aplicadas a diversos setores, como o fabrico, a logística, a saúde, a gestão da cadeia de abastecimento, a aeroespacial, agricultura e processamento de alimentos, entre outros. Sendo que, em qualquer aplicação, a conceção de sistemas, a melhoria de processos, o planeamento da capacidade, a programação e o apoio à decisão são todos utilizados.

No separador relativo a gémeo digital é possível encontrar uma breve definição da tecnologia e indica que este pode determinar a vida útil restante, prever avarias, projetar o desempenho e estimar retornos financeiros. A seguinte figura (Figura 5) apresenta as três fases de implementação de um gémeo digital presentes na mesma secção.

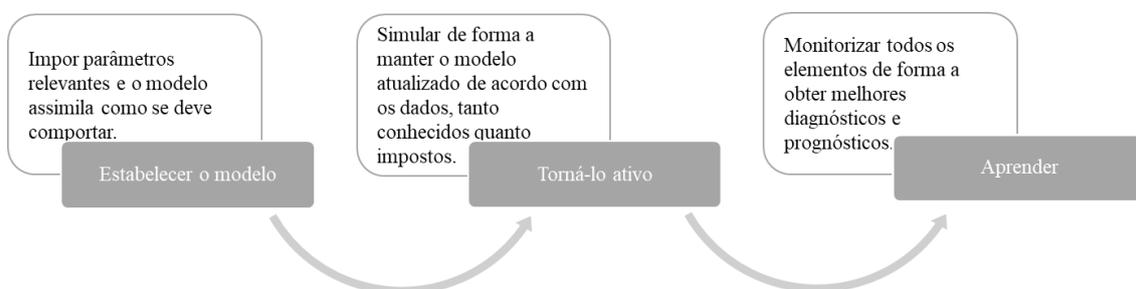


Figura 5 - Fases de implementação de um gémeo digital, de acordo com informação presente no Website do *Simio*

2.4 Gémeo Digital

A criação de uma rede de modelos ciberfísicos representa a possibilidade de incorporar corretamente uma nova geração de tecnologias da informação. A definição de *digital twin* tem variado ao longo do tempo, de acordo com a análise de Semeraro et al. (2021) é possível dividir as definições existentes em cinco grupos. Estas abordam a capacidade de simular de acordo com: (1) as diferentes fases do ciclo de vida; (2) a sincronização do sistema virtual com os atributos físicos; (3) a utilização de dados em tempo real; (4) os comportamentos e regras do sistema físico e; (5) as funcionalidades disponibilizadas pelo sistema visual. A seguinte tabela (Tabela 1) reúne diferentes aspetos de um DT presentes em variados trabalhos, de acordo com os grupos anteriormente apresentados, escortinados em “Digital twin paradigm: A systematic literature review”.

Tabela 1 – Definições de GD consequentes das variadas perspetivas (Semeraro et al., 2021)

Cerne das definições apresentadas na revisão bibliográfica de Concetta Semeraro, Mario Lezoche, Hervé Panetto, Michele Dassisti	
G1 – Fases do ciclo de vida	
Conexão entre o espaço virtual e o espaço real incorporando todas as fases do ciclo de vida.	Grieves & Vickers, 2017
Ciclo de vida do produto abordado este a confeção e o design até ao seu uso e utilização.	Ríos et al., 2015 Schleich et al., 2017
Utilização de um gémeo desde o início de vida de um produto até ao seu descarte.	Schroeder et al., 2016
Integração de dados do ciclo de vida do produto de forma a verificar a performance e a qualidade do design e da produção.	Zhang et al., 2017
Divisão em fases da performance em tempo real: design, pré-produção e produção.	Söderberg et al., 2017
Modelo virtual dos atributos físicos que replica e simula estados e comportamentos ao longo da vida.	Glaessgen & Stargel, 2012
G2 – Sincronização quase em tempo real entre o sistema virtual e os atributos físicos	

Parte virtual do sistema ciber virtual para simular o comportamento humano através de valores dinâmicos da base de dados, incluindo as propriedades, as preferências, o horário de trabalho e o conjunto de competências.	Graessler & Poehler, 2017
G3 – Utilização de dados em tempo real	
Incorporação de dados do sistema físico, bem como das suas funcionalidades e interfaces de comunicação.	Schluse et al., 2017
Inclusão de algoritmos analíticos orientados para dados, de forma a refletir o estado do sistema físico.	Lee et al., 2013 Stark et al., 2017
A integração com o sistema físico deve ser bidirecional	Leng et al., 2019
G4 – Comportamentos e regras do sistema físico	
Cópia do comportamento do sistema físico e das suas propriedades e características.	Rosen et al., 2015
Modelo virtual inclui o modelo geométrico, regras e comportamentos, como as propriedades dos materiais, análises mecânicas e monitorização.	Qi & Tao, 2018
“ <i>Living Model</i> ”: adapta-se a mudanças no ambiente ou nas operações através de dados em tempo real	Zhuang et al., 2018
“ <i>Dynamic Model</i> ”: realiza operações dinâmicas, em tempo real e preditivas	Zhuang et al., 2018
Sistema de imitação <i>hardware-in-the-loop</i> para realizar o mesmo trabalho do sistema físico.	Ayani et al., 2018
G5 – Funcionalidades disponibilizadas pelo DT	
Modelo multi domínio que requer um mapeamento individual dos seus relacionamentos	Luo et al., 2018
Parte virtual e computadorizada do sistema físico sincronizadas com dados obtidos em tempo real, fortemente ligado à Indústria 4.0.	Negri et al., 2017

Atualmente, a definição mais abrangente de gêmeo digital retrata um modelo virtual de um sistema físico sincronizado com ao longo de todo o seu ciclo de vida, integrando dados em tempo real de forma a gerar um modelo comportamental da contraparte física e fornecer serviços para otimizar o seu desempenho e funcionamento. Porém, é importante de salientar que não é consensual a definição de gêmeo digital para a comunidade científica. À medida que a sua presença vai evoluindo, originou a emergência de um novo paradigma chamado paradigma do gêmeo digital.

2.4.1 Paradigma Gêmeo Digital

O capítulo 4 do artigo “Digital Twin Paradigm: A systematic Literature Review” discute as aplicações da tecnologia gêmeo digital em diferentes indústrias. Este salienta as potenciais vantagens da utilização de modelos de gêmeos digitais, tais como a redução de despesas, o aumento da produtividade e a melhoria da qualidade dos produtos. São igualmente apresentadas análises contextuais da execução de gêmeos computadorizados em atividades como montagem, serviços médicos e transportes. Para tal, a análise encontra-se dividida em cinco fatores fundamentais: (1) o contexto da aplicação; (2) o posicionamento de acordo com o ciclo de vida da aplicação; (3) as funções da sua aplicação; (4) a arquitetura utilizada para definir o modelo e; (5) os componentes/tecnologias que permitem a sua integração e implementação. A seguinte tabela (Tabela 2) apresenta os diferentes objetivos para cada categoria da aplicação do modelo de um gêmeo digital.

Tabela 2 - Diferentes abordagens do modelo do GD (Análise de Semeraro et al., 2021)

1 – Contexto da aplicação

Serviços de saúde

Marítimo e transportes

Produção

Gestão urbana

Aeroespacial

2 – Ciclo de vida

Na fase de *design*

Na fase de produção

Na fase de serviço

3 – Funcionalidade

Acelerar a velocidade de desenvolvimento do produto

Identificar as necessidades dos clientes

Otimização e validação da performance

Colocação em funcionamento e diagnóstico remotos

4 – Arquitetura

Física

Rede

Computação

5 – Componentes/Tecnologias mais utilizados

Identificação por radiofrequência

Rede de sensores sem fio

Rede de sensores por radiofrequência

Nível unitário

Nível de sistema

Nível em sistema de sistemas

Arquitetura orientada a serviços

Protocolo de comunicação

Interface/protocolo de comunicação: *machine learning* automática

Comunicação sem fios

Interface de programação de aplicações

Métodos orientados para dados

Modelos geométricos

Modelos físicos

Modelos comportamentais

Modelos de informação colaborativa

Modelos de tomada de decisão

Dimensionamento

Modelos de interoperabilidade

Modelo de fidelidade

Modelo de modularidade

Modelo de dinamismo

Camada de aplicações e interface (serviços *web*, realidade aumentada)

Tendo em conta os diferentes contextos de aplicação apresentados por Semeraro et al. é possível enaltecer o potencial dos gémeos digitais para revolucionar a indústria transformadora e melhorar a sua produtividade e sustentabilidade. De acordo com a sua análise, estes modelos apresentam a capacidade de melhorar a eficiência da produção, de reduzir o tempo de paragem e de assegurar a qualidade da produção. A conceção e o teste de novos produtos e processos, bem como a monitorização em tempo real da linha de produção são vantagens geradas pela aplicação de gémeos digitais. Mas como todas as tecnologias, o DT também apresenta os seus desafios na indústria transformadora, como a necessidade de dados e modelos precisos e de colaboração entre os vários intervenientes.

De acordo com Grieves (2014) a arquitetura de um gémeo digital é composta por um espaço físico, um espaço virtual e a conexão entre estes. Ao longo dos anos a visão desta arquitetura foi alterada, sendo vista como a organização de vários componentes e tecnologias em três camadas: a física, a rede e a computação (Kaur et al., 2020). A Figura 6 apresenta um resumo do paradigma do gémeo digital.

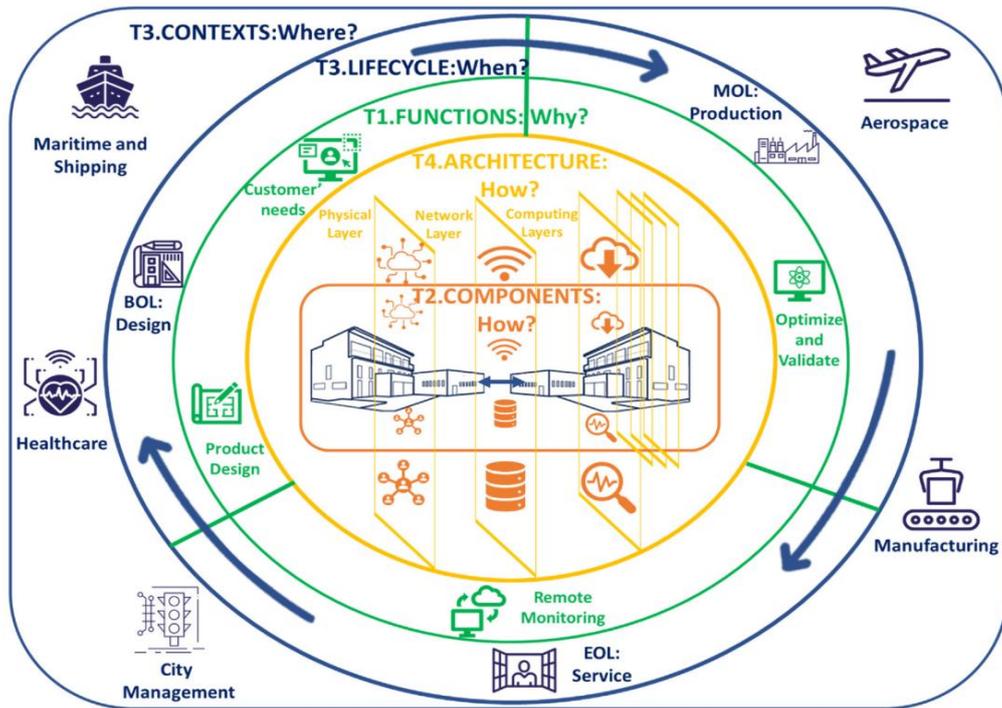


Figura 6 - Paradigma Gêmeo Digital (Semeraro et al., 2021)

2.4.2 Arquitetura do Gêmeo Digital

O termo gêmeo digital tem conquistado importância na indústria transformadora, porém é associado a diversos conceitos e a sua compreensão torna-se bastante incompleta, para o desejado quando se trata de uma tecnologia complexa. De acordo com Kritzinger et al. (2018), é necessário detalhar o nível de integração física-virtual dos dados para se identificar um gêmeo digital. Estes criaram três variantes, sendo estas o Modelo Digital; a Sombra Digital e o Gêmeo Digital. A seguinte imagem (Figura 7) apresenta um resumo das três variáveis.

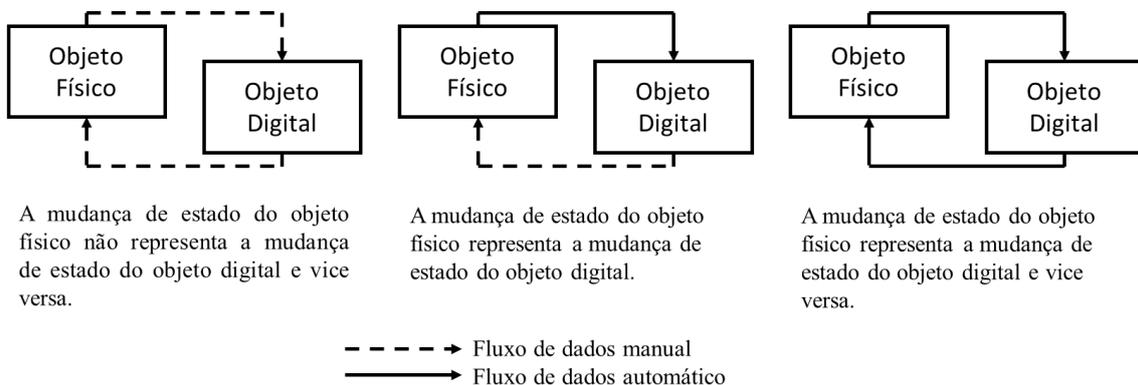


Figura 7 - Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital (Kritzinger et al., 2018)

De acordo com Grieves & Vickers (2017), o GD pode ser organizado em quatro tipos: o protótipo do GD (PGD), a instância do GD (IGD), a agregação do GD (AGD) e o envolvente do GD (EGD).

A Tabela 3 apresenta a definição dos diversos tipos, disponibilizada de acordo com o artigo “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review” (Jones et al., 2020)

Tabela 3 - Quatro tipos de gémeo digital (Análise do documento de Grieves & Vickers, 2017).

Tipo	Descrição
Protótipo do GD	Descrição virtual de um protótipo de produto, que contém todas as informações necessárias para criar o gémeo físico.
Instância do GD	Uma instância específica de um produto físico que permanece ligada a um produto individual durante toda a vida desse produto.
Agregação do GD	Combinação de todas as instâncias do GD
Envolvente do GD	Espaço de aplicação de múltiplos domínios físicos para operar em gémeos digitais. Estas operações incluem a previsão do desempenho e a interrogação de informações

Como mencionado anteriormente, o GD pode ser dividido em três partes: o sistema físico, o sistema virtual e a conexão entre estes. A Figura 8 representa a arquitetura de um GD na camada ciber.

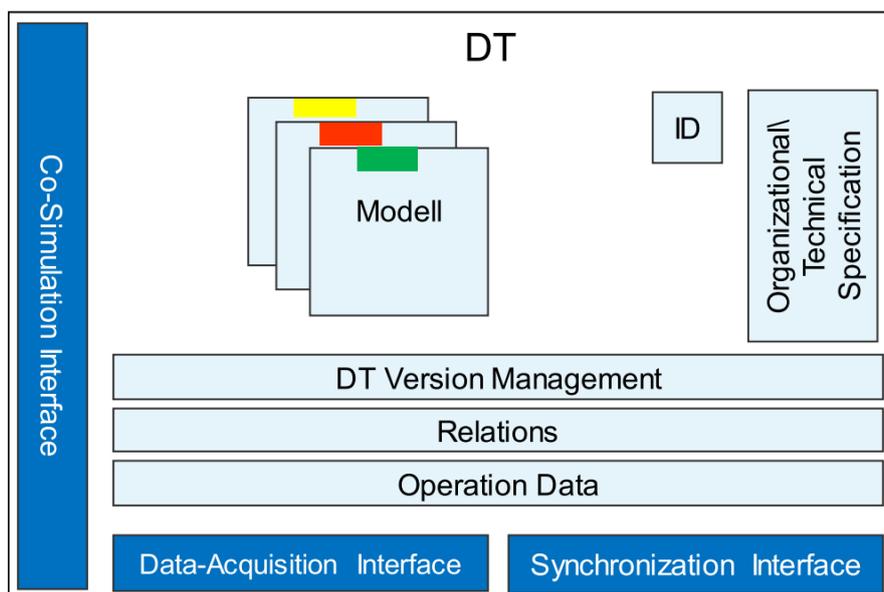


Figura 8 - Arquitetura de um gémeo digital na camada ciber (Ashtari Talkhestani et al., 2019)

A arquitetura do GD é constituída por um único ID, vários modelos, dados de especificação técnica, gestão das várias versões dos modelos, informação sobre as relações entre os diferentes GD e as integrações de comunicação e dados operacionais.

O artigo “An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System” de Ashtari Talkhestani et al. (2019) aborda os diferentes constituintes, presentes na Figura 8, e apresenta os seguintes pontos:

- O **ID único** permite que os dados e os modelos do GD sejam armazenados como um módulo² na base de dados, entre os restantes dados e informação, com a possibilidade de serem utilizados a qualquer momento.
- Diferentes **modelos e as interfaces modelo-ferramenta** são encapsulados no GD, exemplos de tal são modelos de CAD, de esquemas elétricos, de *softwares*, funcionais, etc.
- Os **dados operacionais** dizem respeito a uma base de dados que armazena e processa dados do comportamento e do estado em tempo real do sistema.
- Os **dados técnicos e organizacionais** são compostos por informação acerca do recurso físico, como a data da sua produção e o responsável pelo seu *design*, e toda a documentação criada ao longo do seu ciclo de vida é devidamente armazenada.
- Os **modelos interdisciplinares** são armazenados de forma a manter a consistência entre o sistema total, ex.: relações instância-instância, herança, relações pai-filho.
- A **interface entre outros GD** permite não só obter uma imagem em tempo real mais fidedigna, como realizar simulações.
- Uma **interface** é necessária para sincronizar **modelos interdisciplinares** e suas relações.
- A **interface para aquisição dos dados** permite simular em paralelo com o mundo real, transferindo e armazenando os dados operacionais.

A coleção de todos estes dados, juntamente com a sua agregação, armazenamento e análise torna-se uma tarefa trabalhosa e meticulosa, tendo em conta o número de sistemas de IoT atualmente implementados ao longo de aplicações.

Todos estes parâmetros que constituem o gémeo digital, requerem alguma complexidade de investigação e compreensão, pois englobam algoritmos, modelos e tecnologias que, para além de comprometerem a qualidade dos dados, comprometem também a segurança do sistema (Qian et al., 2022).

² Um módulo é uma coleção de declarações, afirmações e procedimentos que são armazenados em conjunto como uma unidade (*Database Basics*, n.d.).

De acordo com Qian et al. (2022), existem alguns protocolos de representação de dados utilizados em GD que permitem compreender dados de diferentes domínios, como: (1) DTDL (*Digital Twin Definition Language*), (2) FIWARE, (3) OPC UA (*OPC Unified Architecture*) E (4) FDTF (*Feature-Based DT Framework*).

Outro protocolo abordado no artigo acima escortinado é o protocolo de comunicação, para o qual o autor apresenta quatro tipos: *Constrained Application Protocol* (CoAP), *OASIS Standard Message Passing Protocol* (MQTT), *Modbus TCP/IP Protocol*, e *Ultra Reliable Low Latency Communication* (URLLC). Este permite a transição de informação entre os diferentes dispositivos IdC e os seus sistemas (Qian et al., 2022).

A construção de uma rede coesa e segura é fundamental para garantir o bom funcionamento do GD. O artigo “A Digital Twin Based Industrial Automation and Control System Security Architecture” (Gehrmann & Gunnarsson, 2020), apresenta a possível arquitetura de segurança de um modelo GD para garantir a segurança de Sistemas Integrados de Gestão e Controlro (SIGC).

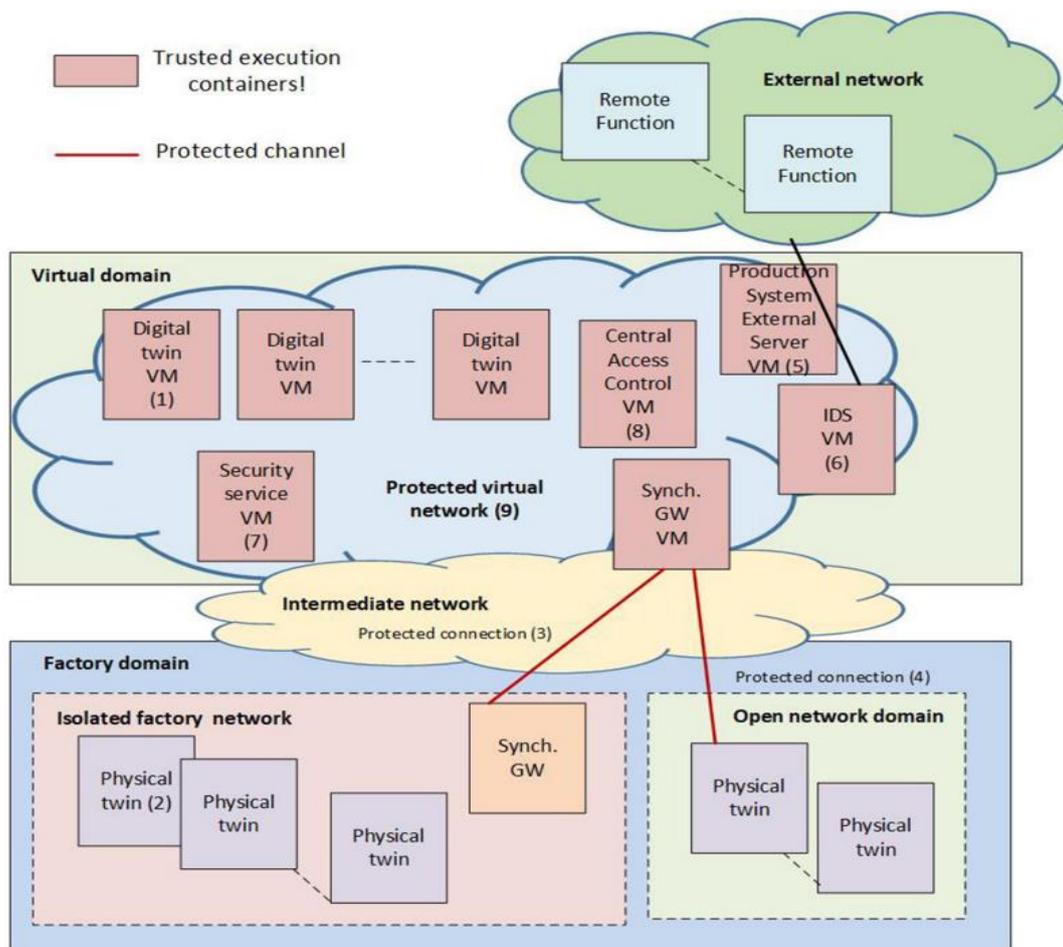


Figura 9 - Arquitetura de segurança de um gêmeo digital (Gehrmann & Gunnarsson, 2020)

A arquitetura ilustrada na Figura 9 concerne uma proposta de alto nível, pois não representa um *design* completo com todos os seus detalhes. As diferentes propriedades dos componentes presentes na mesma podem ser sintetizadas da seguinte forma:

- **Gémeo Digital:** Trata-se de uma réplica virtual do SIGC e permite a simulação, a análise e a monitorização do comportamento do sistema, fornecendo informações em tempo real sobre potenciais ameaças e vulnerabilidades. As suas propriedades englobam escalabilidade, adaptabilidade e capacidade de integração com outros componentes.
- **Modelo de ameaças:** Esta componente envolve a análise sistemática de potenciais ameaças e vulnerabilidades que podem afetar o SIGC. Facilita a identificação, a classificação e a avaliação proativas dos riscos, permitindo a conceção de contramedidas adequadas. As propriedades da modelação de ameaças incluem a abrangência, a colaboração e a integração em todo o ciclo de vida do SIGC.
- **Monitorização da segurança:** Esta componente envolve a monitorização contínua do SIGC para detetar e responder a incidentes de segurança em tempo real. Utiliza vários sensores, sistemas de deteção de intrusões e técnicas de deteção de anomalias para identificar atividades maliciosas. As propriedades da monitorização da segurança incluem a atualidade, a precisão e a capacidade de gerar alertas ou notificações.
- **Controlo de acesso:** O controlo de acesso garante que apenas indivíduos ou entidades autorizadas podem interagir com o SIGC. Utiliza mecanismos de autenticação, autorização e responsabilização para impor direitos e permissões de acesso adequados. As propriedades do controlo de acesso incluem granularidade, flexibilidade e capacidade de adaptação a requisitos operacionais dinâmicos.
- **Gestão de informações e eventos de segurança (SIEM):** O SIEM é responsável pela recolha, análise e correlação de eventos relacionados com a segurança e dados de registo de várias fontes no SIGC, fornecendo visibilidade centralizada e permitindo uma resposta eficiente a incidentes e análise forense. As suas propriedades incluem agregação de registos, correlação, monitorização em tempo real e capacidades de elaboração de relatórios.
- **Administração da segurança:** Esta componente centra-se no estabelecimento de políticas, procedimentos e directrizes para garantir a gestão e governação eficazes da segurança do SIGC. Inclui actividades como a avaliação dos riscos, a gestão da conformidade e a formação em matéria de sensibilização para a segurança. Apresentam as seguintes propriedades: responsabilidade, transparência e alinhamento com as normas e regulamentos do sector.

De um modo geral, a arquitetura apresentada por Gehrman e Gunnarsson (2020) incorpora componentes com propriedades distintas, com diversos contributos para o reforço da segurança do SIGC. Aproveitando-as de forma eficaz, as organizações podem enfrentar proactivamente as ameaças, detetar e responder a incidentes de segurança e estabelecer práticas sólidas de gestão da segurança para os seus sistemas de automação e controlo industrial.

2.4.3 Desafios e utilização do Gémeo Digital

O artigo “Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research” (2020) apresenta-nos os desafios da geminação digital, sendo esta elaborada em paralelo com Inteligência Artificial (IA) e IdC (Internet das Coisas). Assim, as adversidades são divididas em três categorias: (A) Desafios da Análise de Dados, (B) Desafios de IdC, e (C) Desafios do Gémeo Digital.

Na categoria da **análise de dados** é possível observar desafios em diversas áreas. No que diz respeito à infraestrutura da TI (Tecnologia da Informação) é necessário garantir que o rápido crescimento da IA (Inteligência Artificial) acompanha a exigência de uma infraestrutura de alta performance. Um forte desafio é o elevado custo de instalar e utilizar uma unidade de processamento rápido (GPU) que executa algoritmos de aprendizagem automática e profunda. A complexidade dos dados e a divergência da sua origem pode também representar um problema na análise de resultados, sendo importante garantir a qualidade dos dados através de algoritmos, bem como o seu armazenamento e filtração. Será fundamental ter em consideração que a criação de regulamentação de dados em tecnologias tão recentes será o próximo passo para garantir a privacidade e segurança. O olhar sobre a temática da análise de dados diverge em dois hemisférios, por um lado a complexidade do assunto gera o medo de que os sistemas de IA toldem a sociedade e os seus trabalhos, por outro lado a cega crença de que a utilização de IA acarreta apenas elevados benefícios pode gerar variados problemas quanto a expectativas.

Já no que diz respeito ao campo da **Internet das Coisas (IdC)**, a lista de desafios é semelhante, pois para aproveitar efetivamente o valor potencial dos dados recolhidos através da IdC, é imperativo implementar sistemas robustos para classificar, organizar e analisar a informação. Se tal não for feito, pode resultar na perda de informações valiosas ou tornar proibitivamente dispendiosa a extração de valor significativo dos enormes volumes de dados acumulados. A atualização da estrutura de IdC permite beneficiar de última tecnologia, bem como das aplicações e serviços disponíveis na nuvem constantemente. Os problemas de conectividade surgem à medida que os dispositivos IdC se generalizam, sobretudo quando se trata de monitorização em tempo

real. Os dispositivos IdC são necessários para alimentar os algoritmos de IA com dados, mas o desempenho do sistema pode ser afetado pela falta de dados IdC. Ao readaptar as máquinas e capturar os dados existentes, as lacunas na monitorização podem ser minimizadas e a recolha de dados abrangente pode ser assegurada. Também nesta temática devem ser evitadas expectativas irrealistas e deve ser reconhecida a importância do conhecimento prévio e da resolução dos problemas de privacidade e segurança. Para maximizar o potencial da IdC, é crucial uma compreensão abrangente das suas capacidades e implicações. Apesar disso, a crescente adoção da IdC indica o reconhecimento do seu valor e dos seus potenciais benefícios.

Por fim, é possível verificar que os desafios levantados quanto ao **Gémeo Digital** são semelhantes aos apresentados nas categorias anteriores. Uma infraestrutura de TI robusta e interligada é essencial para uma implementação bem-sucedida de um gémeo digital. Permite a integração de dispositivos IdC e uma análise de dados eficiente. Sem uma infraestrutura bem planeada, um gémeo digital pode ter dificuldades em atingir os seus objetivos. Dados de alta qualidade e contínuos também são essenciais para uma indústria digital, porque dados inconsistentes e com falhas podem resultar num desempenho insuficiente e em resultados pouco fidedignos. A quantidade e a qualidade dos sensores IdC desempenham um papel crucial na obtenção de dados fiáveis, bem como o planeamento e a análise são necessários para garantir a recolha adequada de dados para uma utilização eficaz dos dispositivos digitais. Nas organizações, os gémeos digitais enfrentam dificuldades com a privacidade e a segurança, como o risco para os dados sensíveis do sistema e a utilização extensiva dos dados. As tecnologias que permitem a utilização de gémeos digitais, como a IdC e a análise de dados, devem estar em conformidade com a regulamentação em termos de privacidade e segurança para resolver estas questões. Novamente, é necessário conhecer e compreender a tecnologia para haver confiança do ponto de vista organizacional e do ponto de vista do usuário. Outra das preocupações é a necessidade de criar um modelo padronizado desde o *design* inicial até à simulação do GD, garantindo a compreensão do utilizador e o fluxo de informação entre cada fase do desenvolvimento e implementação do GD. O último desafio é garantir que a informação relativa à informação do domínio é transferida para cada uma das fases de desenvolvimento e modelação do GD, garantindo compatibilidade com domínios como a IdC e a análise de dados.

Qian et al. (2022) afirma que “a performance do CPS é resultado da interação entre subsistemas (rede, computação e controlo)” concluindo que, não só é necessário corresponder aos requisitos

rigorosos da performance do GD, mas também é necessário refletir as interações entre os subsistemas. É possível agrupar parte dos desafios anteriormente mencionados em quatro adversidades: (1) **Integração de Modelos Interdisciplinares**, modelos criados durante a fase de engenharia devido a diferentes aspetos serem endereçados por diferentes ferramentas; (2) **Sincronização da Realidade com a Virtualidade**, a sincronização com o sistema físico desde a colocação em funcionamento deve ser automática e sistémica; (3) **Integração entre Gémeos Digitais**, análise de casos de simulação simultânea; (4) **Aquisição de dados ativa**, devem ser adquiridos, em tempo real, os dados de operação para que a realidade seja representada na Camada Virtual.

Resumindo, seria necessário obter mais conhecimento quanto à tecnologia GD e quanto aos seus domínios envolventes.

2.4.4 Gémeo Digital aliado à Produção Inteligente

A utilização do DT na indústria produtiva tem impacto no desenvolvimento, na produção e no controlo dos produtos. Em grande escala, a TD é capaz de avaliar as opções de produção, obter acesso ao desempenho do produto, comandar e reconfigurar máquinas remotamente, gerir a resolução de problemas do equipamento remotamente e ligar sistemas/processos para uma melhor monitorização e otimização do seu controlo (Kitain, 2018).

2.4.4.1 Produção inteligente

Imperativamente, é necessário abordar os conceitos inerentes à produção inteligente de forma a contextualizar a integração da tecnologia DT. O artigo “Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm” aborda alguns desses conceitos (Shrouf et al., 2014).

- Customização em massa: permite o envolvimento em diferentes fases do processo produtivo;
- Flexibilidade: processos inteligentes permitem constante configuração;
- Tomada de decisão otimizada: capacidade de tomar decisões a qualquer momento de forma a diminuir o tempo entre a ocorrência do problema e a decisão eficiente;
- Novos métodos de planeamento: métodos de planeamento baseados em modelos digitais com forte paralelismo e planeamento dos sistemas eletrónicos e mecânicos;
- Coleção de dados: usada para compreender o comportamento de algum elemento em diferentes períodos;

- Novos serviços: IdC permite criar e expandir novos serviços e valores;
- Monitorização remota: possibilidade do envolvimento de externos;
- Automação: altera o papel da mão de obra, bem como aumenta a eficiência e diminui o desperdício;
- Manutenção proativa: permite reduzir energia, desperdícios e evitar paragens;
- Cadeia de abastecimento conectada: possibilita um entendimento de dependências, do fluxo dos materiais e dos ciclos de tempo da produção a todas as partes envolvidas.

De forma a diminuir os tempos de *setup* e a interação de mão de obra humana, é importante automatizar a customização dos produtos. Para tal, é necessário garantir a flexibilidade dos processos e a monitorização constante de todos os fatores envolvidos. Assim, a integração de um gémeo digital irá facilitar a coleção de dados e o tratamento dos mesmos, bem como a utilização de modelos precisos de tomada de decisão.

2.4.4.2 Gémeo Digital para a produção inteligente

Para além de ter em conta o nível de intervenção do modelo gémeo digital, é necessário compreender os parâmetros que o tornam diferente de modelos de simulação. Em “Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies” (Onaji et al., 2022) é possível encontrar uma análise de algumas características, sendo estas:

1. Reflexo em tempo real do espaço físico;
2. Integração e convergência dos espaços físico e virtual, bem como dos dados históricos e em tempo real;
3. Constante evolução.

Nesse mesmo artigo, os autores apresentam a aplicação do gémeo digital na indústria produtiva de acordo com três níveis: produto, unidade/sistemas e sistema de sistema/chão de fábrica. De maneira que seja possível simular, monitorizar, diagnosticar, prever e controlar o estado e o comportamento do sistema é possível utilizar modelos físicos, regras de relacionamento e modelos de comportamento (Q. Cheng et al., 2018). A seguinte figura (Figura 10) apresenta as diferenças entre os três níveis.

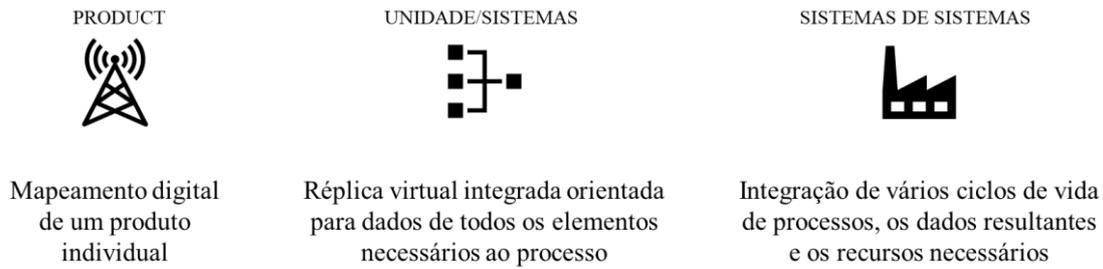


Figura 10 - Níveis de aplicação do gémeo digital na indústria produtiva

De forma a desenvolver um GD adequado para a indústria de fabrico, enquadrado no paradigma de *cyber-physical production systems* (CPPS), é necessário ter em consideração a integração dos produtos e dos respetivos processos produtivos. De acordo com Monostori (2014), os “CPPS consistem em elementos cooperativos e autónomos e sub sistemas que estão a ser conectados entre si de formas dependentes, em e entre todos os níveis de produção, desde processos através de máquinas até à rede de produção e logística”. É fundamental que a interação entre todos os elementos seja bidirecional, ou seja, os dados processados pelo DT do sistema sejam transmitidos para o DT do produto e os dados do DT do produto permitam processar configurações específicas do mesmo. A Imagem Figura 11 demonstra a interação entre os DT do produto e do processo.

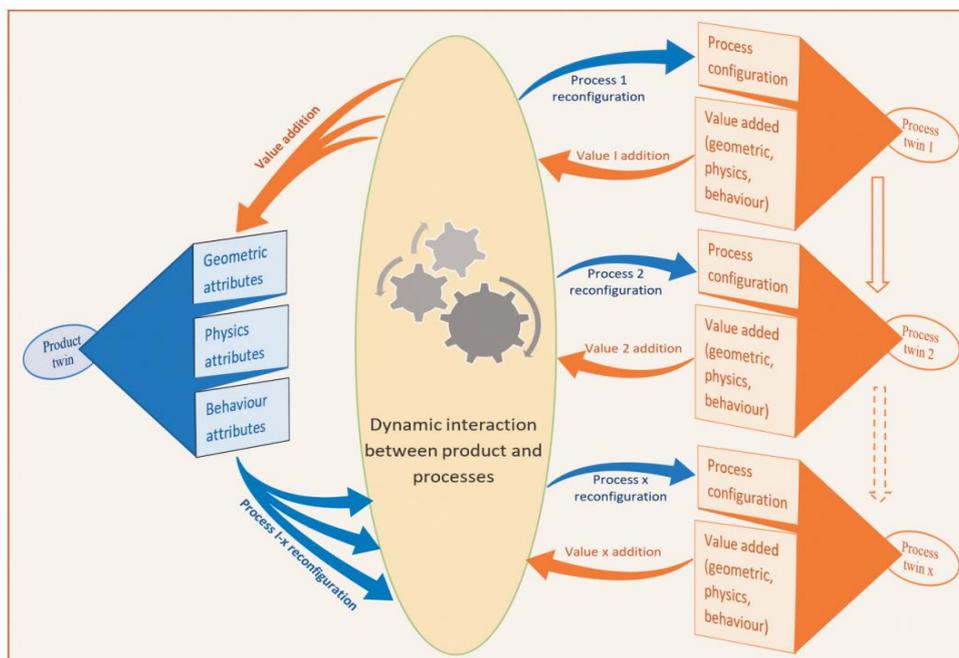


Figura 11 - Interação entre os gémeos digitais do produto e do processo (Onaji et al., 2022)

O *framework* proposto por (Onaji et al., 2022) é composto por seis componentes: (1) Bens físicos integrados; (2) Modelos virtuais integrados de produto/processo; (3) Camada inteligente; (4) Camada de dados e; (5) Camada organizacional.

1. Bens físicos: conjunto de entidades de produção do sistema conectado, monitorizado e gerido através de equipamentos de automação avançados (Ex.: microcontroladores, controladores lógicos programáveis, interfaces entre homem-máquina, processo técnicos, sensores, identificação em rádio frequência, *software*, etc.). Os bens podem ser recursos passivos como *work-in-progress* (WIP) ou recursos ativos como máquinas CNC, robôs, transportes, mão de obra, etc.
2. Modelos virtuais: Modelos multidimensionais que incluem modelos de propriedades físicas e geométricas, modelos de elementos, modelos comportamentais e modelos relacionais.
3. Camada inteligente: Engloba todas as camadas do DT que suporta a coleção de dados, a integração e a interfuncionalidade num ambiente integrado. Esta camada está equipada de inteligência artificial, algoritmos de *machine learning* e dados acessíveis para a empresa, engenharia e operações.
4. Camada de dados: Modelos auto evolutivos de dados através de algoritmos para gerar instâncias de informação permitem a integração de dados dos modelos físico e virtual.
5. Camada organizacional: Através de sistemas de serviços como o planeamento de recursos da organização e a gestão relacional de clientes, esta camada permite métodos de produção e gestão baseados em dados.

De acordo com o estudo, a abordagem pelo mesmo apresentada consiste em uma estrutura genérica e, por essa mesma razão, fácil de expandir para diversos sistemas e permite uma integração rápida e fácil de novos recursos. Outro dos benefícios é a interconectividade através da obrigatoriedade de elaborar um formato *standard* de dados e especificar os protocolos de comunicação. A inclusão de dados operacionais e do ambiente, permitem alcançar maior eficiência e uma organização mais *lean* e competitiva.

2.4.5 Integração de um Gémeo Digital

O artigo “Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey” (Y. Cheng et al., 2018) levanta a questão mais pertinente quanto à temática, sendo esta “Como colmatar o fosso da integração ciber-física?”. Neste é possível encontrar o enquadramento proposto para responder a esta questão em quatro diferentes camadas:

1. Integração de elementos físicos totalmente interligados

É realizada a conexão entre os elementos físicos e depois é suportado o controlo próprio com atenção ao contexto, para todos os elementos heterogéneos, fornecendo os dados relevantes em tempo real para a integração de modelos virtuais.

2. Integração de modelos virtuais fielmente espelhados

Integra modelos relacionados com a fabricação com dados em tempo real para a gestão da produção. Estes modelos virtuais espelham as fábricas físicas, englobando modelos geométricos, de propriedades físicas, de resposta e lógicos. Permitem a interação e o controlo em tempo real entre a contraparte digital e o mundo físico, atraindo a atenção para uma melhor gestão da produção.

3. Todos os elementos/fluxos/atividades abrangidos pela integração de dados

A fusão de dados no sector do fabrico integra dados físicos e virtuais de várias fontes, incluindo dados em tempo real, dados simulados e dados de sistemas de informação existentes. Este processo de fusão, que envolve elementos físicos e modelos virtuais, gera, através da coevolução, dados que evoluem para dados gémeos digitais, com o objetivo de compreender a sua geração dinâmica e a sua evolução nas operações da fábrica.

4. Integração de serviços orientados para os dados e para as aplicações

A fusão de dados de gémeos digitais envolve a integração de elementos físicos e virtuais no fabrico. Impulsiona processos iterativos e a coevolução, gerando dados que refletem as operações da fábrica. Estes dados abrangem elementos, fluxos e empresas, contribuindo para a criação de valor e eficiência. Permite a prestação de serviços de fabrico através da integração orientada para os dados e melhora a gestão da produção nas fábricas, fazendo corresponder a oferta à procura.

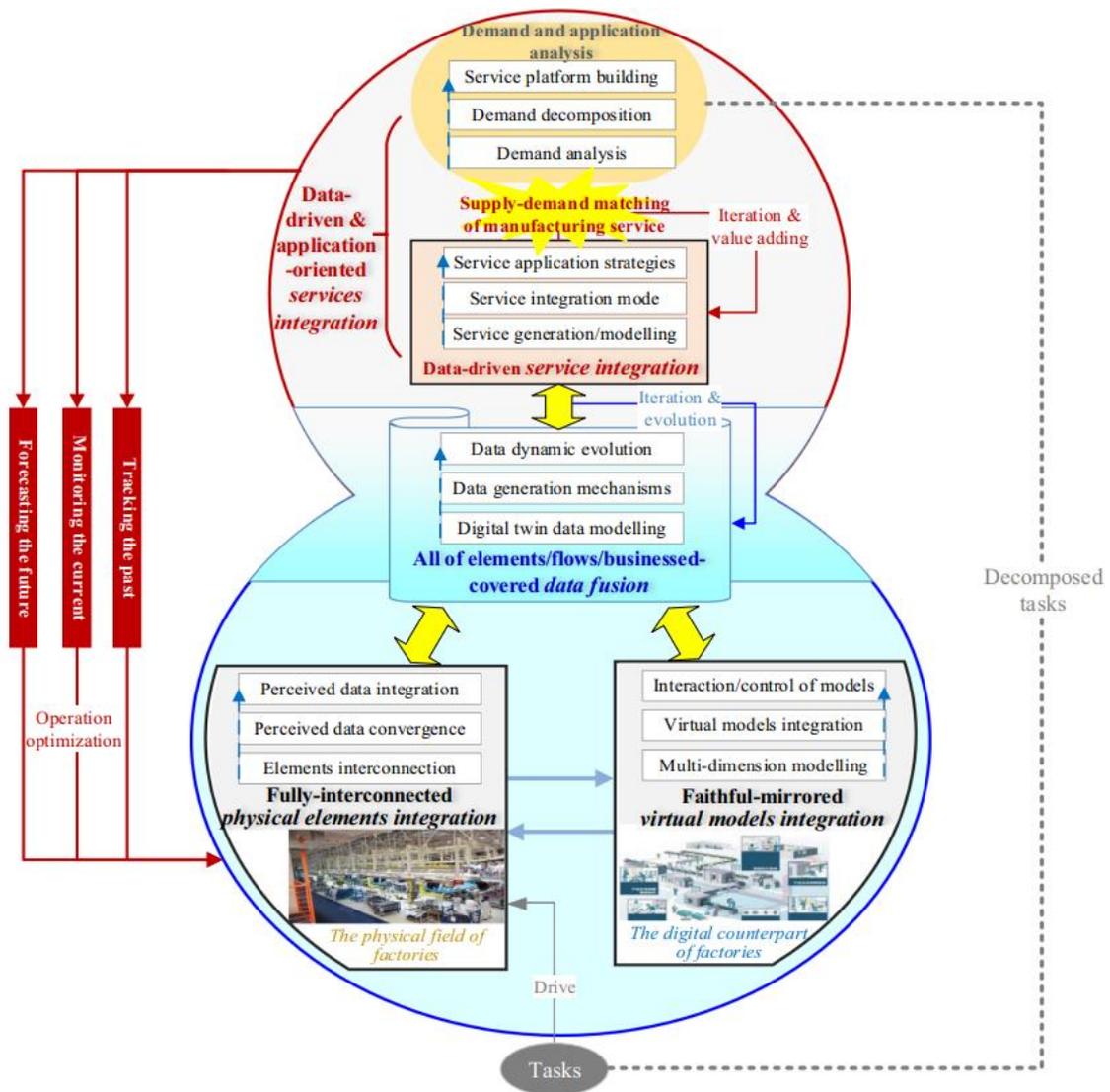


Figura 12 - Integração de um modelo ciberfísico numa fábrica (Y. Cheng et al., 2018)

A Figura 12 apresenta um cenário de integração de um modelo ciberfísico numa fábrica. Como mencionado anteriormente, o GD deve ser alimentado com qualquer alteração que ocorra no sistema físico ao longo do ciclo de vida do CPPS, os dados do modelo devem estar sincronizados bem como as relações destes com outros dados (Ashtari Talkhestani et al., 2019).

3. Sistema de recolha de resíduos na produção de componentes eletrónicos

A elaboração e o estudo de uma rota de resíduos são fundamentais para qualquer indústria, pois permite o cumprimento das normas ambientais associadas a organizações produtivas e a medição do desperdício na produção de um componente. A autora decide elaborar uma rota de resíduos de parte do chão de fábrica no fabrico de componentes eletrónicos. Este capítulo explora o conceito de utilização da tecnologia de gémeos digitais para a gestão de rotas de resíduos de componentes elétricos. A rota em questão é apresentada, assim como uma análise da taxa de ocupação do colaborador é realizada. Por fim, são identificados alguns dos principais componentes e fontes de dados.

3.1 Gestão de Resíduos

Compreende-se que a gestão de resíduos é composta pelas cinco etapas seguintes: (1) coleção, (2) transporte, (3) processamento, (4) reciclagem ou descarga e (5) monitorização dos materiais do desperdício (Demirbas, 2011). No entanto, previamente ao trabalho realizado pela empresa de gestão de resíduos, é necessário a elaboração de um processo de gestão de resíduos internos, de forma a reduzir o risco ambiental no manuseamento e eliminação dos mesmos. A Figura 13 apresenta um possível processo no tratamento interno da gestão de resíduos.

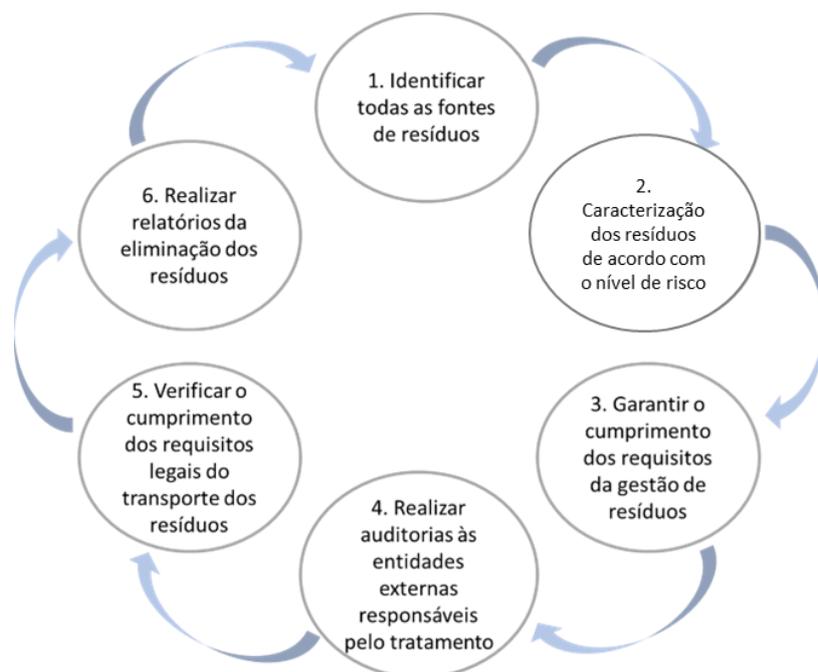


Figura 13 - Processo de tratamento de resíduos interno a uma organização

3.2 Aplicação de um Gémeo Digital ao Sistema de Gestão de Resíduos

A gestão de resíduos é fundamental para o manuseamento e eliminação dos diferentes tipos de resíduos possíveis de encontrar num complexo industrial, sendo neste caso abordados os componentes eletrónicos. Esta auxilia a otimização da atribuição de recursos, o que resulta na minimização do impacto ambiental e redução dos custos. A integração da tecnologia de gémeos digitais na gestão de rotas de resíduos oferece inúmeras vantagens. As capacidades de monitorização e rastreio em tempo real permitem que as autoridades de gestão de resíduos monitorizem a utilização e o desempenho dos componentes, permitindo a otimização das rotas de recolha e a recolha atempada. O gémeo digital facilita o manuseamento de materiais perigosos, proporcionando visibilidade em tempo real, garantindo a conformidade com os regulamentos e implementando procedimentos de manuseamento adequados. Através da simulação e otimização, as autoridades de gestão de resíduos podem analisar vários fatores para otimizar as rotas de recolha de resíduos, minimizando as distâncias de viagem e melhorando a atribuição de recursos, reduzindo assim os custos. Em geral, a tecnologia de gémeos digitais melhora a eficiência, a segurança e a sustentabilidade da gestão de rotas de resíduos de componentes elétricos.

Benefícios da tecnologia gémeo digital na monitorização da rota de resíduos

Os benefícios da implementação da tecnologia gémeo digital no manuseamento e monitorização de uma rota de resíduos são inúmeros. Assim sendo, a autora realizou o levantamento dos mesmos e procedeu à sua análise.

1. Monitorização em tempo real e visualização das atividades de coleção dos resíduos

A integração de elementos de medição e localização nos postos de recolha de resíduos permitirá a monitorização das métricas de resíduos, bem como o desenho eficaz das atividades necessárias para responder às necessidades reais da organização. É necessário mapear os pontos de recolha e definir as métricas a monitorizar.

2. Análise preventiva da tomada de decisões e deteção de problemas

O levantamento de diversos dados permite criar um padrão das necessidades, bem como das dificuldades encontradas na solução, quer esta seja realizada com recurso a mão de obra ou a automação. A monitorização em tempo real permite uma intervenção ativa e com maior eficiência nos problemas.

3. Otimização da rota e alocação de recursos

Através do acesso a dados em tempo real, é possível otimizar o percurso a realizar dependendo das necessidades no momento. Devido à oscilação atual no fornecimento de componentes eletrônicos é uma mais valia ter uma avaliação constante e em tempo real. Para além de ser possível definir a melhor rota dependendo do momento de recolha, é possível desenvolver planos de melhoria, como agrupar postos de depósito ou negociação dos materiais utilizados.

4. Impulsionar a sustentabilidade

O culminar das análises realizadas nos pontos anteriores permite desenvolver relatórios de análise sustentável com mais dados e desenvolver iniciativas mais adequadas.

3.3 Análise da rota de resíduos a contemplar

A área produtiva é composta por diferentes áreas de trabalho e apresenta três rotas dependendo dos resíduos. Na Figura 14 é possível verificar a existência de 3 tipos de resíduos recolhidos pelas respetivas rotas, representados por diferentes sinaléticas.

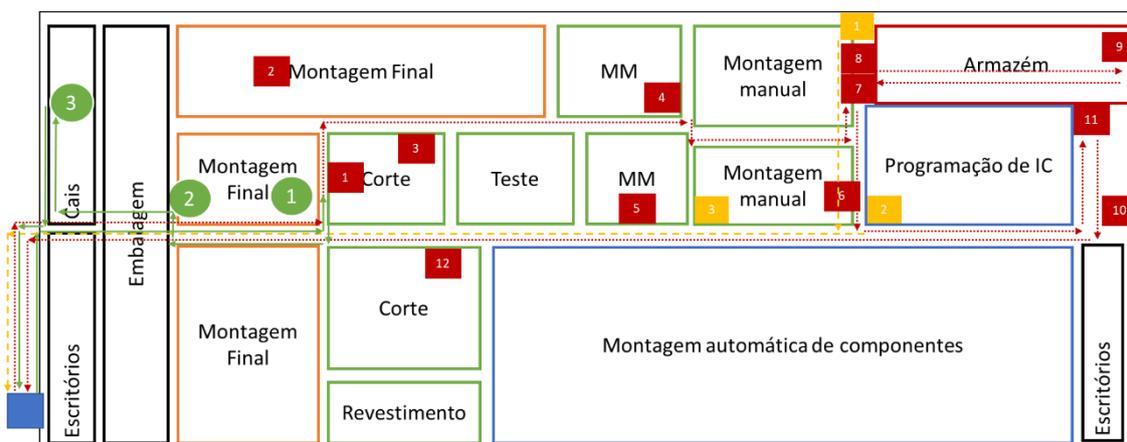


Figura 14 - Layout com as diferentes rotas de resíduos (Elaborado pela autora, 2023)

A Rota 1 tem a duração de 20 minutos e ocorre cinco vezes por dia às 15h00, 17h00, 18h30, 20h00 e 22h30 horas. O percurso é delineado dos pontos 1 a 12, sendo estes marcados a vermelho na imagem. O operador recolhe os resíduos das áreas de corte e de montagem final. De seguida, desloca-se para a recolha do lixo comum e de cartão, situados nas áreas de montagem manual. Por fim, os resíduos da montagem automática de componentes, como o plástico, as embalagens contaminadas e os sacos de lixo comum, são reunidos no centro de depósito localizado nos pontos 10 e 11. A recolha é realizada através do auxílio de um contentor metálico, para o qual o colaborador faz a transição dos resíduos. A Rota 2 tem a duração de 20 minutos e

ocorre duas vezes por dia. O conteúdo de trabalho encontra-se representado por uma trajetória verde e passa pela recolha de caixas pretas de rampas na zona de montagem final e na zona de embalagem e paletização para transportar até ao armazém. A Rota 3 ocorre três vezes por dia, durante 15 minutos, onde o colaborador é responsável pela recolha dos *bigbags*.

De acordo com os parâmetros associados às diferentes rotas e o tempo disponível por operador, é possível calcular a taxa de ocupação do mesmo. Supondo que a área produtiva opera durante 24 horas, é necessário descontar às mesmas os intervalos, a ginástica laboral e a limpeza do posto de trabalho. A Tabela 4 apresenta o tempo disponível do colaborador tendo em conta as paragens anteriormente mencionadas.

Tabela 4 - Tempo disponível por operador em três turnos (Elaborado pela autora, 2023)

	Horas	Minutos	Segundos
Horário disponível s/ paragens	24	1 440	86 400
Intervalos	0,9	54	3 240
Ginástica Laboral	0,15	9	540
Limpeza	0,1	6	360
Tempo útil	22,85	1 371	82 260

Tendo em conta os horários definidos para a rota 1 e a baixa periodicidade com que o levantamento dos restantes resíduos é realizado, podemos concluir que basta um colaborador para realizar o levantamento dos resíduos no edifício, demorando cerca de 170 minutos. Um colaborador, por turno, tem cerca de 457 minutos disponíveis e, caso seja acrescentada 1 hora para o transporte até ao centro de resíduos da organização, este fica com 227 minutos inocupado. Assim, a taxa de ocupação do funcionário encarregue da gestão de resíduos é de aproximadamente 50%.

3.4 Principais componentes e fontes de dados para a criação do gémeo digital

De acordo com o SIMIO BOOK, os softwares utilizados para criar modelos de simulação permitem “representar componentes comuns do sistema e monitorizar o seu comportamento ao longo do tempo”. Para tal, é necessário identificar os componentes do sistema e as fontes de dados que permitiram monitorizar o seu comportamento, bem como desenvolver informações.

Desconstruindo a rota de recolha é possível perceber que em todos os pontos identificados serão encontrados depósitos de diferentes dimensões, dependendo do resíduo a recolher. Para

possibilitar a recolha otimizada será necessário obter informação sobre o nível de resíduos presentes em cada ponto. Para tal é necessário:

⇒ **Sensores e Dispositivos IdC:** estes permitem recolher dados em tempo real do sistema físico e podem estar colocados nos contentores, nos veículos de recolha e nas infraestruturas de depósito final.

É necessário definir a informação a analisar, como o nível de enchimento e a localização, ou outros parâmetros que possam ser relevantes para fornecer dados essenciais ao gémeo digital.

⇒ **Dispositivos GPS:** permitem monitorizar a localização e o movimento do veículo de recolha dos resíduos em tempo real, o que permite a representação precisa dos movimentos do veículo no gémeo digital, permitindo a otimização da rota em todos os momentos.

⇒ **Dados Históricos:** Os dados históricos sobre a produção de resíduos, os horários de recolha e outros dados operacionais são valiosos para a criação de um gémeo digital eficaz. Estes fornecem informações sobre padrões, tendências e métricas de desempenho, permitindo simulações precisas, análises preditivas e otimização da gestão de rotas de resíduos.

⇒ **Software de Gestão dos Resíduos:** é necessário adquirir um sistema para o processamento e análise de dados para gerir o trajeto de resíduos, integrando dados de outras fontes.

Permite visualizar e analisar os dados para obter informação, monitorizar o desempenho da rota e otimizar os percursos de recolha ao longo do tempo.

⇒ **Dados externos:** estes podem ajudar na tomada de decisão e a otimizar o percurso de recolha.

São dados como os volumes de produção em tempo real e a capacidade de ocupação das linhas associadas a cada caixote nas próximas horas, de forma a definir prioridades na recolha.

A integração deste conjunto de componentes permite criar um gémeo digital preciso que representa a infraestrutura de recolha de resíduos e permite monitorizar em tempo real, criar análises preditivas e otimizar os processos da gestão de recolha.

4. Implementação de um *digital twin* na monitorização da recolha de resíduos

A criação da rota de gestão de resíduos no *software* envolve a modelação do movimento dos materiais, a optimização da rota e a garantia da eliminação/reciclagem adequada dos mesmos. O SIMIO permitirá visualizar e analisar os processos envolvidos em toda a gestão destes resíduos. No presente capítulo será detalhado o processo de criação da rota de gestão de resíduos.

4.1 Definição do Objetivos e do Âmbito do Projeto

A criação deste sistema virtual deve-se à necessidade de otimizar a rota de recolha, pois a necessidade de alguém dedicado, porém com baixo nível de ocupação, representa um desperdício de recursos. A possível oportunidade de melhoria seria substituir a mão de obra por um sistema de recolha automático, como um AMR (*autonomous mobile robot*).

4.2 Criação do protótipo

Neste modelo será reproduzida a rota de recolha número 2, anteriormente caracterizada no capítulo 3.3 Análise da rota de resíduos a contemplar com a cor verde, constituída por três pontos de depósito de caixas pretas da zona de montagem final e da zona de embalagem a transportar para o contentor. O seguinte esquema, elaborado pela autora, apresenta uma idealização simplista do sistema virtual (Figura 15).

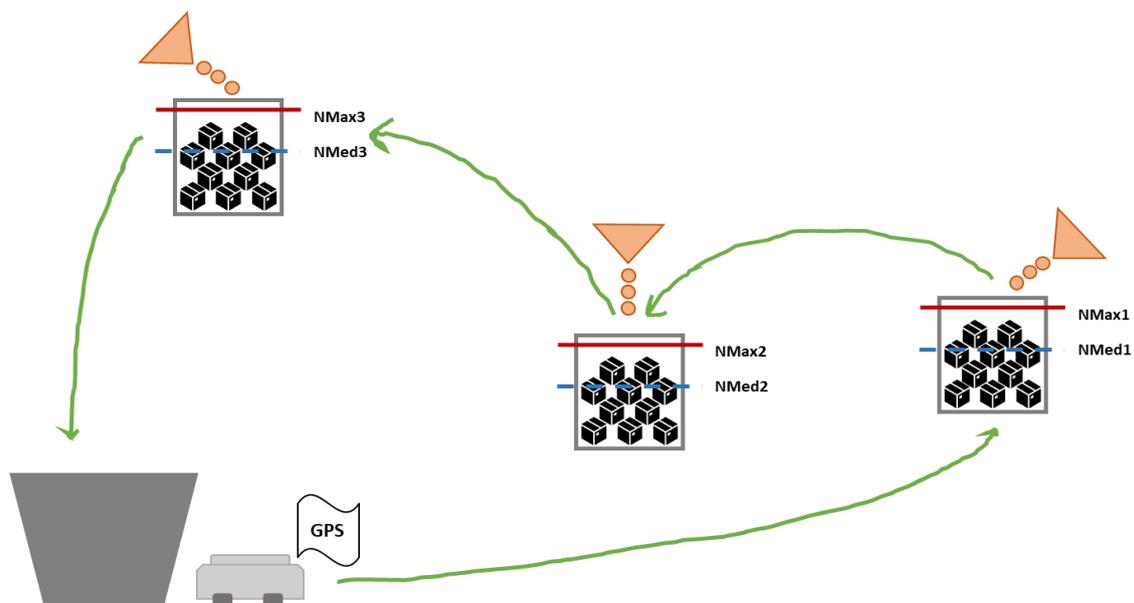


Figura 15 - Esquema representativo do sistema a elaborar (Elaborado pela autora,2023)

No acesso a um novo projeto no *software* na aba “*Facility*” é possível encontrar à esquerda as bibliotecas de elementos que podem constituir o modelo de simulação e na barra superior várias ferramentas relacionadas com o mesmo. (Figura 16)

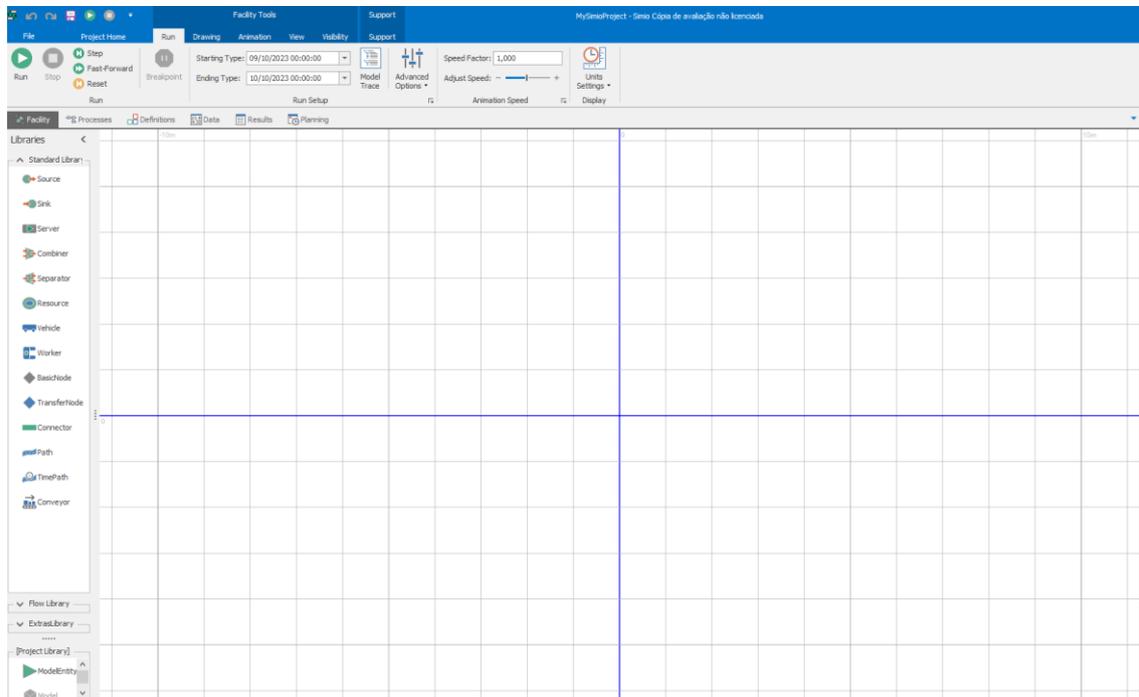


Figura 16 - Interface do software SIMIO

O processo de elaboração do modelo “protótipo” ocorreu de acordo com a adição dos seguintes elementos da biblioteca de objetos:

- *Combiners* para representar os três caixotes, denominados por: Caixaote1, Caixaote2 e Caixaote3;
- *Sources* (Zona1, Zona2, Zona3) que correspondem à fonte de resíduos de cada caixaote e *sources* (SourceCaixote1, SourceCaixote2, SourceCaixote3);
- Depósito das entidades que irão circular pelo sistema, os resíduos, representado por um *Sink*;
- Veículo que irá realizar um caminho definido de acordo com a localização dos caixotes;
- Caminhos desde a fonte das entidades, as várias zonas, até aos caixotes para estas atribuídos;
- Entidades que representam os resíduos procedentes das diferentes *sources* (zonas) a serem processadas pelos diferentes *combiners* (caixotes do lixo).
- Entidades que representam os caixotes que serão trocados quando o veículo recolher o caixaote cheio.

As *sources* criam as entidades a serem processadas pelos *combiners* para estas, posteriormente, circularem pelo caminho elaborado com o auxílio a um veículo e, por fim, serem destruídas pelo *sink*. O transporte selecionado, neste caso será o veículo, transportará as entidades entre nodes através de uma rota pré-definida (*fixed route*). Este possui a possibilidade de colocar as entidades na sua fila “*RideStation.Contents*” (Apontamentos disponibilizados na UC de Simulação do MES, 2023).

4.3 Construção do Modelo

Após identificar os objetos necessários começa a fase intitulada pela autora de “Construção do Modelo” onde serão detalhados os seguintes parâmetros: layout; entidades; recursos; processos; rotas e logística e regras.

Para permitir o processamento de resíduos provenientes de diferentes zonas é necessário definir as entidades que os representem, para posteriormente serem indicadas em cada entrada (*source*). As entidades são denominadas de Resíduo 1, Resíduo 2 e Resíduo 3 (Figura 17) e constituem o *Entity Type* das Zonas 1, 2 e 3, respetivamente.

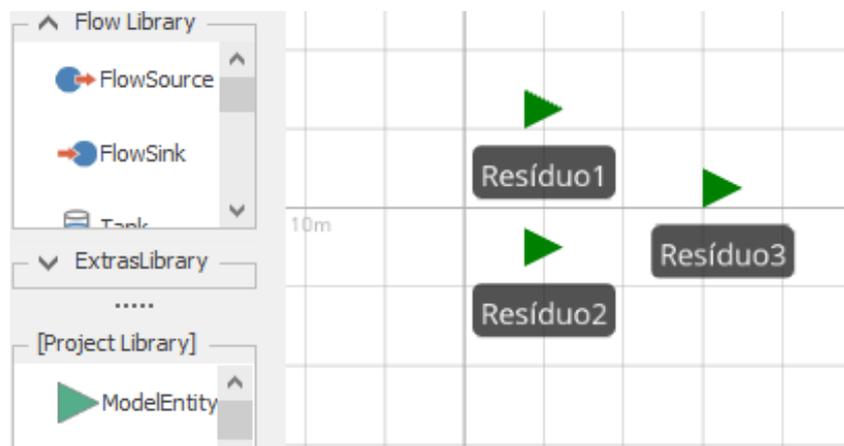


Figura 17 - Três entidades que representam os resíduos das três zonas

De seguida, foi necessário definir as propriedades de cada zona fonte de resíduos, para a Zona1 o tempo entre chegadas é definido por uma distribuição exponencial de valor 5 sendo a unidade minutos e o número de entidades por chegada é de 6 (Figura 18). Para as zonas 2 e 3 o tempo de chegada entre entidades foi de 4 e 6 minutos e o número de entidades por chegada foi de 4 e 5, respetivamente.

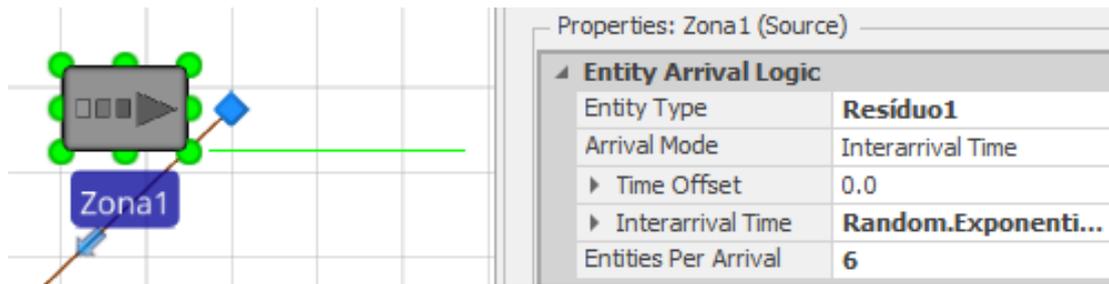


Figura 18 - Propriedades da chegada de resíduos a um caixote resíduos

Depois de criado o resíduo foi necessário conceber o processamento do mesmo nos respectivos caixotes. A representação dos caixotes utilizados foi elaborada através da criação de uma entidade denominada Caixote que será processada por três diferentes *sources*, pois todos necessitam de trocar entre um caixote cheio por um vazio aquando da recolha do veículo. O *connector* entre a fonte de caixotes e o caixote em si permite esse fluxo. Para garantir que o aparecimento de um novo caixote acontece quando necessário, foi criado um evento denominado de Criar Caixote para cada *Source* Caixote. A Figura 19 demonstra os passos anteriormente descritos.

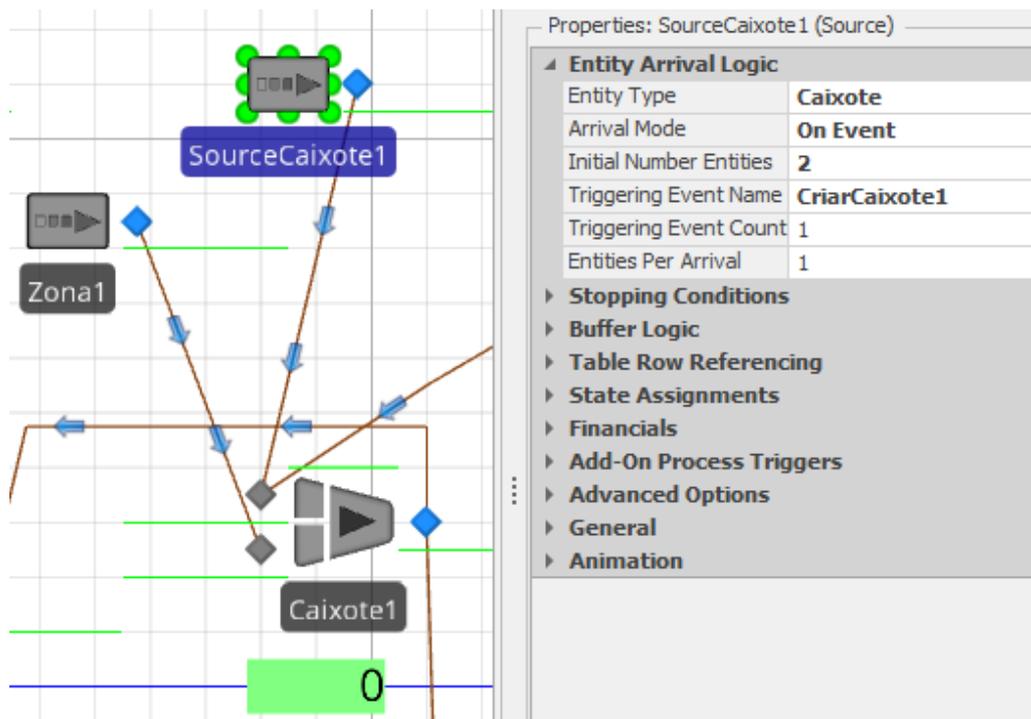


Figura 19 - Propriedades da entrada de caixotes e modelação da zona de despejo de resíduos

A lógica de processamento dos caixotes, sendo esta representada como *combiner* no software, foi idealizada de forma a ser possível acomodar um nível máximo de entidades definido nas propriedades como “_NivelMax” (Figura 20).

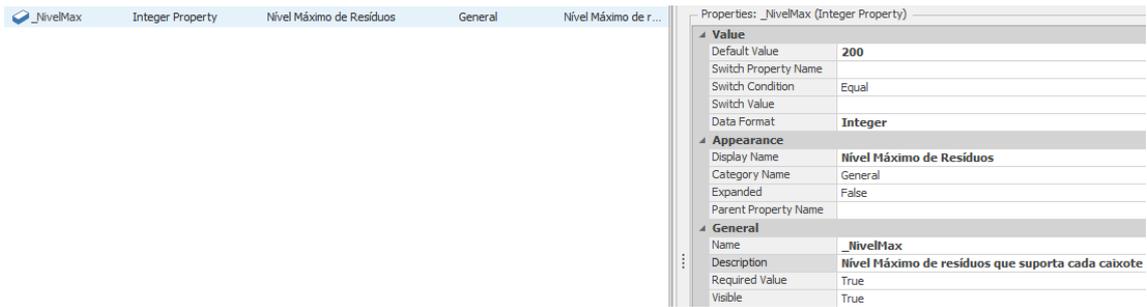


Figura 20 - Número máximo de resíduos que cada caixote acomoda

Para depositar os caixotes numa zona própria para tal, foi necessário criar um *sink* que representa o “Depósito” onde estes serão aglomerados (Figura 21).

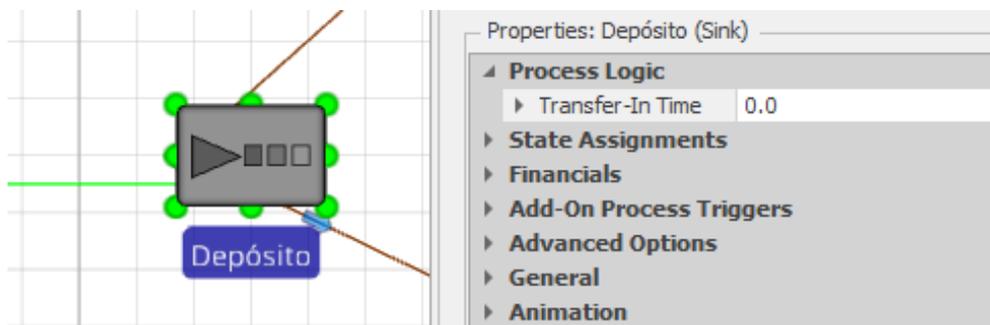


Figura 21 - Depósito de resíduos

Um passo importante para a correta elaboração do modelo é a criação de uma rota que responda às suas necessidades. A primeira tarefa foi a adição de um “Veículo” ao modelo e a definição de alguns dos seus parâmetros (Figura 22).

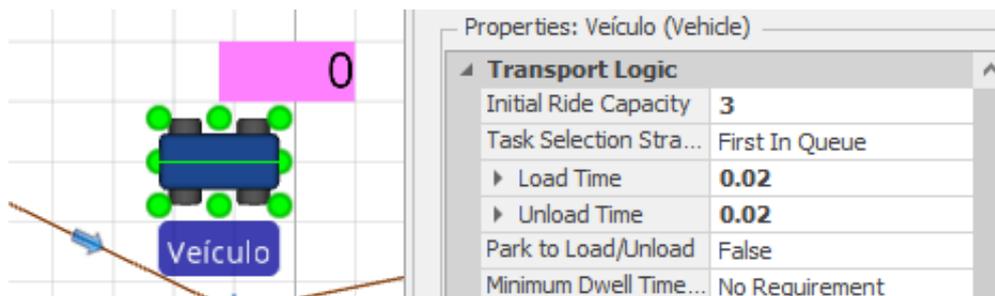


Figura 22 - Propriedades lógicas do transporte

Em seguida, é criado o nodo de “Estacionamento”, onde o veículo deve iniciar a sua rota e ao qual deve regressar assim que a mesma terminar. Para definir o movimento do veículo foi criada a tabela de sequência “Rota Recolha” para controlar a ordem pela qual o veículo visita os nodos (Figura 23). Nesta devem ser adicionados: o nodo inicial onde o veículo se encontra; os nodos de recolha das entidades processadas; e o nodo de depósito das mesmas.

Rota Recolha	
Sequence	
1	Estacionamento
2	Output@Caixote 1
3	Output@Caixote 2
4	Output@Caixote 3
5	Input@Depósito

Figura 23 - Tabela de Sequência da Rota de Recolha

A lógica do veículo (Figura 24) foi alterada de forma a ler a tabela de sequência que determina o movimento seguinte.

Properties: Veículo (Vehicle)

- Transport Logic**
 - Initial Ride Capacity: 3
 - Task Selection Strategy: First In Queue
 - Load Time: 0.02
 - Unload Time: 0.02
 - Park to Load/Unload: False
 - Minimum Dwell Time Type: No Requirement
- Travel Logic**
 - Initial Desired Speed: 2.0
 - Initial Travel Mode: Network If Possible
 - Initial Network: Global
 - Network Turnaround Method: Exit & Re-enter
 - Free Space Steering Behavior: Direct To Destination
- Routing Logic**
 - Initial Priority: 1.0
 - Initial Node (Home): Estacionamento
 - Routing Type: Fixed Route
 - Route Sequence: RotaRecolha
 - Off Shift Action: Park At Node

Figura 24 - Propriedades do veículo

De forma a facilitar a visualização da recolha foi criada uma legenda que possibilita a visualização do número de entidades que o veículo recolhe ou dispensa em cada iteração, utilizando a sua fila "RideStation" (Figura 25).

Properties: RideStation.Contents (Status Label)

- Appearance**
 - Back Color: 255; 128; 255
 - Text Color: 0; 0; 0
- Animation**
 - Attached To: Veículo
 - Expression: RideStation.Contents

Figura 25 - Legenda do número de entidades presentes no veículo

A partir deste passo da construção do modelo é necessário começar a definir regras para acionar o movimento apenas quando necessário.

4.3.1 Controlo do sistema através de variáveis

No SIMIO, é possível obter o comportamento desejado utilizando processos e processos complementares. O principal objetivo nesta fase de elaboração do sistema virtual é adicionar um gatilho ao veículo para que este apenas inicie o movimento da rota quando acionado pelos parâmetros escolhidos pela autora. O parâmetro mais indicado para acionar o movimento do veículo é a criação de um nível de chamada para quando os caixotes atingirem um valor próximo ao nível máximo. Os seguintes passos foram elaborados de forma a atingir o resultado desejado:

1. Criação da variável que represente o nível de chamada do veículo “_NivelChamada” (Figura 26);

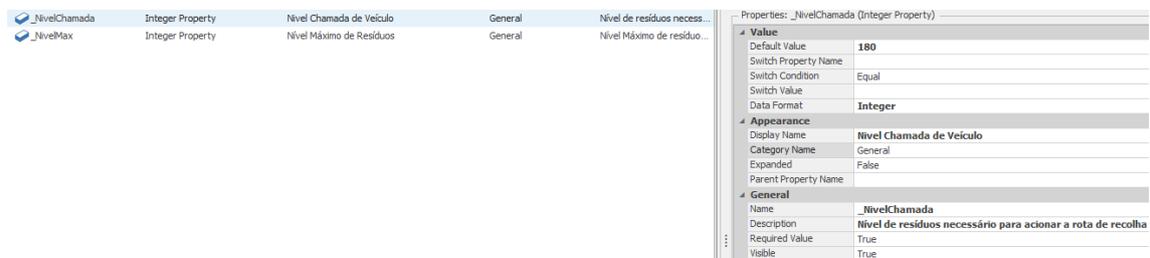


Figura 26 - Número de resíduos presentes no caixote que demanda a recolha do mesmo

2. Criação de uma tabela que permite ligar: a condição de comparação do número de resíduos presentes em cada caixote com o nível de chamada para cada caixote; um evento que represente o carregamento do caixote para o veículo; e um segundo evento garante que o veículo espera no output pelo mesmo (Figura 27).

Rota Recolha			
Troca Caixotes			
	Cond Quanto Caixote	Evento Carregamento	Evento Transição
1	Caixote1.ParentInputBuffer.Contents.FirstItem.ModelEntity.BatchMembers.NumberWaiting >= _NivelChamada	IniciarCarregamento1	EsperaCaixote1
2	Caixote2.ParentInputBuffer.Contents.FirstItem.ModelEntity.BatchMembers.NumberWaiting >= _NivelChamada	IniciarCarregamento2	EsperaCaixote2
3	Caixote3.ParentInputBuffer.Contents.FirstItem.ModelEntity.BatchMembers.NumberWaiting >= _NivelChamada	IniciarCarregamento3	EsperaCaixote3
*			

Figura 27 - Tabela de relação entre a condição e os eventos de recolha e espera de caixotes

3. Referenciar o evento de carregamento do caixote na lógica de espera de cada caixote garantindo que o caixote só é carregado quando o evento é acionado (Figura 28). Nas propriedades de um *combiner* é possível encontrar a lógica para a fila de espera do *parent input*. Este destina-se à entrada de caixotes e o *member input* à entrada dos resíduos. Na

opção de acionamento do abandono do caixote (*renege triggers*) foram indicadas as seguintes propriedades:

- Tipo de acionamento: Baseado em evento;
- Nome do evento de acionamento: “IniciarCarregamento(1...n)”;
- Tipo de Decisão de abandono: Condicional;
- Condição abandono: “ModelEntity.BatchMembers.NumberWaiting >= _NivelChamada”;
- Nodo para onde sair: Output@Caixote1...n.

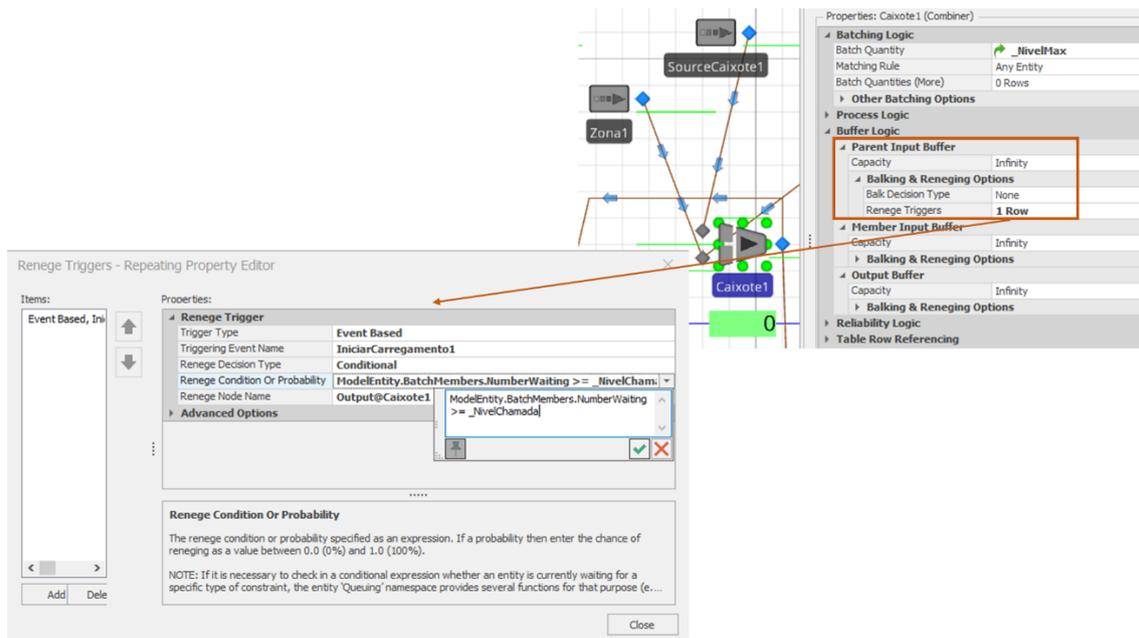


Figura 28 - Definição lógica do processo do Caixote 3 resíduos

Para visualizar o número de resíduos em cada caixote ao longo de toda a simulação foi criada a variável “ResíduosEmCaixote(1...n)”, posteriormente utilizada em três etiquetas e em sensores que atualizam o valor em tempo real.

4.3.2 Conceção de processos

Com a finalidade de interligar toda a informação anteriormente detalhada é necessário criar processos que ativem no momento indicado e sigam a linha de execução desejada.

Controlo de Resíduos

A primeira categoria apresentada é o “Controlo de Resíduos”, onde foram elaborados os processos “ControloCaixote(1...n)” e “ReinicializarControloCaixote(1...n)” (Figura 29). O primeiro destina-se à adição de resíduos na variável “ResíduosEmCaixote(1...n)” e este ocorre cada a vez que resíduos entram no membro do Caixote, ou seja, está desenhado como um gatilho complementar ao

processo. O segundo propõe-se a retomar o valor de “ResiduosEmCaixote(1...n)” a zero de cada vez que o processo “IniciarCarregamento(1...n)” foi acionado. Isto indica que quando o evento de gatilho de abandono da entidade caixotes ocorre, também o processo de reiniciar o valor de resíduos por caixote. Este último é um gatilho complementar ao processo de saída do Caixote.

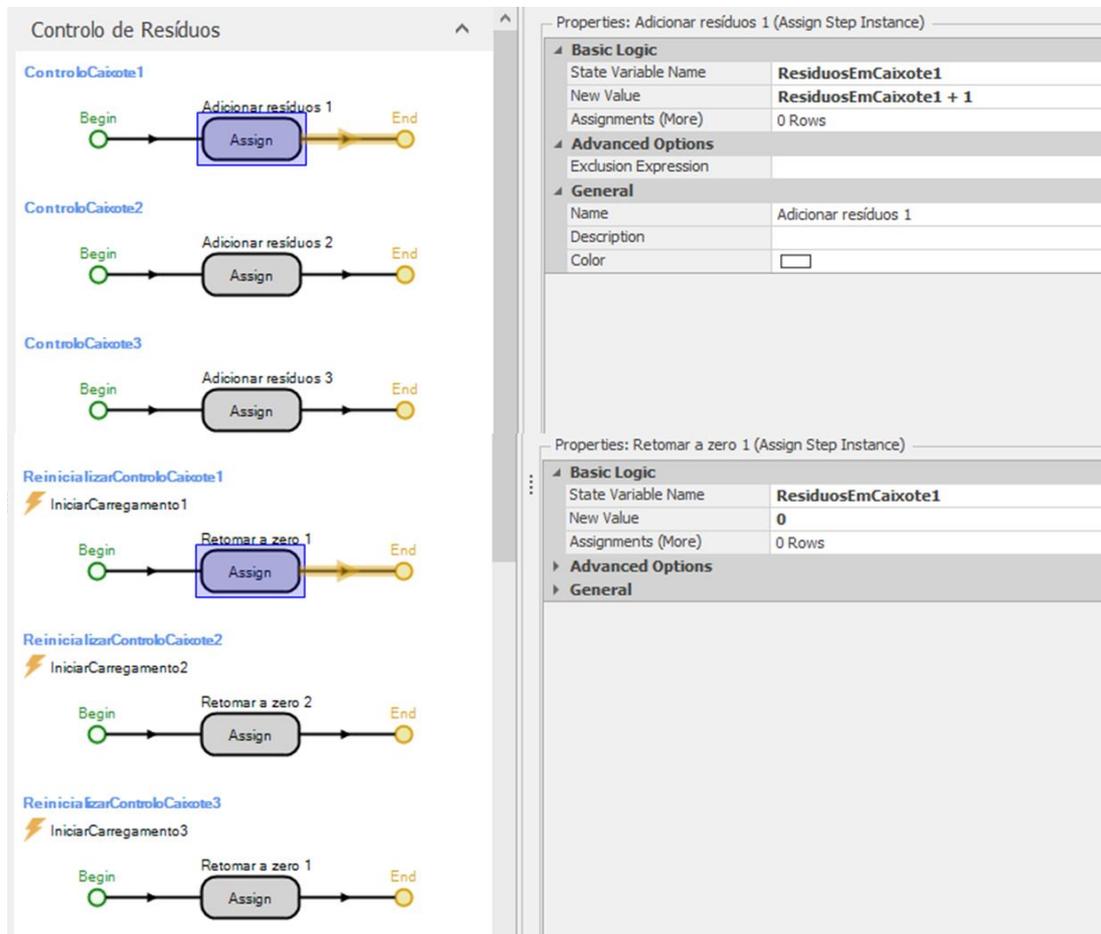


Figura 29 - Processos de controlo da quantidade de resíduos

Para detetar a passagem no sentido positivo do limiar “_NivelChamada” da variável “ResiduosEmCaixote(1...n)”, foram adicionados sensores que a monitorizam (Figura 30). A passagem de qualquer um destes sensores aciona o processo que dá início à rota.

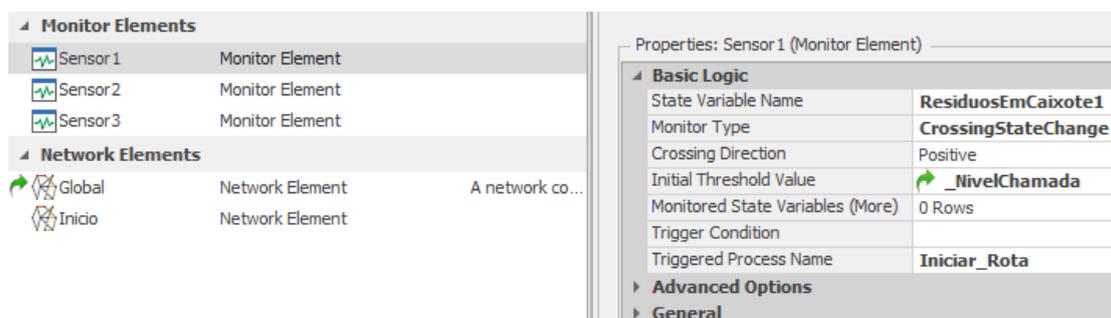


Figura 30 - Sensores que monitorizam o nível de resíduos em caixote

Processo de Carregamento

A segunda categoria é destinada aos processos de carregamento da entidade caixote no veículo. Os primeiros três processos, denominados de “Direcionar_linha(1...n)”, promovem o direcionamento das entidades que entram no *output* de cada caixote à tabela Troca Caixotes. Assim sendo é possível encontrar estes processos nas propriedades de cada “Output@Caixote(1..n)” (Figura 31).

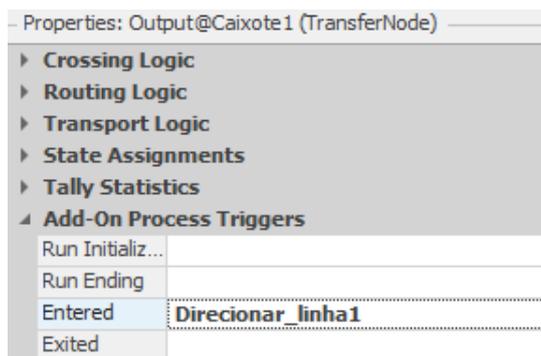


Figura 31 - Gatilho do processo complementar de entrada de entidades no output do Caixote

Este processo é constituído por um passo *Set Row* que indica a linha da tabela a considerar e um passo *Execute* que executa o processo Recolha, analisado posteriormente (Figura 32).

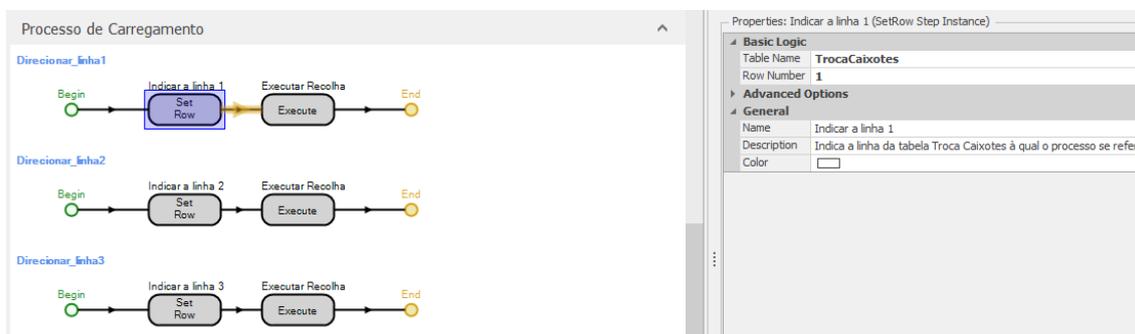


Figura 32 - Processo de direcionamento das entidades

O processo Recolha (Figura 33) é composto pelos seguintes passos:

- *Decide*: Verificar se quando este é executado o objeto é o veículo;
- *Decide*: Direciona para a coluna “TrocaCaixotes.CondQuantnoCaixote” que verifica se o caixote já atingiu o nível de chamada;
- *Fire*: Despoletar o evento presente na coluna “TrocaCaixotes.EventoCarregamento” que corresponde ao processo de início de carregamento;
- *Wait*: Esperar pelo evento que se encontra na coluna “TrocaCaixotes.EventoTransicao” que corresponde ao respetivo processo de espera do caixote.

No caso de não ser encontrado o veículo, lógica presente no primeiro decide, despoletar o evento presente na coluna “TrocaCaixotes.EventoTransicao”.

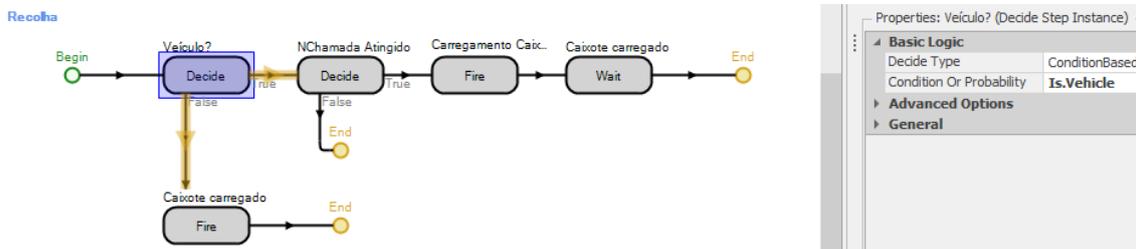


Figura 33 - Processo de recolha dos caixotes (Captura do Software)

Rota do veículo

Esta categoria, composta por dois processos simples, o primeiro comanda o veículo a esperar pelo evento “IniciarRota” no estacionamento e o segundo detona o evento “IniciarRota” (Figura 34).

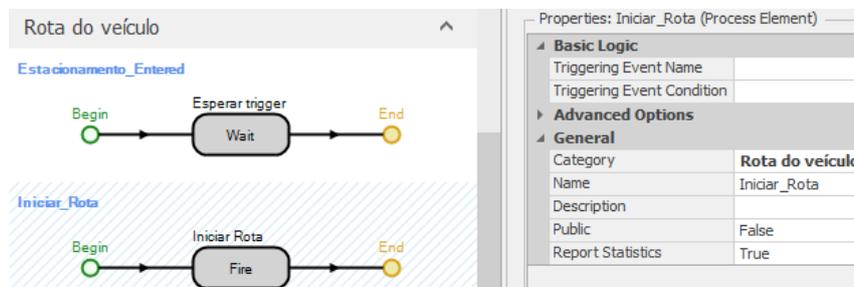


Figura 34 - Processos de controlo da rota do veículo

Criar Caixote

A última categoria destina-se a despoletar a criação de entidades caixote, cada vez que estes não se encontram disponíveis para a colocação de resíduos (Figura 35).

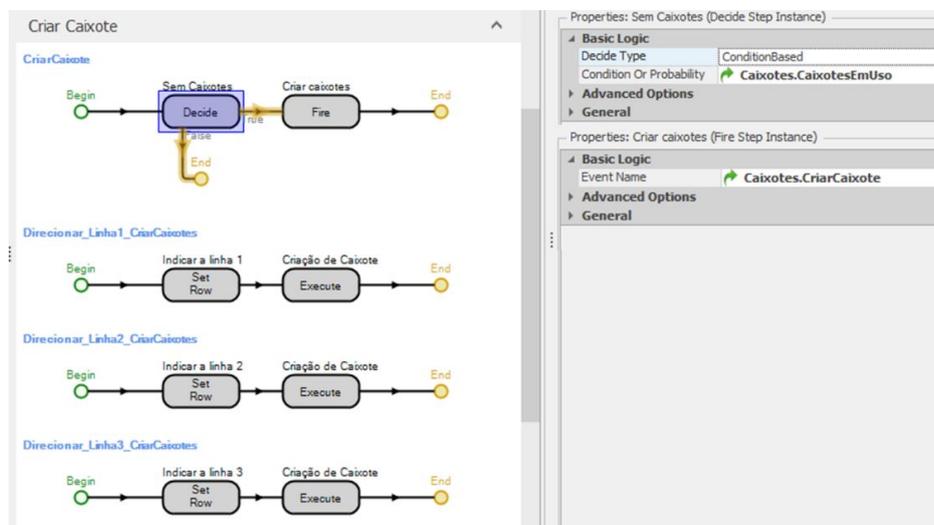


Figura 35 - Processos para a criação de caixotes

Os últimos três processos, denominados de “Direcionar_linha(1..n)_CriarCaixotes”, promovem o direcionamento à saída do *output* de cada caixote à tabela Caixotes (Figura 36). Assim sendo é possível encontrar estes processos nas propriedades de cada “Output@Caixote(1..n)”.

	Rota Recolha	Troca Caixotes	Caixotes
	Caixotes Em Uso		Criar Caixote
1		Caixote1.ParentInputBuffer.Contents <= 0	CriarCaixote1
2		Caixote2.ParentInputBuffer.Contents <= 0	CriarCaixote2
▶ 3		Caixote3.ParentInputBuffer.Contents <= 0	CriarCaixote3

Figura 36 - Tabela Caixotes

4.3.3 Interação com o utilizador

Para facilitar a visualização na ótica do utilizador, foi adicionado um “*button*” para permitir ao utilizador interagir com a entrada de resíduos na zona 1 e assim representar uma entrada fora do padrão delineado. Esta interação incorpora, de certa forma, um evento externo ao modelo de simulação, e pode vir a ser substituído por um evento oriundo do **gémeo físico**, abrindo assim um canal de comunicação direto para o **gémeo digital**. Nesta fase, é o utilizador que discricionariamente pode produzir este evento, em momentos imprevisíveis para o modelo. Assim, foi criado um evento que será o *trigger* do botão e o *server* criado, para representar a entrada desses resíduos quando o botão é pressionado (Figura 37).

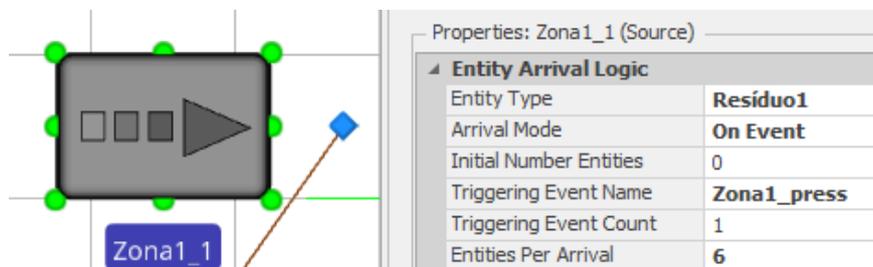


Figura 37 - Zona1_1 server

4.4 Integração da Base de Dados no Modelo de Simulação

O propósito da integração de uma base de dados no funcionamento do modelo de simulação é garantir o fluxo de informação em tempo real e o armazenamento do histórico. Posteriormente, será possível integrar ferramentas de otimização no funcionamento do modelo de simulação para facilitar a análise de dados e eliminar a dubiedade da informação. De notar que a subscrição utilizada é gratuita e para estudantes e, assim sendo, não disponibiliza todos os serviços da ferramenta.

4.4.1 Criação da Base de Dados no *Microsoft Azure*

Inicialmente, a autora estudou as ferramentas disponíveis no *Microsoft Azure* e optou pela criação de uma BD na nuvem.

Os passos para a criação da base de dados “SimioResultsDB” foram os seguintes:

1. Criar o servidor da base de dados com “carolsim.database.windows.net” como nome de utilizador (Figura 38);

Detalhes de servidor

Introduza as definições necessárias para este servidor, incluindo fornecer um nome e uma localização. Este servidor será criado na mesma subscrição e grupo de recursos que a base de dados.

Nome do servidor *	<input type="text" value="carolsim"/> 
	.database.windows.net
Localização *	<input type="text" value="(US) East US"/> 

Figura 38 - Servidor da base de dados

2. Escolher o método de autenticação do servidor, sendo neste caso selecionada a autenticação SQL (Figura 39);

Selecione os seus métodos de autenticação preferenciais para aceder a este servidor. Crie uma palavra-passe e um início de sessão de administrador do servidor e aceda ao seu servidor com autenticação SQL, selecione apenas a autenticação do Microsoft Entra [Saiba mais](#) ao usar um utilizador, grupo ou aplicação Microsoft Entra existente como administrador do Microsoft Entra [Saiba mais](#), ou selecione a autenticação SQL e Microsoft Entra.

Método de autenticação	<input type="radio"/> Utilizar a autenticação apenas do Microsoft Entra <input type="radio"/> Utilizar a autenticação SQL e do Microsoft Entra <input checked="" type="radio"/> Utilizar a Autenticação SQL
Início de sessão de administrador do servidor *	<input type="text" value="carol"/> 
Palavra-passe *	<input type="password"/> 
Confirmar palavra-passe *	<input type="password"/> 

Figura 39 - Autenticação do servidor

3. Criação da base de dados (Figura 40).

Detalhes do projeto

Selecione a subscrição para gerir os recursos implementados e custos. Utilize os grupos de recursos como pastas para organizar e gerir todos os recursos.

Subscrição * ⓘ Azure for Students

Grupo de recursos * ⓘ (Novo) Resíduos
[Criar novo](#)

Detalhes da base de dados

Introduza as definições exigidas para esta base de dados, incluindo escolher um servidor lógico e configurar os recursos de computação e armazenamento

Nome da base de dados * SimioResultsDB ✓

Servidor * ⓘ (novo) carolsim (East US)
[Criar novo](#)

Computação + armazenamento * ⓘ **Fins Gerais - Sem servidor**
Série standard (5.ª Geração), 2 vCores, 32 GB de armazenamento
[Configurar base de dados](#)

Figura 40 - Criação da base de dados "SimioResultsDB" no servidor "carolsim"

Para facilitar o desenvolvimento das tabelas e a inserção de dados, o *Azure Data Studio* foi instalado e conectado à nuvem do *Microsoft Azure*, através da *connection string* presente na Figura 41.

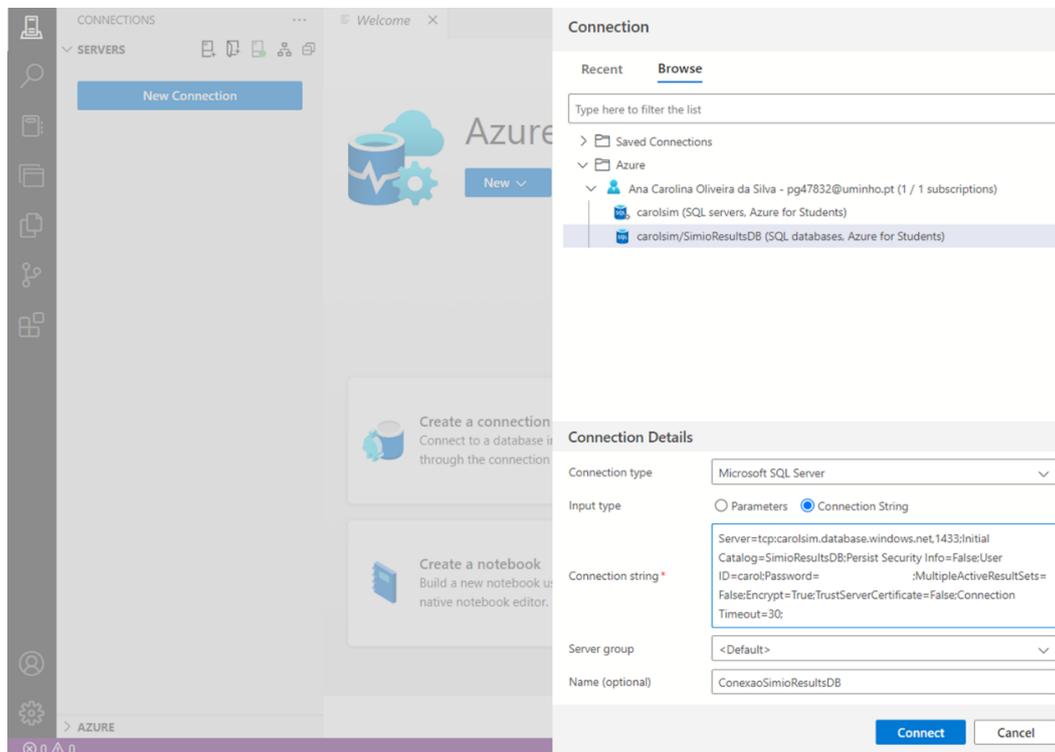


Figura 41 - Conexão entre o *Azure Data Studio* e a base de dados "SimioResultsDB"

O objetivo da implementação desta BD é a extração de resultados de simulação a cada turno, apesar do software de simulação não estar ativamente a usar as suas capacidades de planeamento. A leitura foi feita através de um temporizador no *Simio* que conta 8 horas, este simboliza a mudança de turno.

4.4.2 Orientação da Simulação aos Dados

Para extrair dados para a base de dados anteriormente apresentada é necessário habilitar o modelo de simulação a desenvolver esses mesmos parâmetros e armazená-los através da criação de variáveis e processos. A autora começou por conceptualizar os dados que pretende analisar e chegou ao seguinte rascunho Tabela 5.

Tabela 5 - Rascunho do conteúdo desejado para análise de resultados

Grupo 1	Número de resíduos que circularam entre uma zona 1 (<i>source</i>) e um caixote 1 (<i>combiner</i>)
	Número de resíduos que circularam entre uma zona 1_1 (<i>source</i>) e um caixote 1 (<i>combiner</i>)
	Número de resíduos que circularam entre uma zona 2 (<i>source</i>) e um caixote 2 (<i>combiner</i>)
	Número de resíduos que circularam entre uma zona 3 (<i>source</i>) e um caixote 3 (<i>combiner</i>)
Grupo 2	Número de vezes que o veículo carregou um caixote do (<i>combiner</i>) caixote 1
	Número de vezes que o veículo carregou um caixote do (<i>combiner</i>) caixote 2
	Número de vezes que o veículo carregou um caixote do (<i>combiner</i>) caixote 3
Grupo 3	Quantidade de entidades (caixote 1) que entraram no depósito (<i>sink</i>)
	Quantidade de entidades (caixote 2) que entraram no depósito (<i>sink</i>)
	Quantidade de entidades (caixote 3) que entraram no depósito (<i>sink</i>)

De forma a guardar os valores acima desejados, foram criadas variáveis de estado (*state variables*), sendo que podem mudar de valor durante a execução da simulação. Estas podem representar estados discretos, cujo valor pode ser alterado pela lógica de atribuição em momentos discretos durante a execução de uma simulação e incluem: estados numéricos, de cadeia de caracteres e de referência, referências de elementos (estações, temporizadores, etc.) e referências de objetos (servidores, entidades, transportadores, etc.). Ou podem assumir estados contínuos que muda contínua e automaticamente com base na sua taxa atual e aceleração opcional. Neste modelo, as

variáveis criadas foram do tipo discreta e, às quais compete o armazenamento dos valores acima apresentados na tabela, encontram-se na seguinte figura (Figura 42).

Name	Object Type	Description
State Variables (Inherited)		
State Variables		
Residuos_EntreZona1Caixote1	Integer State Variable	Número de resíduos que circularam entre uma zona 1 (source) e um caixote 1 (combiner)
Residuos_EntreZona2Caixote2	Integer State Variable	Número de resíduos que circularam entre uma zona 2 (source) e um caixote 2 (combiner)
Residuos_EntreZona3Caixote3	Integer State Variable	Número de resíduos que circularam entre uma zona 3 (source) e um caixote 3 (combiner)
Residuos_EntreZona1_1Caixote1	Integer State Variable	Número de resíduos que circularam entre uma zona 1_1 (source) e um caixote 1 (combiner)
Carregamento_Veiculo_Caixote1	Integer State Variable	Número de vezes que o veículo carregou um caixote do (combiner) caixote 1
Carregamento_Veiculo_Caixote2	Integer State Variable	Número de vezes que o veículo carregou um caixote do (combiner) caixote 2
Carregamento_Veiculo_Caixote3	Integer State Variable	Número de vezes que o veículo carregou um caixote do (combiner) caixote 3
Deposito_Caixotes1	Integer State Variable	Quantidade de entidades (caixote 1) que entraram no depósito (sink)
Deposito_Caixotes2	Integer State Variable	Quantidade de entidades (caixote 2) que entraram no depósito (sink)
Deposito_Caixotes3	Integer State Variable	Quantidade de entidades (caixote 3) que entraram no depósito (sink)

Figura 42 - Variáveis de armazenamento para a tabela de resultados

Na fase seguinte deste processo as variáveis foram novamente divididas de acordo com a sua funcionalidade para que os processos de gatilho possam ser criados nos objetos correspondentes.

Resíduos entre Zonas

O incremento do valor das variáveis “Residuos_EntreZona(1...n)Caixote(1...n)” foi realizada com o auxílio de gatilhos adicionais ao processo de saída de cada zona (*source*). Os processos são denominados de “SaídaResiduos_Zona(1...n)” e encontram-se na categoria “Controlo das Zonas” (Figura 43).

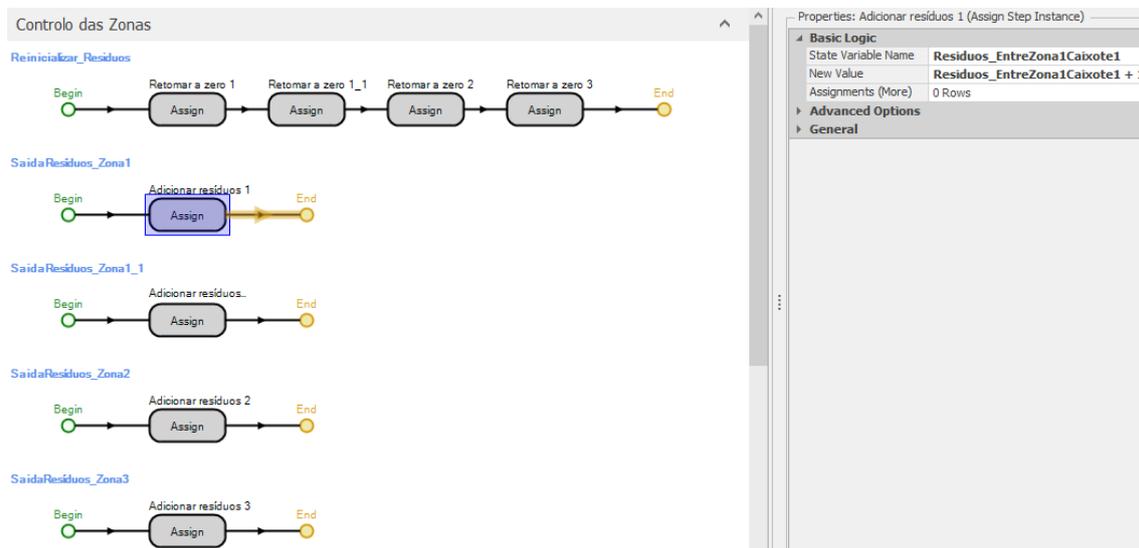


Figura 43 - Adição de resíduos às variáveis de armazenamento do valor de resíduos à saída das zonas

Em seguida, foi criada uma tabela *output* denominada de “Output_Zonas” onde será armazenada informação respetiva às variáveis Residuos Entre Zona e Caixote, Nome do Caixote e Nome da Zona (Figura 44).

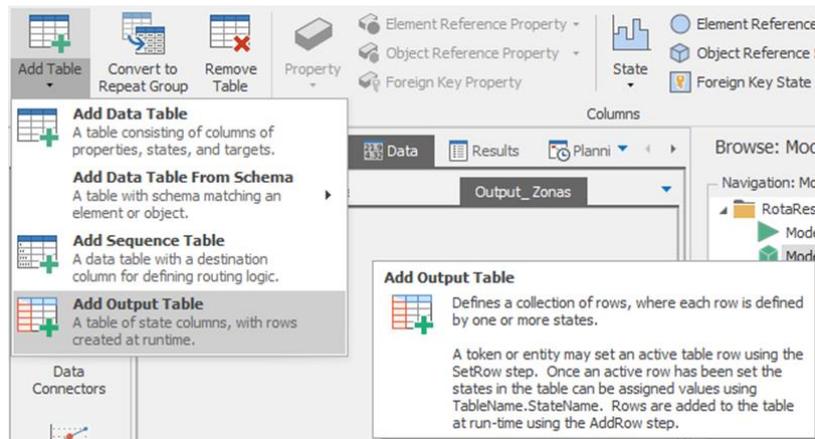


Figura 44 - Criação de uma tabela *output*

O desejado é que a tabela de *output* das zonas tenha o seguinte formato (Tabela 6), portanto as variáveis de estado selecionadas foram do tipo *string* para os nomes, armazenando assim caracteres em formato de texto, e inteiro para os resíduos em caixote, armazenando assim caracteres em formato numérico inteiro.

Tabela 6 - Tabela esperada em "Output_Zonas"

Nome Zona	Nome Caixote	Resíduos Caixote
Zona1.Name	Caixote1.Name	Residuos_EntreZona1Caixote1
Zona1_1.Name	Caixote1.Name	Residuos_EntreZona1_1Caixote1
Zona2.Name	Caixote2.Name	Residuos_EntreZona2Caixote2
Zona3.Name	Caixote3.Name	Residuos_EntreZona3Caixote3

A escrita dos dados na tabela *output* ocorre com auxílio aos seguintes processos (Figura 45), constituídos por um passo para adicionar linha (*add row*) e para atribuir (*assign*) novos valores as variáveis de estado (*state variables*) que formam a tabela "Output_Zonas".

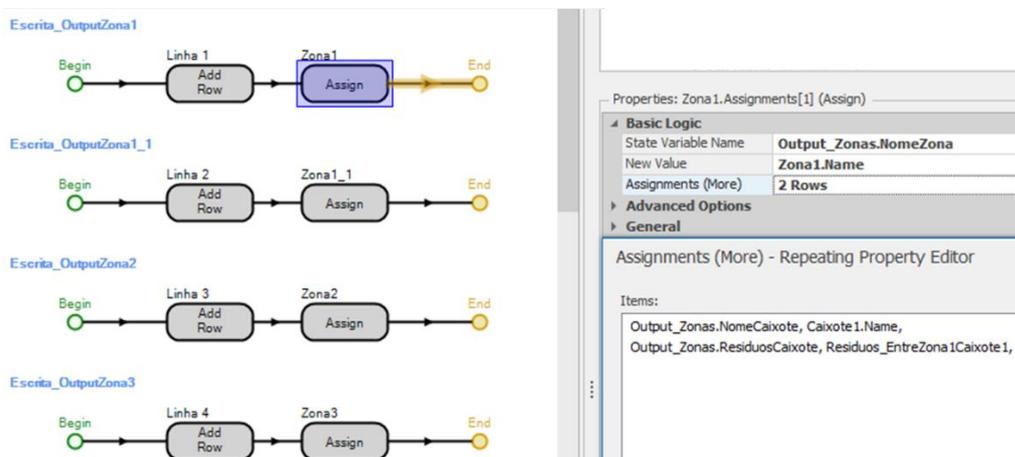


Figura 45 - Processos de adição de linhas à tabela "Output_Zonas"

Aqueles processos são executados na categoria “Report Turnos” que será analisada a posteriori.

Carregamento de Caixotes

O segundo grupo destina-se a contabilizar o número de vezes em que o veículo se deslocou ao output de qualquer *combiner* caixote para realizar o carregamento das entidades caixote. As variáveis criadas para armazenar o número de viagens são denominadas de “Viagens_Veiculo_Caixote(1...n)” e o processo onde estas são utilizadas para contagem é denominado de “Carregamento_Veiculo” (Figura 46). Este representa um gatilho adicional ao processo de carregamento realizado pelo veículo (*loaded*) e o primeiro passo é decidir em que nodo o veículo se encontra quando o carregamento foi realizado para, posteriormente, incrementar essa viagem ao número de viagens. No passo de decisão (*decide*) a condição utilizada é `Vehicle.CurrentNode.Is.Output@Caixote(1...n)` e no passo de atribuição (*assign*) o valor é incrementado quando a condição anterior se verifica.

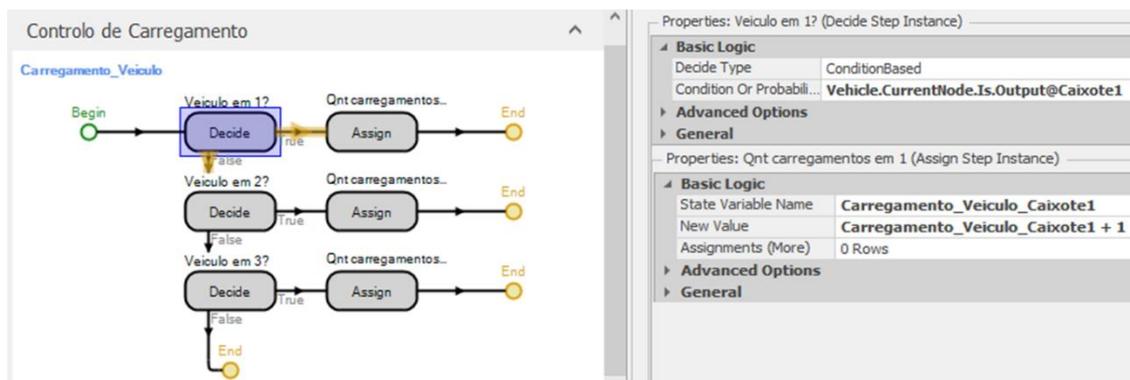


Figura 46 - Adição de carregamentos às variáveis de armazenamento do carregamento dos caixotes

De seguida, a tabela *output* criada para armazenar os dados foi denominada de “Output_Carregamento” onde será armazenada informação respetiva às variáveis Nome do Caixote e Número de Carregamentos do Veículo com Caixote. A tabela esperada terá o seguinte formato (Tabela 7).

Tabela 7 - Tabela esperada em “Output_Carregamento”

Nome Caixote	Nº de Carregamentos
Caixote1.Name	Carregamento_Veiculo_Caixote1
Caixote2.Name	Carregamento_Veiculo_Caixote2
Caixote3.Name	Carregamento_Veiculo_Caixote3

Com esse propósito, foram adicionadas duas colunas à tabela de *output*, a primeira do tipo *string* para armazenar o nome do caixote e a segunda do tipo inteiro para armazenar os carregamentos. Os processos de Escrita de Carregamento são compostos por um passo para adicionar linha (*add row*) e para atribuir (*assign*) novos valores as variáveis de estado (*state variables*) que formam a tabela “Output_Carregamento” (Figura 47).

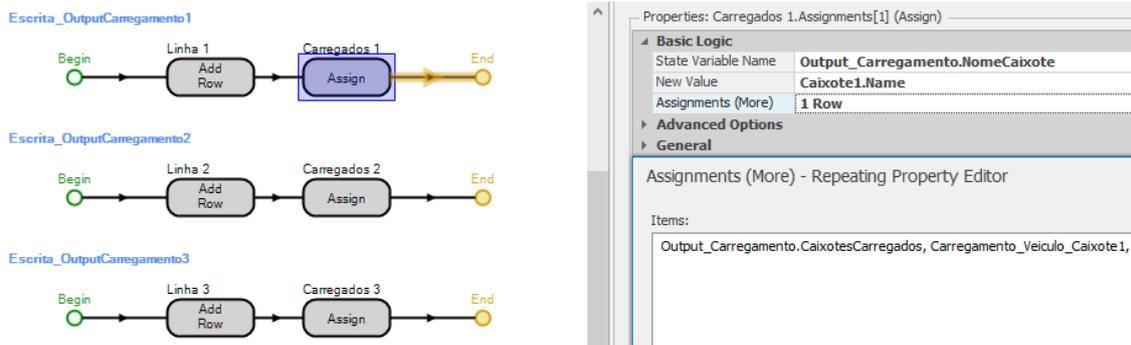


Figura 47 - Processos de adição de linhas à tabela “Output_Carregamento”

Tal como na categoria anterior, também no Controlo de Carregamento os processos de escrita de linhas são executados na categoria “Report Turnos”.

Caixotes Depositados

O terceiro grupo, e último, propõe-se a contabilizar o número de entidades alocadas ao depósito de cada caixote. As variáveis “Deposito_Caixote(1..n)” são atribuídas depois de um *decide* que verifica o tipo de entidades presentes no lote e as compara com a entidade desejada, através da expressão “`ModelEntity.BatchMembers.FirstItem.ModelEntity.EntityType == Residuo (1...n)`” (Figura 48). A termo de exemplo, se a estação anterior foi o caixote 1, então a variável a incrementar é “Deposito_Caixote1” com o número de unidades presentes no *batch member*.

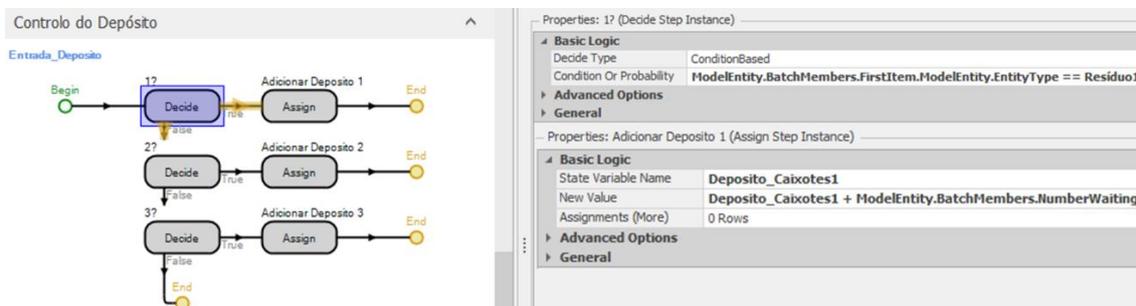


Figura 48 - Adição de caixotes de um tipo à variável destinada

Posteriormente, a tabela *output* criada para armazenar os valores obtidos foi denominada de “Output_Deposito”, com as variáveis Resíduo e Caixotes Depositados, pretendendo atingir o seguinte formato (Tabela 8).

Tabela 8 - Tabela esperada em “Output_Depositos”

Resíduo	Caixotes Depositados
Resíduo1.Name	Deposito_Caixotes1
Resíduo2.Name	Deposito_Caixotes1
Resíduo3.Name	Deposito_Caixotes1

Foram adicionadas duas colunas à tabela de *output*, a primeira do tipo *string* para armazenar o nome do resíduo e a segunda do tipo inteiro para armazenar os depósitos. Também os processos de Escrita de Depósitos são compostos por um passo para adicionar linha (*add row*) e para atribuir (*assign*) novos valores as variáveis de estado (*state variables*) que formam a tabela “Output_Depósito” (Figura 49).

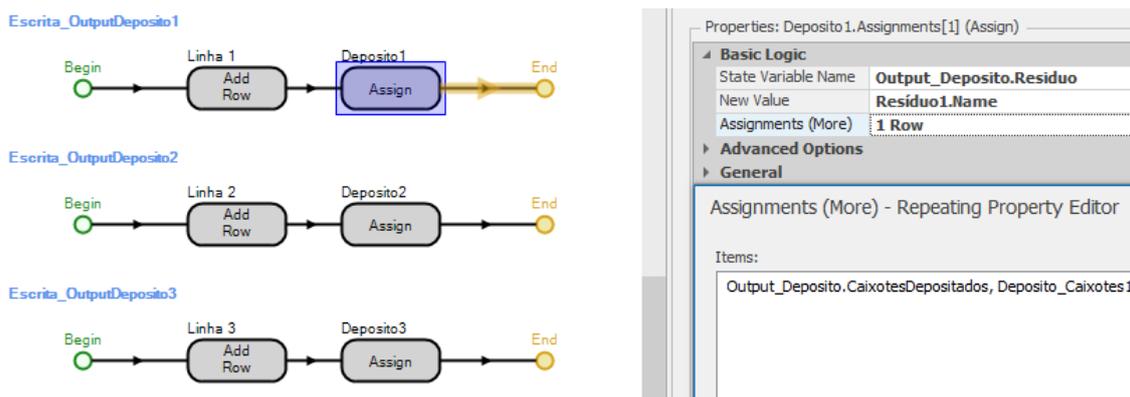


Figura 49 - Processos de adição de linhas à tabela “Output_Depositos”

E novamente, os processos de escrita de linhas são executados na categoria “Report Turnos”.

4.4.3 Criação das Tabelas na Base de Dados

A autora começou por elaborar uma tabela, através da ferramenta *Azure Data Studio*, denominada de “ResultadosZonas” (Figura 50). Esta irá ser povoada através da extração de dados da tabela “Output_Zonas”.

Table name

Columns Primary Key Foreign Keys Check Constraints Indexes General

+ New Column ^ Move Up v Move Down

Move	Name	Type	Primary Key	Allow Nulls	Default Value
≡	NomeZona	varchar(50)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
≡	NomeCaixote	varchar(50)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
≡	ResiduosCaixote	int	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 50 - Tabela "ResultadosZonas" no *Azure Data Studio*

O mesmo processo foi utilizado para criar a tabela “ResultadosCarregamento” para onde são extraídos os dados da tabela “Output_Carregamento” (Figura 51).

Table name

Columns Primary Key Foreign Keys Check Constraints Indexes General

+ New Column ^ Move Up v Move Down

Move	Name	Type	Primary Key	Allow Nulls	Default Value
≡	NomeCaixote	varchar(50)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
≡	CaixoteCarregado	int	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 51 - Tabela "ResultadosCarregamento" no *Azure Data Studio*

Por fim, a extração dos dados da tabela “Output_Deposito” direcionou-se para a tabela “ResultadosDeposito” (Figura 52).

Table name

Columns Primary Key Foreign Keys Check Constraints Indexes General

+ New Column ^ Move Up v Move Down

Move	Name	Type	Primary Key	Allow Nulls	Default Value
≡	Residuo	varchar(50)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
≡	ResiduosDepositados	int	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 52 - Tabela "ResultadosDeposito" no *Azure Data Studio*

As colunas criadas nas três tabelas do *Azure Data Studio*, anteriormente apresentadas, são do tipo *varchar(50)* e inteiro, para armazenar valores do *Simio* do tipo *string* e inteiro, respetivamente.

Report Turnos

A presente categoria de processos propõe a extração dos dados para a base de dados a cada evento “P_Turno” e, assim que estes forem extraídos, as varáveis de armazenamento retomam o valor a zero (Figura 53). Esta recontagem possibilita a obtenção dos valores por cada turno.

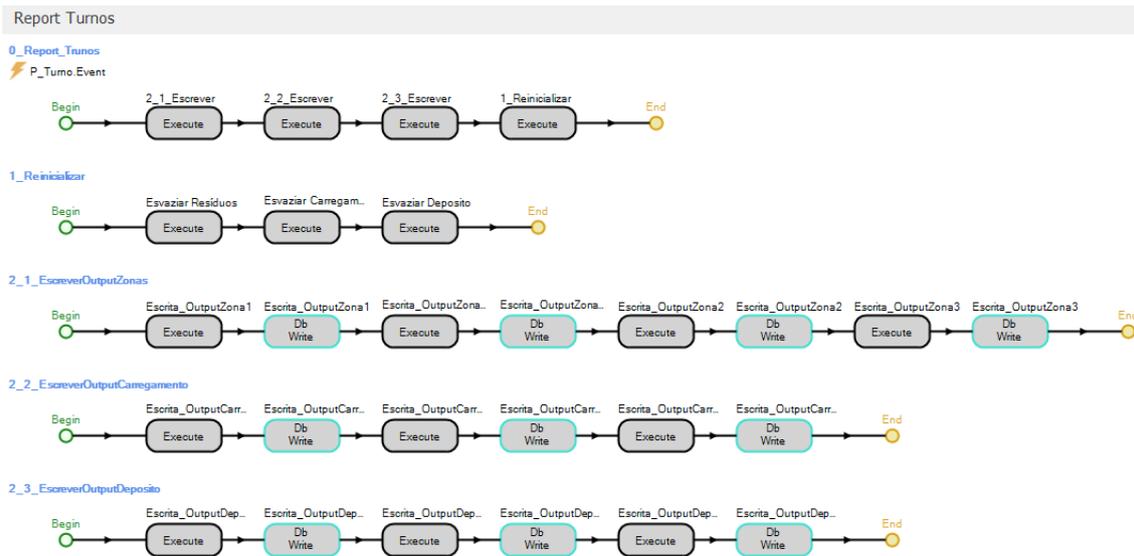


Figura 53 - Categoria “Report Turnos”

Os processos cujo nome inicia com o número 2 são processos de execução dos processos de escrita, anteriormente apresentados, intercalados com passos Db Write para a escrita dos dados na base de dados. Este procedimento está dividido por tabelas.

O processo “1_Reinicializar” executa os processos de retoma das variáveis a zero.

O processo “0_Report_Turnos” executa os processos de escrita das tabelas e reinicialização das variáveis. As variáveis identificadas na Figura 42 retomam a zero após serem escritas em cada turno.

Para **conectar a base de dados ao simio** é necessário criar um **DbConnect** que especifica a cadeia de ligação à base de dados e as informações do servidor (Figura 54).

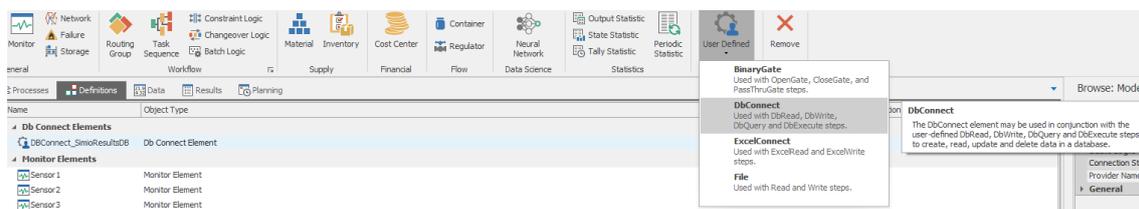


Figura 54 - Conetor “DBConnect_SimioResultsDB”

4.4.4 Teste de Simulação

Para testar o funcionamento do modelo de simulação e da sua ligação à base de dados, a autora optou por colocar a propriedade Nível de Chamada do Veículo a 10 entidades, em vez das 180 entidades anteriormente mencionadas. Assim, o gatilho para o veículo iniciar a sua rota era atingido mais rapidamente o que facilitou o acompanhamento de todos os parâmetros de

construção do modelo. Após a elaboração da rota e dos processos adjacentes, foi possível obter o seguinte modelo na ecrã *Facility* (Figura 55).

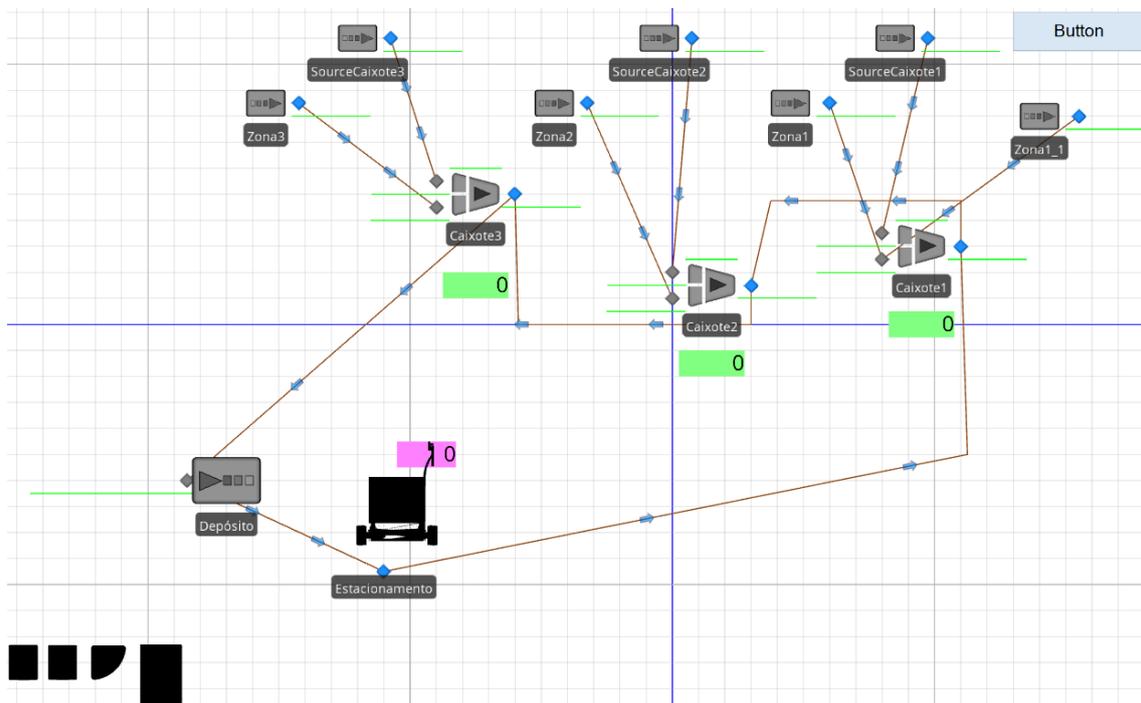


Figura 55 - Modelo *Facility* da Rota de Resíduos

Seguidamente, o modelo de simulação foi colocado a correr (*run*) com um *setup* no simulador de dois dias, sendo possível obter os seguintes resultados de teste (Figura 56). A partir da análise do tipo de dados encontrados em cada tabela, é possível afirmar que as mesmas têm os parâmetros desejados aquando da conceção das mesmas.

Rota Recolha	Troca Caixotes	Caixotes	Output_Zonas	Output_Carregamento	Output_Deposito	Ir	Output_Deposito	Input_Teste	
Nome Zona	Nome Caixote	Residuos Caixote	Nome Caixote	Caixotes Carregados	Residuo	Residuos Depositados			
1	Zona1	Caixote1	534	1	Caixote1	42	1	Residuo1	528
2	Zona1_1	Caixote1	0	2	Caixote2	43	2	Residuo2	480
3	Zona2	Caixote2	484	3	Caixote3	40	3	Residuo3	355
4	Zona3	Caixote3	360	4	Caixote1	43	4	Residuo1	612
5	Zona1	Caixote1	606	5	Caixote2	43	5	Residuo2	424
6	Zona1_1	Caixote1	0	6	Caixote3	43	6	Residuo3	355
7	Zona2	Caixote2	424	7	Caixote1	49	7	Residuo1	600
8	Zona3	Caixote3	355	8	Caixote2	49	8	Residuo2	484
9	Zona1	Caixote1	606	9	Caixote3	50	9	Residuo3	415
10	Zona1_1	Caixote1	0	10	Caixote1	46	10	Residuo1	570
11	Zona2	Caixote2	480	11	Caixote2	46	11	Residuo2	460
12	Zona3	Caixote3	410	12	Caixote3	46	12	Residuo3	405
13	Zona1	Caixote1	576	13	Caixote1	47	13	Residuo1	606
14	Zona1_1	Caixote1	0	14	Caixote2	48	14	Residuo2	492
15	Zona2	Caixote2	464	15	Caixote3	47	15	Residuo3	415
16	Zona3	Caixote3	410	16	Caixote1	51	16	Residuo1	642
17	Zona1	Caixote1	600	17	Caixote2	52	17	Residuo2	500
18	Zona1_1	Caixote1	0	18	Caixote3	52	18	Residuo3	270
19	Zona2	Caixote2	496						
20	Zona3	Caixote3	410						
21	Zona1	Caixote1	642						
22	Zona1_1	Caixote1	0						
23	Zona2	Caixote2	500						
24	Zona3	Caixote3	280						
*									

Figura 56 - Tabelas de *output* do simulador

No *Azure Data Studio* é possível encontrar os mesmos valores através da *query* `SELECT * FROM [dbo].[*Nome da Tabela*]` (Figura 57). Sendo possível comprovar a correta conexão entre o *software* de simulação e a base de dados numa das direções necessárias do fluxo de dados.

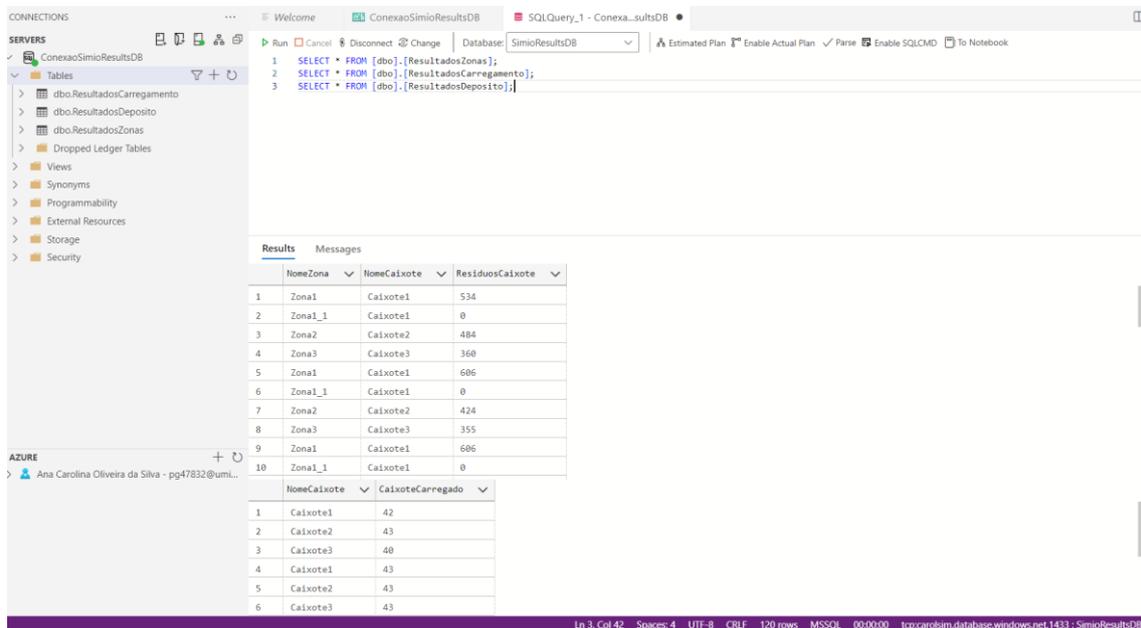


Figura 57 - Visualização dos dados nas tabelas do *Azure Data Studio* extraídas do *Simio*

Na tentativa de comprovar que também seria possível a **ligação na direção da base de dados para o *software* de simulação**, foi criado um **data conector** para importar os dados presentes na tabela *Resultado Zonas* presente na base de dados (Figura 58).



Figura 58 - Conector de importação dos dados da *BDAzure* ao *Simio*

A Tabela foi criada no *Simio* com o nome de “*Input_Testes*” e vinculada através do conector de importação criado “*Database Data Importer Resultados Zonas*”. Na categoria de ferramentas de exportação/importação do *Simio* é possível, através de um clique, importar a tabela desejada. A figura seguinte (Figura 59) mostra a tabela importada bem como o momento da sua importação.

Nome Zona	Nome Caixaote	Residuos Caixaote	
1	Zona1	Caixote 1	534
2	Zona1_1	Caixote 1	0
3	Zona2	Caixote 2	484
4	Zona3	Caixote 3	360
5	Zona1	Caixote 1	606
6	Zona1_1	Caixote 1	0
7	Zona2	Caixote 2	424
8	Zona3	Caixote 3	355
9	Zona1	Caixote 1	606
10	Zona1_1	Caixote 1	0
11	Zona2	Caixote 2	480
12	Zona3	Caixote 3	410
13	Zona1	Caixote 1	576
14	Zona1_1	Caixote 1	0
15	Zona2	Caixote 2	464
16	Zona3	Caixote 3	410
17	Zona1	Caixote 1	600
18	Zona1_1	Caixote 1	0
19	Zona2	Caixote 2	496
20	Zona3	Caixote 3	410
21	Zona1	Caixote 1	642
22	Zona1_1	Caixote 1	0
23	Zona2	Caixote 2	500
24	Zona3	Caixote 3	280

Figura 59 - Tabela "Input_Teste"

4.4.5 Integração com o Microsoft Power BI

A integração entre o Microsoft Power BI e o Microsoft Azure é acessível e intuitiva. Esta ferramenta permite a análise de dados e obtenção de informações visuais interactivamente. Neste caso, a autora apenas indicou à ferramenta que queria analisar os dados respetivos à BD SimioResultsDB, presente em carolsim.database.windows.net. De seguida, basta seleccionar os dados a utilizar em cada gráfico e o tipo de gráfico, obtendo uma *dashboard* para análise (Figura 60).

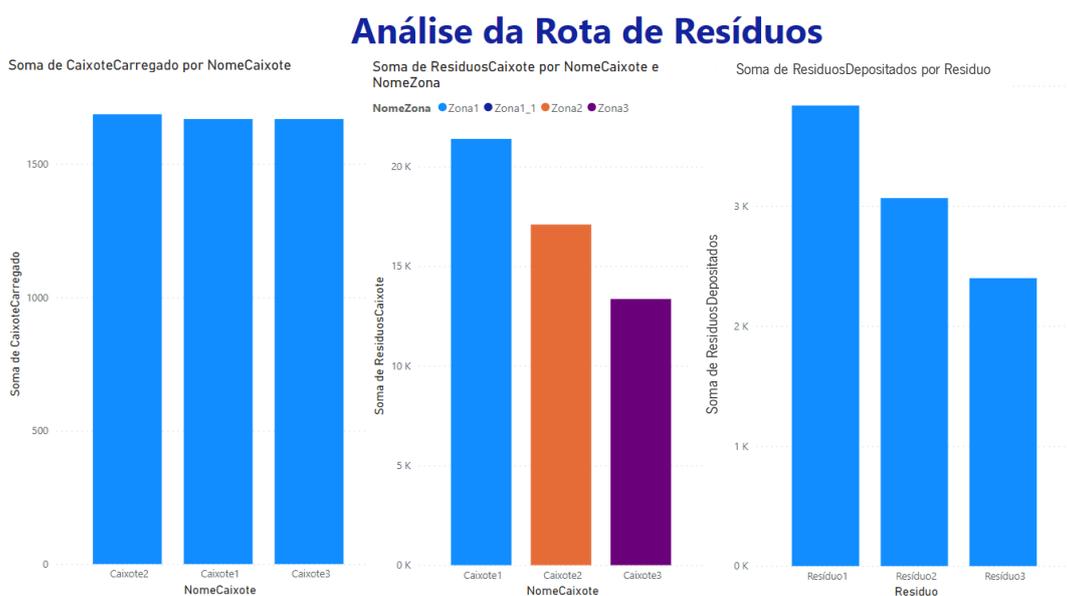


Figura 60 - Dashboard da Análise da Rota de Resíduos no Power BI

5. Conclusão

No presente capítulo é apresentada uma sinopse do trabalho realizado ao longo da elaboração da dissertação de mestrado.

5.1 Sinopse do Trabalho Elaborado e Utilidade

O principal objetivo com a composição deste trabalho foi apresentar a ligação entre a produção inteligente e a constante transformação da indústria ao conceito de gémeo digital levantado pela autora através da leitura de diversos artigos.

A validação deste trabalho não passa pelo conteúdo dos dados, nem pela criação de métricas na gestão sustentável de resíduos, mas sim pela análise de artigos e demonstração do que poderia ser um modelo virtual a adotar. Sendo a melhoria contínua um dos maiores objetivos de qualquer unidade de negócio, compreende-se que qualquer esforço que mitigue o desperdício na utilização de recursos e aumente a produtividade do sistema será uma vantagem a adotar, dentro do seu plano de investimento.

Na ferramenta de simulação adotada, é possível retratar o layout da rota através da disposição dos recursos disponíveis na biblioteca do separador *facility*, o que permite uma representação o mais fiel possível da disposição física dos equipamentos. A lógica e as regras presentes em cada elemento identificam-no e personalizam-no de acordo com as suas propriedades. O complemento destas propriedades dá-se na definição de processos através da biblioteca de passos que modelam o comportamento do sistema ou do gémeo digital, em função de um determinado acontecimento. O modelo, ou apenas partes do mesmo, estão condicionados por estes processos. Do mesmo modo, as variáveis criadas no separador *definitions*, permitiram a especificação de eventos, estados, propriedades e elementos.

As ferramentas utilizadas possuíam o licenciamento fornecido pela instituição de ensino e ambas disponibilizam conjuntos de ferramentas para tornar a aprendizagem o mais didática possível.

A utilidade científica deste trabalho capitaliza numa revisão bibliográfica extensa sobre o conceito de gémeo digital, e na implementação efetiva de um modelo de simulação onde se estabeleceu um caminho viável para a informação entre o digital e o físico. Os conceitos e ferramentas que foi necessário aprofundar, nomeadamente no *Simio* e no *MS Azure*, foram cuidadosamente explicados para que possa também isso ser uma ajuda para futuros desenvolvimentos.

5.2 Limitações

A primeira e mais sentida limitação foi a ausência de outros trabalhos na área e na mesma instituição que apresentassem a ligação entre a simulação e a base de dados. A utilização das ferramentas requer a compreensão da temática, mas em especial o *Simio*. Os recursos são escassos dentro da aplicação, assim como em ferramentas que permitem o ensino autodidata, como o *Youtube* e o *GitHub*, outra das dificuldades levantadas é a realização do estudo. Considera-se que o trabalho realizado atingiu os objetivos propostos, o que levou à aquisição de capacidades mais sólidas na simulação, um tema que merece mais desenvolvimento e foco, nomeadamente com o advento dos gémeos digitais.

Durante o processo de desenvolvimento da dissertação não houve oportunidade de interligar efetivamente com o sistema físico (“gémeo físico”), o que teria dado outra luz aos resultados, apesar de ter sido construído o suporte à informação - bases de dados padrão. Dessa forma, o gémeo físico não tem de interagir diretamente com o simulador, mas apenas acrescentar ou retirar informação à base de dados que está na nuvem, e assim facilmente acessível. Por fim, para essa interligação ser possível, do gémeo físico para o gémeo digital, será necessário recorrer a sensorização do sistema físico, para o que seria necessário recorrer à colaboração da eletrónica.

5.3 Apreciação Final

O tema apresentado é bastante complexo e requer trabalho contínuo de adequação às fases seguintes. O desenvolvimento de um modelo complexo de raiz implica aquisição de muita prática com as ferramentas de simulação, bases de dados e conhecimento coerente do problema em análise até se atingir um estágio minimamente completo.

Com o desenvolvimento do projeto foi possível contruir um modelo de simulação que já incorpora objetos com as características de gémeo digital, preparados para receber os dados do artefacto real (gémeo físico), pela via mais padrão da informação (base de dados). Esta abordagem também permite soluções intermédias, quer pelo preenchimento manual da base de dados para fins de validação e experimentação do modelo, quer pelo uso de dados históricos, pela mesma via. Foi assim possível construir uma implementação coerente, da parte do gémeo digital, na simulação.

Referências Bibliográficas

- AliHaddas, M., Hasan Asiri, M., Faya Mukhalid, R., Saeed Alahmari, S., Ali Al-Qathtani, S., & Hamid Hasan, S. (2014). Continuous Improvement Development with Time. *International Journal of Computer Applications*, 108(8), 35–39. <https://doi.org/10.5120/18935-0360>
- Ashtari Talkhestani, B., Jung, T., Lindemann, B., Sahlab, N., Jazdi, N., Schloegl, W., & Weyrich, M. (2019). An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. *At-Automatisierungstechnik*, 67(9), 762–782. <https://doi.org/10.1515/auto-2019-0039>
- Autili, M., Cortellessa, V., Di Ruscio, D., Inverardi, P., Pelliccione, P., & Tivoli, M. (2012). *Large-Scale Complex IT Systems. Development, Operation and Management*. 7539(March), 118–131. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34059-8>
- Ayani, M., Ganebäck, M., & Ng, A. H. C. (2018). Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP*, 72(March), 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.139>
- Bhuiyan, N., & Baghel, A. (2005). An overview of continuous improvement: From the past to the present. *Management Decision*, 43(5), 761–771. <https://doi.org/10.1108/00251740510597761>
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, Decentralization and Network Building Change the manufacturing Landscape: An industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(1), 37–44.
- Cheng, Q., Goh, B. W., & Kim, J. B. (2018). Internal Control and Operational Efficiency. *Contemporary Accounting Research*, 35(2), 1102–1139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1911-3846.12409>
- Cheng, Y., Zhang, Y., Ji, P., Xu, W., Zhou, Z., & Tao, F. (2018). Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1–4), 1209–1221. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2001-2>
- Daniel Roos, J. P. W. e D. T. J. (1990). *The Machine That Changed the World* (SIMON & SCHUSTER LTD (Ed.); junho de 2). Free Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0007->

6813(92)90074-J

Database basics. (n.d.). <https://support.microsoft.com/en-us/office/database-basics-a849ac16-07c7-4a31-9948-3c8c94a7c204>

Demirbas, A. (2011). Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Conversion and Management*, *52*(2), 1280–1287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.025>

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, *8*, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>

Gay, L. R., Mills, G. E., & Airasian, P. W. (2012). *Educational Research: Competencies for Analysis and Applications* (10th ed.). Pearson.

Gehrmann, C., & Gunnarsson, M. (2020). A Digital Twin Based Industrial Automation and Control System Security Architecture. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *16*(1), 669–680. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2938885>

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/doi:10.2514/6.2012-1818>

Graessler, I., & Poehler, A. (2017). Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system. *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 289–293. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289898>

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems BT - Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* (F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.); pp. 85–113). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

Grieves M. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. *White Paper*, *1*(March), 1–7.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A

- systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kaur, H., Singh, T., Arya, Y. K., & Mittal, S. (2020). Physical Fitness and Exercise During the COVID-19 Pandemic: A Qualitative Enquiry. *Frontiers in Psychology*, 11(October), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.590172>
- Kitain, L. (2018). *Digital Twin – The New age of Manufacturing*. DataDrivenInvestor. <https://medium.datadriveninvestor.com/digital-twin-the-new-age-of-manufacturing-d964eeba3313>
- Koshy, V. (2005). Action Research for Improving Practice: A Pratical Guide. In *Paul Chapman Publishing* (1st ed.).
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lee, J., Lapira, E., Yang, S., & Kao, A. (2013). Predictive manufacturing system - Trends of next-generation production systems. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 46, Issue 7). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130522-3-BR-4036.00107>
- Leng, J., Zhang, H., Yan, D., Liu, Q., Chen, X., & Zhang, D. (2019). Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1155–1166. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0881-5>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. In *Journal of Industrial Information Integration* (Vol. 6, pp. 1–10). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Luo, W., Hu, T., Zhu, W., & Tao, F. (2018). Digital twin modeling method for CNC machine tool. *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2018.8361285>

- Maria, A. (1997). Introduction to modeling and simulation. *Winter Simulation Conference Proceedings*, 7–13. <https://doi.org/10.1145/268437.268440>
- Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 17, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Neoway. (2023). *Stakeholders: O que são, qual sua função e exemplos*. <https://blog.neoway.com.br/stakeholders/>
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production* (1st Editio). Productivity Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780429273018>
- Olasveengen, T. M., Semeraro, F., Ristagno, G., Castren, M., Handley, A., Kuzovlev, A., Monsieurs, K. G., Raffay, V., Smyth, M., Soar, J., Svavarsdottir, H., & Perkins, G. D. (2021). European Resuscitation Council Guidelines 2021: Basic Life Support. *Resuscitation*, 161, 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2021.02.009>
- Onaji, I., Tiwari, D., Soulatiantork, P., Song, B., & Tiwari, A. (2022). Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35(8), 831–858. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014>
- Pires, F., Cachada, A., Barbosa, J., Moreira, A. P., & Leitão, P. (2019). *Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges*.
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Qian, C., Liu, X., Ripley, C., Qian, M., Liang, F., & Yu, W. (2022). Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions. *Future Internet*, 14(2), 1–25. <https://doi.org/10.3390/fi14020064>
- Ríos, J., Hernández, J. C., Oliva, M., & Mas, F. (2015). Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: Literature review and implications in an aircraft. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 2, 657–666. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-544-9->

- Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Schluse, M., Atorf, L., & Rossmann, J. (2017). Experimentable digital twins for model-based systems engineering and simulation-based development. *2017 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2017.7934796>
- Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C. E., & Espindola, D. B. (2016). Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30), 12–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.115>
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 697–701. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058728>
- Singh, J., & Singh, H. (2015). Continuous improvement philosophy – literature review and directions. *Benchmarking*, 22(1), 75–119. <https://doi.org/10.1108/BIJ-06-2012-0038>
- Söderberg, R., Wärmefjord, K., Carlson, J. S., & Lindkvist, L. (2017). Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals*, 66(1), 137–140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038>
- Sony, M., & Naik, S. (2020). Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking*, 27(7), 2213–2232. <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2018-0284>

- Stark, R., Kind, S., & Neumeyer, S. (2017). Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals*, *66*(1), 169–172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, *15*(6), 553–564. <https://doi.org/10.1080/00207547708943149>
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 - A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, *20*, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., & Leng, J. (2017). A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line. *IEEE Access*, *5*, 26901–26911. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453>
- Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *96*(1–4), 1149–1163. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1617-6>