



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Estudo de Estratégias de Trabalho Paralelo em Sistemas Industriais de Produção

Pedro Afonso Pereira de Matos

Nº 20171162

Orientadores

Professor Doutor Nuno Octávio Fernandes

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Octávio Fernandes, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Outubro 2024

Composição do júri

Presidente do júri

Doutor Nuno Octávio G, Fernandes

Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Vogais

Doutor Paulo Jorge Sequeira Gonçalves

Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Doutor Pedro Miguel Baptista Torres

Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Agradecimentos

Neste momento tão importante da minha jornada académica, gostaria de expressar o meu mais sincero agradecimento a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão deste projeto de final de licenciatura.

Em primeiro lugar, quero dirigir um agradecimento especial ao Professor Doutor Nuno Octávio Fernandes, o meu orientador neste projeto, pela sua constante disponibilidade, pelo rigor e dedicação com que orientou o meu trabalho, e pela valiosa partilha de conhecimento que foi essencial para a concretização deste percurso.

Agradeço também a todos os docentes que me acompanharam ao longo destes anos de formação académica, por terem transmitido conhecimentos essenciais e pelo apoio ao longo de todo o curso.

À minha família, especialmente ao meu pai e à minha mãe, agradeço profundamente por todo o apoio, tanto moral como emocional, que me proporcionaram. Sem a vossa força de vontade, incentivo constante e amor incondicional, esta etapa não teria sido possível.

Aos meus amigos e familiares, que estiveram sempre presentes, quero expressar a minha gratidão por me motivarem e apoiarem incondicionalmente durante todo este percurso.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha namorada, Joana Coelho, por estar sempre ao meu lado. A tua paciência, carinho e incentivo constante foram determinantes para que eu nunca desistisse de alcançar este objetivo.

A todos, o meu mais profundo e sincero agradecimento.

Resumo

Ao contrário dos sistemas de produção tradicionais de trabalhadores fixos, onde estes permanecem no mesmo posto (ou estação) de trabalho a realizar tarefas repetitivas, nos sistemas de produção com trabalhadores moveis (*walking-Workers*), estes percorrem algumas ou todas as estações da linha para produzir o produto. Este projeto tem como objetivo estudar o impacto de diferentes estratégias de organização do trabalho baseadas em trabalhadores móveis. Quatro estratégias distintas no que concerne à forma de alocação dos trabalhadores a áreas de trabalho de uma linha de produção, foram consideradas, nomeadamente: Zonas Dedicadas, Zonas Relaxadas, Zonas Flutuantes e Zonas Sobrepostas.

O estudo foi levado a cabo usando como ferramenta de investigação a simulação discreta. A linha de produção com oito estações de trabalho e quatro trabalhadores, procurando perceber como cada uma destas abordagens de organização do trabalho afeta o desempenho do sistema em termos de produção, do tempo envolvido na produção de cada unidade, entre outras medidas de desempenho.

O software SIMIO foi usado para investigar o desempenho destas estratégias sob diferentes condições de chegada de trabalhos à linha, variabilidade dos tempos de processamento, balanceamento de carga pelas estações de trabalho e capacidade dos *buffers* (armazéns) de saída destas estações.

Os resultados deste estudo aprofundam a compreensão das vantagens e limitações de cada uma das estratégias. As mais flexíveis, como as Zonas Sobrepostas, demonstraram uma capacidade superior de adaptação nos cenários com mais variabilidade e incerteza, respondendo de forma eficaz às flutuações no fluxo de trabalho. Já as estratégias mais rígidas, como as Zonas Dedicadas, revelaram-se mais adequadas para ambientes de maior previsibilidade e variabilidade reduzida. Assim, este trabalho fornece diretrizes práticas e valiosas para a escolha da estratégia mais adequada, de acordo com as condições operacionais de cada sistema produtivo, garantindo o equilíbrio entre a eficiência e flexibilidade.

Palavras-chave:

Estratégias de Organização do Trabalho; Trabalhadores Móveis; Linha de Produção; Simulação.

Abstract

Unlike traditional production systems with fixed Workers, where employees remain at the same workstation performing repetitive tasks, in production systems with walking-Workers, they move through some or all stations along the production line to assemble the product. This project aims to study the impact of different organizational strategies based on mobile Workers. Four distinct strategies regarding Worker allocation to specific areas of a production line were considered: Dedicated Zones, Relaxed Zones, Floating Zones, and Overlapping Zones.

The study was conducted using discrete event simulation as the research tool. A production line with eight workstations and four Workers was used to analyze how each of these organizational approaches affects system performance in terms of production Output, production time per unit, among other performance metrics.

SIMIO software was employed to assess the performance of these strategies under varying conditions, including different job arrival rates to the line, variability in processing times, load balancing across workstations, and the buffer capacity at the Output of these stations.

The results of this study deepen the understanding of the advantages and limitations of each strategy. Flexible approaches, such as Overlapping Zones, demonstrated superior adaptability in scenarios with higher variability and uncertainty, responding effectively to fluctuations in workflow. On the other hand, rigid strategies, like Dedicated Zones, proved to be more suitable for environments with greater predictability and lower variability. This work thus provides practical and valuable guidelines for choosing the most appropriate strategy based on the operational conditions of each production system, ensuring a balance between efficiency and flexibility.

Keywords

Work Organization; Strategies Walking Workers; Production Line; Simulation

Índice geral

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Metodologia de Investigação	2
1.4	Estrutura do Relatório	3
2.	Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura	5
2.1	Lean Manufacturing	5
2.2	Balanceamento de Linhas	6
2.2.1	O Problema de Balanceamento	6
2.2.2	Desafios do Balanceamento Tradicional	6
2.2.3	Alternativas ao Balanceamento Tradicional	7
2.3	Estratégias de Alocação dos trabalhadores	7
2.4	Gestão de <i>Buffers</i> na Produção	10
2.5	Variabilidade dos Tempos de Processamento	11
2.6	Revisão da Literatura: Trabalhadores Móveis	13
3.	Estudo da Simulação	17
3.1.	Software de Simulação	17
3.2.	Sistema de Produção e Modelo de Simulação	18
3.3.	Modelo de Simulação em SIMIO	19
3.3.1.	Estrutura do Modelo	20
3.3.2.	Construção e Configuração das Estratégias de Alocação	22
3.3.3.	Propriedades e Definições do Sistema de Simulação	24
3.3.4.	Configuração dos <i>Buffers</i> de Saída	28
3.3.5.	Chegada das Entidades/ Lançamento em Produção	30
3.3.6.	Condições Gerais de Simulação	30
3.3.7.	Medidas de Desempenho	32
4.	Resultados	33
4.1.	Medidas de Desempenho e Plano Experimental	33
4.1.1.	Medidas de Desempenho	33
4.1.2.	Plano Experimental	33

4.2 Análise e Discussão dos Resultados	34
4.2.1. Análise Geral das ANOVA	34
4.2.2. Impacto da Capacidade dos <i>OutputBuffers</i>	37
4.2.3 Avaliação da Variabilidade dos Tempos de Processamento	39
_____	40
4.2.5 Avaliação de Chegadas Controladas e Não Controladas	43
4.2.6. Desempenho das Estratégias de Alocação dos trabalhadores	45
5. Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro	49
5.1 Conclusões	49
5.2 Limitações e Propostas de Trabalho Futuro	50
6. Referências Bibliográficas	51
Anexos	53
1. Estrutura dos Cenários	54
2. Resultados das Zonas Dedicadas	55
3. Resultados das Zonas Relaxadas	59
4. Resultados das Zonas Flutuantes	63
5. Resultados das Zonas Sobrepostas	67

Índice de figuras

Figura 1 – Ciclo Action Research (Adaptado de George, T. (2023). "Action Research Cycle")	2
Figura 2 – Os oito desperdícios no Lean Manufacturing (Fonte: Flowdit, 2024).	5
Figura 3 – Representação das Zonas Dedicadas (Adaptado de Mönch, T., Huchzermeier, A., and Bebersdorf, P. (2021), Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization, International Journal of Production Research, 59(15), 4670-4689).	8
Figura 4 – Representação das Zonas Relaxadas (Adaptado de Mönch, T., Huchzermeier, A., and Bebersdorf, P. (2021), Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization, International Journal of Production Research, 59(15), 4670-4689).	8
Figura 5 – Representação das Zonas Flutuantes (Retirado de Mönch, T., Huchzermeier, A., and Bebersdorf, P. (2021), Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization, International Journal of Production Research, 59(15), 4670-4689).	9
Figura 6 – Representação das Zonas Sobrepostas (Adaptado de Mönch, T., Huchzermeier, A., and Bebersdorf, P. (2021), Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization, International Journal of Production Research, 59(15), 4670-4689).	9
Figura 7 – Comparação entre cenários com buffer de saída limitado (à esquerda) e ilimitado (à direita).	10
Figura 8 – Ambiente de simulação no SIMIO	17
Figura 9 – Layout da linha de produção simulada	18
Figura 10 – Disposição da linha de produção em U, com os trabalhadores distribuídos ao longo das estações de trabalho.	19
Figura 11 – Propriedades do Source e configurações para diferentes métodos de chegada de entidades	20
Figura 12 – Propriedades do Server1 e definição do recurso alocado	21
Figura 13 – Propriedades do buffer de saída do Server1	21
Figura 14 – Propriedades do Worker1	22
Figura 15 – Painel de controlos utilizado para definir os recursos dos vários cenários testados	24
Figura 16 – Estatística Tally	24
Figura 17 – Configuração da estatística Tally no Sink1	25
Figura 18 – Processo interno que permite gerar tempos de produção por produto	25
Figura 19 – Evento e processo responsável por controlar a chegada de uma nova entidade ao final de cada ciclo de produção.	26

Figura 20 – Comparação da variabilidade entre os dois cenários de processamento	27
Figura 21 – Servidor com OutputBuffer = 0, ilustrando a espera no servidor	29
Figura 22 – Servidor com OutputBuffer = ∞ , demonstrando a continuidade do processamento	29
Figura 23 – Comparação da Taxa de Produção com buffers limitados e ilimitados em cenários de carga balanceada e não balanceada.	37
Figura 24 – Comparação do TIS com buffers limitados e ilimitados em cenários de carga balanceada e não balanceada.	38
Figura 25 – Comparação da Taxa de Produção para os 3 níveis de variabilidade.	39
Figura 26 - Comparação do TIS para os 3 níveis de variabilidade.	40
Figura 27 – Comparação da taxa de produção para os 2 níveis de carga.	41
Figura 28 – Comparação do TIS para os 2 níveis de carga.	42
Figura 29 – Comparação da Taxa de Produção para Chegadas Controladas e Não Controladas com impacto das cargas.	43
Figura 30 – Comparação do TIS para Chegadas Controladas e Não Controladas com impacto das cargas.	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Artigos relativos ao estudo - Análise da base de dados SCOPUS	13
Tabela 2 – Funções dos trabalhadores nas diferentes estratégias	23
Tabela 3 – Configurações dos Cenários de Simulação	31
Tabela 4 – Resultados da ANOVA para a taxa de produção.	35
Tabela 5 – Resultados da ANOVA para tempo no sistema (TIS)	36
Tabela 6 – Estrutura dos Cenários utilizados na Simulação	54
Tabela 7 – Taxa de Produção e TIS (Zonas Dedicadas)	55
Tabela 8 – Percentagem Utilização dos Workers (Zonas Dedicadas)	56
Tabela 9 – Percentagem Utilização dos Servers 1-4 (Zonas Dedicadas)	57
Tabela 10 – Percentagem Utilização dos Servers 5-8 (Zonas Dedicadas)	58
Tabela 11 – Taxa de Produção e TIS (Zonas Relaxadas)	59
Tabela 12 – Percentagem Utilização dos Workers (Zonas Relaxadas)	60
Tabela 13 – Percentagem Utilização dos Servers 1-4 (Zonas Relaxadas)	61
Tabela 14 – Percentagem Utilização dos Servers 5-8 (Zonas Relaxadas)	62
Tabela 15 – Taxa de Produção e TIS (Zonas Flutuantes)	63
Tabela 16 – Percentagem Utilização dos Workers (Zonas Flutuantes)	64
Tabela 17 – Percentagem Utilização dos Servers 1-4 (Zonas Flutuantes)	65
Tabela 18 – Percentagem Utilização dos Servers 5-8 (Zonas Flutuantes)	66
Tabela 19 – Taxa de Produção e TIS (Zonas Sobrepostas)	67
Tabela 20 – Percentagem Utilização dos Workers (Zonas Sobrepostas)	68
Tabela 21 – Percentagem Utilização dos Servers 1-4 (Zonas Sobrepostas)	69
Tabela 22 – Percentagem Utilização dos Servers 5-8 (Zonas Sobrepostas)	70

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

TIS: Tempo no Sistema (*Time In System*);

SIMIO: Software de modelação e simulação;

ANOVA: Análise de Variância;

CV: Coeficiente de Variação;

CONWIP: *Constant Work In Progress*.

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A melhoria contínua dos sistemas de produção é uma das principais preocupações das empresas que procuram aumentar a sua eficiência e competitividade no mercado global. Com a crescente complexidade dos processos produtivos e necessidades de personalização dos produtos cada vez maiores, a alocação eficaz de trabalhadores e recursos torna-se cada vez mais importante para garantir elevados níveis de produção, sem comprometer a qualidade ou aumentar o custos operacionais.

Neste contexto, surgem várias abordagens de organização de trabalho em linhas de produção, que têm como objetivo aumentar a eficiência, garantido uma boa utilização dos recursos disponíveis. Entre as diferentes estratégias que podem ser encontradas na literatura, baseadas em trabalhadores móveis, temos o Takt Time (ou zonas). Nestes sistemas de produção, ao contrario dos sistemas com trabalhadores fixos, os trabalhadores são móveis (*walking-Workers*), podendo percorrer algumas ou todas as estações da linha de forma a produzir uma unidade de produto acabado. Neste trabalho centra-se a atenção em quatro formas de organização do trabalho baseadas em zonas, nomeadamente: Zonas dedicadas, Zonas Relaxadas, Zonas Flutuantes e Zonas Sobrepostas. Estas abordagens oferecem diferentes formas de alocar os trabalhadores às estações de trabalho na execução do produto, variando no grau de flexibilidade de polivalência requerido aos trabalhadores.

O trabalho consiste na análise comparativa destas quatro estratégias de organização do trabalho, com o intuito de identificar a mais eficaz em termos de produção, tempos e utilização dos recursos, considerando fatores como, a chegada de trabalho à linha, a variabilidade dos tempos de processamento, a capacidade dos *buffers* (armazéns) de saída que existem nas estações de trabalho e o balanceamento de carga nos postos.

Este trabalho é realizado no âmbito do Estágio/Projeto da Licenciatura em Engenharia e Gestão Industrial da Unidade Técnico-Científica de Engenharia Eletrotécnica e Industrial do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste projeto é, portanto, comparar diferentes estratégias de organização do trabalho baseadas em trabalhadores móveis, em linhas de produção, onde a capacidade é limitada (i.e., determinada) pelo número de trabalhadores.

Através da construção de um modelo de simulação e da análise de diversos cenários, pretende-se identificar qual das quatro estratégias acima referidas — Zonas Dedicadas, Zonas Relaxadas, Zonas Flutuantes e Zonas Sobrepostas — oferece um melhor desempenho.

Para tal, existem objetivos intermédios, os quais envolvem o desenvolvimento de um modelo de simulação capaz de simular as estratégias referidas e a definição de um plano experimental que permita fornecer recomendações aplicáveis a sistemas industriais reais, de modo a garantir maior eficiência no uso dos trabalhadores.

1.3 Metodologia de Investigação

Este estudo segue uma metodologia de simulação baseada na abordagem Action Research que combina pesquisa teórica com uma componente prática para resolver problemas e implementar melhorias. A metodologia Action Research consiste em ciclos de planeamento, ação, observação e reflexão, conforme ilustrado na Figura 1, que são repetidos até se identificarem as melhores soluções para os problemas investigados.



Figura 1 – Ciclo Action Research (Adaptado de George, T. (2023). "Action Research Cycle")

No âmbito deste projeto, a simulação é utilizada como a principal ferramenta de investigação para testar as diferentes estratégias de alocação dos trabalhadores. A simulação é particularmente relevante para sistemas produtivos complexos, uma vez que permite explorar diferentes cenários e testar hipóteses sem interferir com as operações em sistemas reais.

De acordo com Banks et al. (2005) e outros autores, a simulação oferece várias vantagens, permite analisar fluxos de informação, testar hipóteses e avaliar novos layouts ou sistemas sem a necessidade de interromper o sistema real. No entanto, também apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de formação para elaborar modelos complexos, a dificuldade em obter dados precisos e o tempo necessário para desenvolver e analisar as simulações.

A simulação é uma ferramenta poderosa para este estudo, pois permite modelar adequadamente as estratégias de alocação dos trabalhadores em causa, analisando o seu impacto em diferentes critérios de desempenho.

1.4 Estrutura do Relatório

Este relatório está dividido em cinco capítulos organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução.

Capítulo 2: Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura. Este capítulo fornece uma visão geral sobre conceitos importantes no âmbito do trabalho, como o *Lean Manufacturing*, balanceamento de linhas de produção e estratégias de alocação dos trabalhadores, com base em pesquisas e estudos relevantes.

Capítulo 3: Estudo da Simulação. Descreve o processo de modelação da linha de produção no software SIMIO, incluindo as estratégias testadas, configurações de *buffers*, tempos de processamento e métodos de chegada das entidades. Apresenta ainda o plano experimental e detalha as medidas de desempenho usadas.

Capítulo 4: Resultados e Discussão. Apresenta e analisa os resultados das simulações realizadas, destacando o impacto das diferentes estratégias e variáveis no desempenho do sistema.

Capítulo 5: Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro. Resume as principais conclusões do estudo, destacando as estratégias mais eficientes e sugerindo direções para trabalho futuro, incluindo melhorias ao nível do alargamento do estudo realizado.

2. Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura

2.1 Lean Manufacturing

O *Lean Manufacturing* é uma filosofia de produção focada na eliminação de desperdícios e na maximização da eficiência do processo produtivo. Desenvolvido a partir do Sistema Toyota de Produção, o *Lean* visa a melhoria contínua, eliminando atividades que não agregam valor ao produto final, conhecidas como desperdícios (Ohno, 1988) que incluem sobreprodução, tempos de espera, transporte desnecessário, excesso de existências, defeitos, entre outros (Womack & Jones, 2003) conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2 – Os oito desperdícios no *Lean Manufacturing* (Fonte: Flowdit, 2024).

Um dos conceitos fundamentais do *Lean* é a criação de um fluxo contínuo de produção, por eliminação de interrupções (associadas à produção por lotes) e um ajuste do trabalho às exigências da produção. Para isso, são aplicadas técnicas como trabalhadores móveis (polivalentes) de forma a facilitar o balanceamento da linha em termos da carga de (Hopp & Spearman, 2004). No contexto deste projeto, o *Lean* é aplicado como base filosófica para a comparação de estratégias de alocação dos trabalhadores móveis, com o objetivo de melhorar o fluxo de produção sem aumentar a quantidade de recursos (trabalhadores) disponíveis.

Além disso, em ambientes produtivos onde a variabilidade dos tempos de processamento é elevada, a flexibilidade na alocação dos trabalhadores torna-se essencial para garantir a continuidade do fluxo produtivo. Estudos recentes sugerem que técnicas como as Zonas Sobrepostas e Flutuantes proporcionem essa flexibilidade, permitindo uma adaptação dinâmica às flutuações de carga (Thurer et al., 2024).

2.2 Balanceamento de Linhas

O balanceamento de linhas tem como objetivo distribuir as tarefas de forma equilibrada entre as estações de trabalho, reduzindo o tempo de ciclo e maximizando a utilização dos postos de trabalho (Becker & Scholl, 2006). Segundo Boysen et al. (2007), o principal objetivo é maximizar a produção, garantindo que cada estação execute as suas tarefas num tempo uniforme, evitando tempos inativos.

2.2.1 O Problema de Balanceamento

O problema de balanceamento de linhas consiste em distribuir um conjunto de tarefas por várias estações de trabalho, assegurando que o tempo de ciclo seja o mais curto possível e respeitando as restrições de precedência (Boysen et al., 2007). O desafio é encontrar uma alocação (atribuição de tarefas a estações ou postos de trabalho) que minimize o número de estações ou o tempo de ciclo, mantendo a continuidade e a eficiência da produção. Linhas de produção mais complexas, como as descritas por Scholl (1999), tornam-se ainda mais desafiantes devido à variabilidade nos tempos de processamento entre estações, que pode gerar a sobrecarga ou a subutilização de estações, comprometendo a eficiência da linha.

2.2.2 Desafios do Balanceamento Tradicional

O balanceamento tradicional apresenta limitações em cenários com elevada variabilidade entre estações (Becker & Scholl, 2006). Em ambientes com tempos de processamento variáveis, uma alocação fixa de trabalhadores pode resultar em desequilíbrios no fluxo de trabalho, já que a sincronização perfeita entre as estações nem sempre é possível. De acordo com Boysen et al. (2007), este problema agrava-se quando as estações têm cargas de trabalho diferentes, e a existência de *buffers* (armazéns ao nível dos postos de trabalho) limitados pode causar interrupções frequentes, prejudicando a produtividade e o tempo de ciclo. Abordagens alternativas, baseadas em trabalhadores móveis, como o *Bucket Brigade* (Bartholdi & Eisenstein, 1996) ou *Rabbit Chase* (Suzaki, 1987; Gershwin & Berman, 2010; Wang et al., 2009) ajustam dinamicamente a alocação dos trabalhadores para minimizar estes problemas de balanceamento.

2.2.3 Alternativas ao Balanceamento Tradicional

Para superar as limitações do balanceamento tradicional, surgiram no contexto do *Lean* estratégias de *self-balancing*, baseadas em trabalhadores móveis. Uma das abordagens mais conhecidas, mencionada por Bartholdi et al. (1999), é o *Bucket Brigade*, que utiliza trabalhadores móveis que ajustam o ritmo de trabalho, deslocando-se entre estações conforme necessário. Neste caso o trabalhador mais a jusante quando termina o seu trabalho, desloca-se para montante na linha até encontrar o trabalhador que o precede. Pega no trabalho e executa as operações restantes no produto. O trabalhador rendido, procede da mesma forma, até se chegar ao primeiro trabalhador da linha. Uma abordagem alternativa é o *Rabbit Chase* (Zonas Sobrepostas), que também utiliza trabalhadores móveis, mas neste caso, levam o produto ao longo de todos os postos de trabalho da linha de produção. Cada trabalhador permanece com a mesma peça até completar todas as operações necessárias, movendo-se entre as estações conforme o fluxo de trabalho.

Tanto o *Bucket Brigade* como o *Rabbit Chase* eliminam a alocação fixa de trabalhadores, promovendo uma distribuição dinâmica e uniforme do trabalho. No *Bucket Brigade*, os trabalhadores ajustam o ritmo à medida que avançam na linha, garantindo uma distribuição contínua de tarefas (Bartholdi & Eisenstein, 1996). No *Rabbit Chase* (Gershwin & Berman, 2010), os trabalhadores seguem o fluxo das entidades ao longo da linha, assegurando um ajuste dinâmico e reduzindo o tempo de espera.

Este projeto aborda uma terceira estratégia, baseada no *Takt Time*, que consiste no tempo de ciclo necessário para sincronizar o ritmo de produção com a procura. Este conceito define o ritmo a que os produtos devem ser concluídos para responder às necessidades de produção, criando zonas onde o trabalhador se pode movimentar (i.e., realizar operações no produto).

2.3 Estratégias de Alocação dos trabalhadores

No estudo de linhas de produção, diferentes estratégias podem resultar em diferentes níveis de flexibilidade e eficiência. Estudos como o de Mirzaei et al. (2021), que analisou o impacto do balanceamento de linhas com a simulação discreta, e o de Calzavara et al. (2021), que comparou a eficiência entre trabalhadores fixos e móveis em diferentes cenários, demonstram que a escolha da estratégia pode influenciar significativamente o desempenho. Neste projeto, analiso quatro abordagens:

Zonas Dedicadas: Nesta estratégia, os trabalhadores são atribuídos a um conjunto limitado de postos ou estações de trabalho, como ilustrado na figura 3. Cada trabalhador controla um conjunto específico de processos dentro da sua zona, o que reduz a sua mobilidade e necessidade de treino/formação. Esta abordagem é eficaz em sistemas com variabilidade reduzida nos tempos de processamento, onde a previsibilidade favorece uma alocação estática. No entanto, em linhas com maior heterogeneidade, essa fixação pode causar períodos de inatividade, comprometendo o desempenho global da linha (Miltenburg, 2001). A rigidez desta abordagem torna-a limitada em ambientes com variabilidade moderada (Becker & Scholl, 2006).

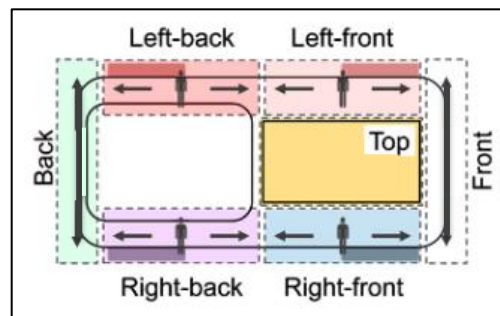


Figura 3 – Representação das Zonas Dedicadas (Adaptado de Mönch, T., Huchzermeier, A., and Bebersdorf, P. (2021), Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization, *International Journal of Production Research*, 59(15), 4670-4689).

Zonas Relaxadas: Proporcionam maior flexibilidade do que as zonas dedicadas, permitindo que os trabalhadores cubram áreas mais amplas, como se verifica na figura 4. Com mais liberdade de movimentação, os trabalhadores podem redistribuir tarefas dentro da zona, melhorando o fluxo e reduzindo interrupções. Contudo, embora ofereça uma flexibilidade moderada, a redistribuição de tarefas entre zonas permanece limitada, o que pode comprometer a eficiência em linhas com elevada variabilidade nos tempos de processamento (Lim et al., 2011).

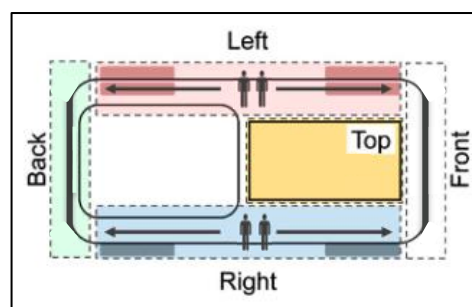


Figura 4 – Representação das Zonas Relaxadas (Adaptado de Mönch, T., Huchzermeier, A., and Bebersdorf, P. (2021), Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization, *International Journal of Production Research*, 59(15), 4670-4689).

Zonas Flutuantes: Exemplo ilustrada na Figura 5, esta estratégia permite que os trabalhadores se movam entre um conjunto de postos para os quais estão qualificados, assumindo tarefas conforme necessário. Esta abordagem é eficaz em ambientes com variabilidade moderada, pois permite uma adaptação rápida às flutuações de carga, promovendo um balanceamento dinâmico das tarefas. Alinhada com os princípios do *Lean Manufacturing*, esta estratégia potencialmente elimina desperdícios e aumenta a eficiência ao adaptar-se em tempo real às condições da linha (Womack & Jones, 2003).

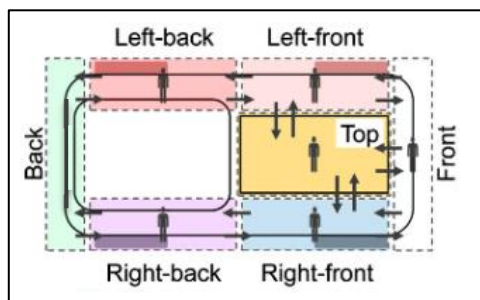


Figura 5 – Representação das Zonas Flutuantes (Retirado de Mönch, T., Huchzermeier, A., and Bebersdorf, P. (2021), Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization, *International Journal of Production Research*, 59(15), 4670-4689).

Zonas Sobrepostas: Nesta abordagem, ilustrada na figura 6, os trabalhadores têm zonas completamente sobrepostas de trabalho. É uma abordagem *Rabbit Chase* que pode ser vista como um caso de zonas sobrepostas, em que o trabalhador segue o trabalho ao longo de todos os postos da linha. Embora esta estratégia ofereça grande visibilidade e controlo sobre cada entidade, pode causar constrangimentos quando os operadores têm níveis de eficiência (i.e., velocidades) muito diferentes, já que o trabalhador mais rápido pode ficar “bloqueado” atrás de um trabalhador mais lento (Gershwin & Berman, 2010).

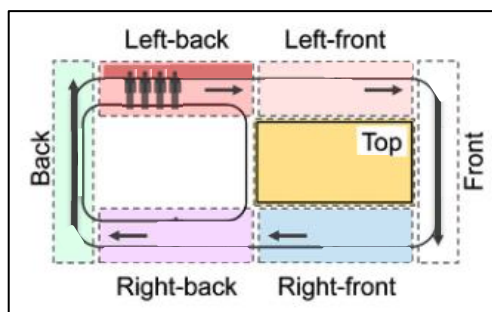


Figura 6 – Representação das Zonas Sobrepostas (Adaptado de Mönch, T., Huchzermeier, A., and Bebersdorf, P. (2021), Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization, *International Journal of Production Research*, 59(15), 4670-4689).

Um estudo recente de Thurer et al. (2024), introduziu alterações dessa abordagem, como o *Rabbit Chase O*, que permite ultrapassagens entre trabalhadores com diferentes velocidades, aumentando a eficiência em cenários com uma variabilidade mais elevada. Contudo, esta abordagem requer recursos (equipamentos) adicionais nos postos de trabalho para permitir a ultrapassagem. Este projeto não considera esta abordagem para permitir uma comparação direta entre as diferentes estratégias.

2.4 Gestão de *Buffers* na Produção

Buffers com pequenas quantidades de produtos nas estações de trabalho são amplamente utilizados para lidar com a variabilidade dos tempos de processamento e minimizar interrupções nas estações a jusante do *buffer*.

Os *buffers* funcionam como espaços de armazenamento temporário para entidades em processamento (i.e., trabalho em curso), permitindo que uma estação continue a trabalhar sem ficar dependente da estação a montante. São essenciais em sistemas com tempos de processamento variáveis, ajudando a prevenir paragens por falta de material.

Segundo Hopp e Spearman (2004), os *buffers* garantem que os recursos produtivos sejam utilizados continuamente, evitando paragens enquanto aguardam pela finalização de operações anteriores. Eles podem ser classificados conforme a sua função: *buffers* de entrada, que armazenam entidades antes do processamento, e *buffers* de saída, que as mantêm até serem movidas para a próxima estação de trabalho.

A capacidade (i.e., dimensão) dos *buffers* pode impactar os tempos de espera e de produção na linha. Em sistemas com variabilidade moderada, uma gestão eficiente dos *buffers* suaviza o fluxo e melhora a eficiência global (Cragg et al., 2024).

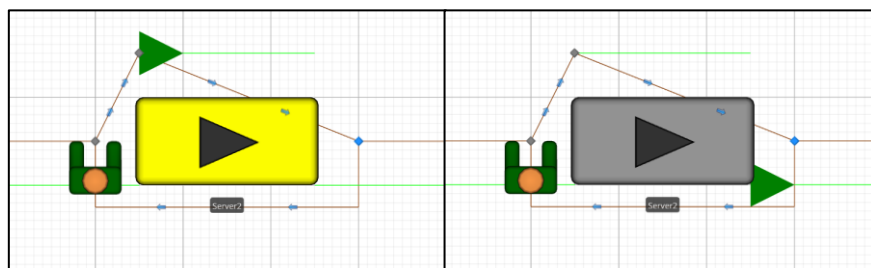


Figura 7 – Comparação entre cenários com *buffer* de saída limitado (à esquerda) e ilimitado (à direita).

Na figura 7 ilustra-se duas situações de *buffers* de saída, limitado, à esquerda (i.e., sem espaço de armazenamento) após o processamento, obrigando a sincronizar melhor os tempos de processamento e transporte. Nesta situação, de ausência de espaço de armazenamento, o produto não pode sair do recurso (máquina) após o seu processamento, até que o operador fique disponível. Isto leva ao bloqueio da máquina não permitindo que novos produtos sejam aí processados, até que algum operador remova o produto da máquina. À direita, já processado, armazenado no *buffer* de saída, permite ao recurso processar um novo produto.

Estudos indicam que *buffers* ajustáveis podem melhorar o fluxo em sistemas com variabilidade moderada nos tempos de processamento (Mirzaei et al., 2021). No entanto, este estudo focou-se em cenários com *buffers* limitados (capacidade zero) e infinitos, avaliando o impacto dessas configurações no desempenho do sistema, com os resultados detalhados no capítulo de resultados e discussão.

2.5 Variabilidade dos Tempos de Processamento

A variabilidade nos tempos de processamento é um fator com impacto no desempenho de qualquer sistema de produção, e como tal, também nas linhas de produção. Quanto maior a variabilidade, pior o desempenho do sistema. Esta variabilidade pode resultar devido ao grau de experiência do operador, do tipo de equipamento usado, entre outros. Assim, os tempos de processamento podem ser categorizados em:

- **Determinísticos:** Com tempos fixos e conhecidos para cada estação de trabalho, resultam em ambientes produtivos com alta previsibilidade (Hopp & Spearman, 2004).
- **Estocásticos:** Onde os tempos de processamento variam e podem ser modelados por distribuições estatísticas, como triangular, que utiliza três parâmetros, mínimo, moda e máximo (Scholl, 1999). O grau de variabilidade é geralmente medido pelo coeficiente de variação (CV).

$$CV = \frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}}$$

Equação 1 - Fórmula do Coeficiente de Variação

Para quantificar a variabilidade numa distribuição triangular, usei uma fórmula específica para o desvio padrão. Esta fórmula permite capturar a assimetria da distribuição triangular, que depende de três parâmetros (mínimo, moda e máximo). Este cálculo mais apropriado para a distribuição triangular fornece uma medida mais realista de dispersão nos cenários onde a variabilidade dos tempos de processamento não é uniforme, como ocorre frequentemente em processos industriais.

Fórmula do Desvio Padrão:

$$\sigma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc}}{18}$$

Equação 2 - Equação do Desvio Padrão para distribuições triangulares

Onde:

- σ é o desvio padrão,
- a é o valor mínimo da distribuição,
- b é a média,
- c é o valor máximo da distribuição.

O coeficiente de variação permite analisar a extensão da variabilidade em relação à média dos tempos, sendo particularmente útil para comparar cenários com diferentes níveis de dispersão.

A variabilidade dos tempos de processamento pode levar à descontinuidade do fluxo produtivo, sobrecarga em algumas estações e utilização insuficiente noutras. Em contextos com elevada variabilidade, estratégias como a flexibilidade na alocação dos trabalhadores e o uso de *buffers* permitem suavizar o fluxo e aumentar a eficiência da linha (Boysen et al., 2007; Bartholdi & Eisenstein, 1996).

2.6 Revisão da Literatura: Trabalhadores Móveis

Esta secção apresenta uma breve revisão da literatura que tem como objetivo explorar potenciais lacunas no conhecimento existente e fornecer uma base sólida para a investigação a realizar neste projeto. Para isso, foi realizada uma pesquisa na base de dados SCOPUS. As strings de pesquisa utilizadas incluíram termos como:

“Worker allocation strategies”,

“buffer management”,

“walking Worker”,

“assembly line”,

“production line”,

“self-balancing”, e

“production line variability”,

A pesquisa decorreu nos meses de setembro e outubro de 2024.

No total, foram identificados 16 artigos relevantes, dos quais 12 foram selecionados para uma análise mais aprofundada. Os restantes artigos foram removidos por não estarem diretamente relacionados com os objetivos deste estudo. O foco desta análise incide em artigos que tratam de estratégias de alocação dos trabalhadores, gestão de *buffers* e variabilidade nos tempos de processamento, com especial atenção para os temas de Zonas Dedicadas, Zonas Relaxadas, Zonas Flutuantes, Zonas Sobrepostas, e outras abordagens como self-balancing, walking *Worker*, e as chegadas de entidades.

A seguir, na tabela 1, apresentam-se os 12 artigos mais relevantes, com uma breve descrição, conclusão e relevância para o presente estudo.

Tabela 1 – Artigos relativos ao estudo - Análise da base de dados SCOPUS

Título e Autor	Artigo
<p data-bbox="225 1711 783 1832"><i>Combining Line Balancing Methods and Discrete Event Simulation: A Case Study from a Metalworking Company</i></p> <p data-bbox="349 1899 635 1935">(Mirzaei et al., 2021)</p>	<p data-bbox="810 1597 1433 1928">O artigo explora a combinação de métodos de balanceamento de linhas com simulação de eventos discretos. A simulação avalia o impacto da variabilidade nos tempos de processamento em linhas retas e em U, comparando a eficiência e a taxa de produção das configurações. Conclui-se que a linha em U melhora a eficiência, mas aumenta o tempo</p>

	de processamento médio devido à maior probabilidade de bloqueios.
<p><i>Variability and the Fundamental Properties of Production Lines</i> (Wu et al., 2016)</p>	<p>Este artigo foca-se na modelação da variabilidade em linhas de produção, analisando a influência de fatores como as taxas de chegada de trabalho (entidades), as taxas de serviço, e as limitações de variabilidade. O estudo oferece uma abordagem matemática detalhada para entender como as chegadas irregulares de entidades afetam a eficiência e o tempo de espera nas estações de trabalho. Conclui-se que as chegadas dinâmicas de entidades podem reduzir a produtividade.</p>
<p><i>A Mixed-Model Assembly Line Sequencing Problem with Parallel Stations and Walking Workers: A Case Study in the Automotive Industry</i> (Ebrahimi et al., 2023)</p>	<p>O estudo explora linhas de montagem com trabalhadores móveis na indústria automotiva. A flexibilidade dos trabalhadores móveis melhorou significativamente o balanceamento da linha.</p>
<p><i>Modeling and Solving Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem with Sequence-Dependent Setup Times</i> (Yilmaz, 2021)</p>	<p>O artigo propõe um modelo matemático que otimiza o balanceamento de linhas de montagem considerando tempos de configuração dependentes da sequência. A solução mostrou-se eficaz para reduzir os tempos de inatividade.</p>
<p><i>Combining Balancing, Sequencing and Buffer Allocation Decisions to Improve the Efficiency of Mixed-Model Asynchronous Assembly Lines</i> (Tiacci, 2024)</p>	<p>Apresenta uma abordagem combinada de balanceamento, sequenciamento e alocação de <i>buffers</i> para otimizar linhas de montagem assíncronas. A integração de decisões reduziu significativamente os bloqueios e os tempos de inatividade.</p>
<p><i>Multi-Objective Optimization of Multi-Product Parallel Disassembly Line Balancing Problem Considering Multi-</i></p>	<p>Estuda a otimização do balanceamento em linhas de desmontagem paralelas, otimizando a utilização de trabalhadores com múltiplas competências. Relevante para</p>

<p><i>Skilled Workers Using a Discrete Chemical Reaction Optimization Algorithm</i> (Guo et al., 2024)</p>	<p>Zonas Flutuantes, onde a flexibilidade é necessária.</p>
<p><i>Throughput Optimization in Two-Machine Flowshops with Flexible Operations.</i> (Crama & Gultekin, 2010)</p>	<p>O artigo aborda a otimização do <i>throughput</i> em linhas de produção com operações flexíveis, maximizando a produção em diferentes cenários. Relevante para a gestão de <i>buffers</i> e otimização do fluxo em Zonas Dedicadas e Relaxadas.</p>
<p><i>Walking Worker vs Fixed Worker Assembly Considering the Impact of Components Exposure on Assembly Time and Energy Expenditure</i> (Calzavara et al., 2021)</p>	<p>Este artigo compara as estratégias de trabalhadores fixos e móveis, considerando o impacto no tempo de montagem e no gasto energético. A estratégia <i>Walking Worker</i> mostrou-se mais eficiente em cenários de carga reduzida e maior variabilidade.</p>
<p><i>Buffer Sizing of a Heijunka Kanban System</i> (Bartholdi III & Eisenstein, 1996)</p>	<p>O artigo aborda a otimização do dimensionamento de <i>buffers</i> em sistemas de produção Kanban, propondo métodos que reduzem o inventário sem comprometer a eficiência do sistema.</p>
<p><i>Rabbit Chase O: A New Approach to Realizing One-Piece Flow in Production Lines through Flexible Takt or Planned Processing Times</i> (Thurer et al., 2024)</p>	<p>O artigo introduz a estratégia <i>Rabbit Chase O</i>, uma nova abordagem que permite ultrapassagens entre trabalhadores em linhas de produção, aumentando a flexibilidade e otimizando o <i>throughput</i> em cenários com tempos de processamento variáveis. Através de simulação de eventos discretos, <i>Rabbit Chase O</i> superou estratégias tradicionais como <i>Bucket Brigade</i> e <i>Takt Flexível</i>, especialmente em contextos com trabalhadores de diferentes níveis de eficiência. Relevante para <i>Rabbit Chase</i> e Zonas Flutuantes, devido à sua ênfase na flexibilidade e adaptação ao fluxo de trabalho em tempo real.</p>
	<p>Apresenta o conceito de uma linha de produção que se equilibra de forma</p>

<p><i>A Production Line That Balances Itself</i> (Miqueo et al., 2023)</p>	<p>autónoma (<i>self-balancing</i>) utilizando <i>Bucket Brigade</i>, onde os trabalhadores ajustam o ritmo de trabalho. O estudo mostrou como este modelo assegura um fluxo contínuo de trabalho.</p>
<p><i>A Novel Work-Sharing Protocol for U-Shaped Assembly Lines</i> (Sriram et al., 2015)</p>	<p>Propõe um protocolo inovador para linhas de montagem em U, que utiliza partilha de trabalho e <i>buffers</i> dinâmicos para melhorar a utilização dos trabalhadores. O estudo mostra como o protocolo maximiza o throughput e é relevante para Rabbit Chase e Zonas Flutuantes, promovendo a flexibilidade e eficiência.</p>

A revisão da literatura acima demonstra a existência de múltiplas abordagens para a alocação dos trabalhadores móveis. Contudo, não parecem existir estudos que comparem as quatro estratégias deste projeto — Zonas Dedicadas, Zonas Relaxadas, Zonas Flutuantes e Zonas Sobrepostas. Além disso, a análise de diferentes modos de chegada de entidades (i.e., disponibilidade de materiais na primeira estação da linha) e a sua influência nas estratégias de alocação dos trabalhadores, tal como a gestão de *buffers* e a variabilidade dos tempos de processamento carece de estudo detalhado. O presente projeto procura preencher essas lacunas ao avaliar a eficiência destas quatro estratégias em diferentes cenários produtivos, contribuindo para o desenvolvimento de soluções de gestão de variabilidade em linhas de produção complexas.

3. Estudo da Simulação

3.1. Software de Simulação

Para a realização deste estudo de simulação, foi escolhido o SIMIO, um software amplamente utilizado para a modelação e simulação de sistemas complexos, como linhas de produção, sistemas logísticos, entre outros. O SIMIO destaca-se pela sua versatilidade, interface gráfica intuitiva e pela flexibilidade na criação de cenários personalizados, o que o torna ideal para simular diferentes condições de operação e estratégias de alocação dos trabalhadores, conforme representado no layout da simulação apresentado na Figura 8

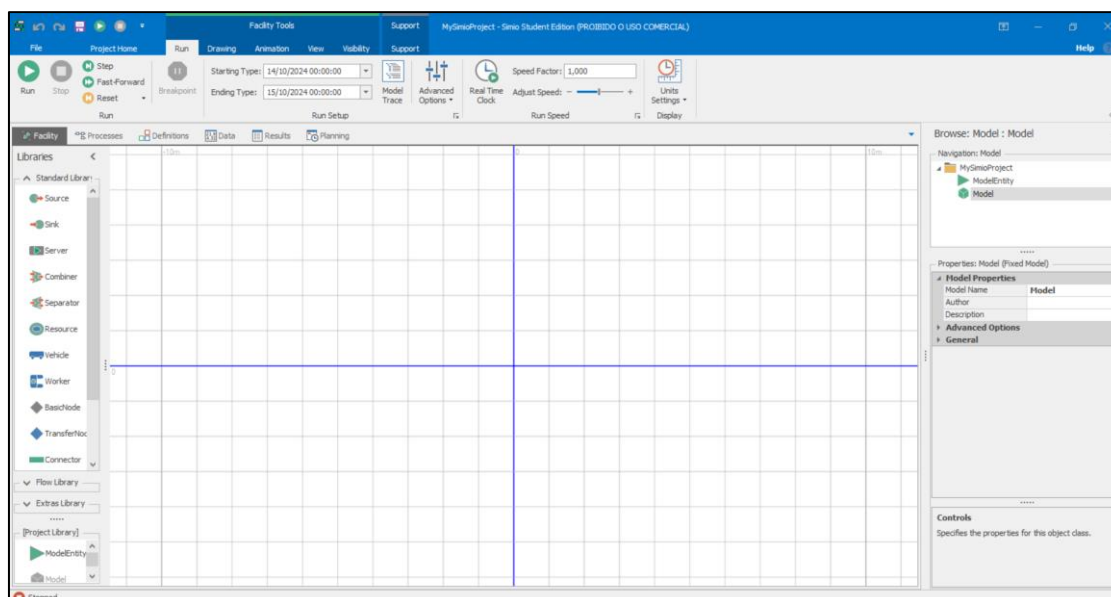


Figura 8 – Ambiente de simulação no SIMIO

A ferramenta permite simular sistemas com uma variedade de distribuições para os tempos de processamento, desde tempos determinísticos até distribuições estocásticas, como a distribuição normal, triangular, exponencial, entre outras. A flexibilidade para ajustar parâmetros como tempos de processamento, capacidades de *buffers* e movimentação de recursos humanos são dos principais fatores que tornam o SIMIO uma ferramenta eficaz para a simulação de linhas de produção.

Uma das grandes vantagens do SIMIO é a possibilidade de visualização em tempo real das operações e do fluxo de trabalho, o que permite observar o desempenho do sistema à medida que a simulação é executada, o que facilita a identificação de pontos de melhoria e permite a tomada de decisões com base nos dados gerados automaticamente pelo software.

Além disso, possibilita a criação de relatórios detalhados e a recolha de dados essenciais, como *throughput* (número de unidades produzidas), taxa de produção, tempo no sistema e taxas de utilização de recursos, facilitando a análise comparativa entre diferentes cenários simulados. Este nível de análise detalhada foi essencial para avaliar as estratégias de alocação dos trabalhadores neste projeto.

3.2. Sistema de Produção e Modelo de Simulação

O sistema de produção considerado neste estudo é uma linha de produção, composta por oito servers (estações de trabalho) e quatro *Workers* (trabalhadores) responsáveis pela movimentação e processamento das entidades (produtos), tal como verificamos na figura 9. A configuração da linha de produção foi concebida para simular um cenário industrial, onde os produtos passam sequencialmente por várias etapas de processamento até serem finalizados.

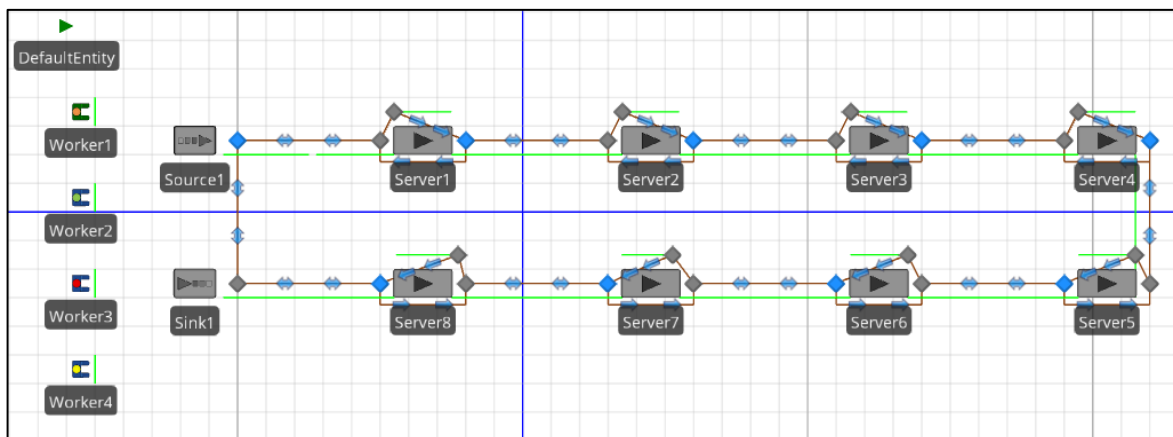


Figura 9 – Layout da linha de produção simulada

As estações de trabalho foram modeladas para representar operações de processamento específicas. Cada uma das oito pode processar uma entidade de cada vez, e o tempo de processamento em cada estação pode ser ajustado de acordo com o cenário testado, utilizando tempos determinísticos (fixos) ou distribuições (triangular) para representar variações e incertezas nos tempos de operação.

Os *buffers* de saída de cada *server* desempenham um papel importante na fluidez do processo produtivo, no caso dos *buffers* limitados, o *server* só pode processar uma nova entidade após a remoção da anterior, simulando um cenário em que os trabalhadores têm de remover manualmente os produtos, com *buffers* ilimitados, o *server* pode continuar o processamento de novos produtos, mesmo que a entidade processada ainda não tenha sido movida para a próxima estação de trabalho, criando um fluxo de produção mais contínuo e eficiente.

O sistema de produção utiliza quatro trabalhadores, os quais desempenham dois papéis principais: realizar o processamento das entidades (trabalhos) e movê-las entre os postos de trabalho. Dependendo da estratégia implementada, os trabalhadores podem ter diferentes responsabilidades e níveis de flexibilidade.

O layout da linha de produção, ilustrada na figura 10, foi projetado em formato U, que é uma configuração comum em sistemas produtivos que adotam os princípios do *Lean Manufacturing*. O layout em U proporciona várias vantagens, como a redução das distâncias percorridas pelos trabalhadores, o auxílio entre trabalhadores e a melhoria da comunicação entre as diferentes etapas de produção.

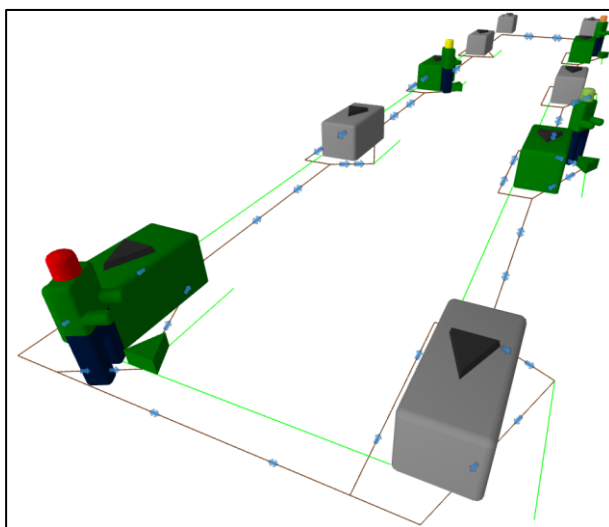


Figura 10 – Disposição da linha de produção em U, com os trabalhadores distribuídos ao longo das estações de trabalho.

Este layout é particularmente eficiente para a implementação das diversas estratégias de alocação dos trabalhadores, pois permite que os mesmos interajam facilmente entre as diferentes zonas de trabalho, o que facilita a flexibilidade no processo produtivo. Além disso, o layout melhora a visibilidade do fluxo de produção, que é essencial para o controlo de qualidade e a supervisão do trabalho em tempo real.

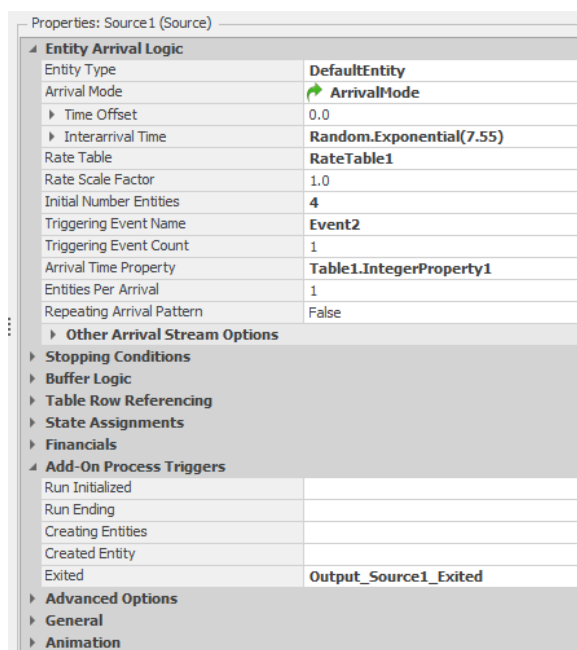
3.3. Modelo de Simulação em SIMIO

A construção do modelo de simulação no SIMIO segue uma abordagem onde cada componente da linha de produção é processado de forma independente, permitindo uma maior flexibilidade na configuração dos cenários simulados. Esta secção detalha os principais elementos do modelo e como cada um foi configurado para representar as condições reais de produção.

3.3.1. Estrutura do Modelo

O modelo de simulação é constituído pelos seguintes componentes principais:

Source: Ponto de entrada das entidades no sistema, onde os produtos são gerados de acordo com o método de chegada configurado através dos controlos ilustrados na figura 11 (Controlada: *On Event* ou Não Controlada: *Interarrival Time*).



Properties: Source 1 (Source)	
Entity Arrival Logic	
Entity Type	DefaultEntity
Arrival Mode	ArrivalMode
Time Offset	0.0
Interarrival Time	Random.Exponential(7.55)
Rate Table	RateTable1
Rate Scale Factor	1.0
Initial Number Entities	4
Triggering Event Name	Event2
Triggering Event Count	1
Arrival Time Property	Table1.IntegerProperty1
Entities Per Arrival	1
Repeating Arrival Pattern	False
Other Arrival Stream Options	
Stopping Conditions	
Buffer Logic	
Table Row Referencing	
State Assignments	
Financials	
Add-On Process Triggers	
Run Initialized	
Run Ending	
Creating Entities	
Created Entity	
Exited	Output_Source1_Exited
Advanced Options	
General	
Animation	

Figura 11 – Propriedades do Source e configurações para diferentes métodos de chegada de entidades

Servers: Oito servers que representam as estações de trabalho ao longo da linha de produção. Cada server foi configurado, como se verifica na figura 12, para processar uma entidade de cada vez, e o tempo de processamento foi ajustado de acordo com a estratégia simulada, utilizando valores determinísticos ou distribuições (triangular).

Output Buffers : Buffers de saída de cada server, cuja capacidade foi ajustada, nos controlos que verificamos na figura 13, para ser limitada ou infinita, conforme o cenário, permitindo a análise dos efeitos do bloqueio no sistema.

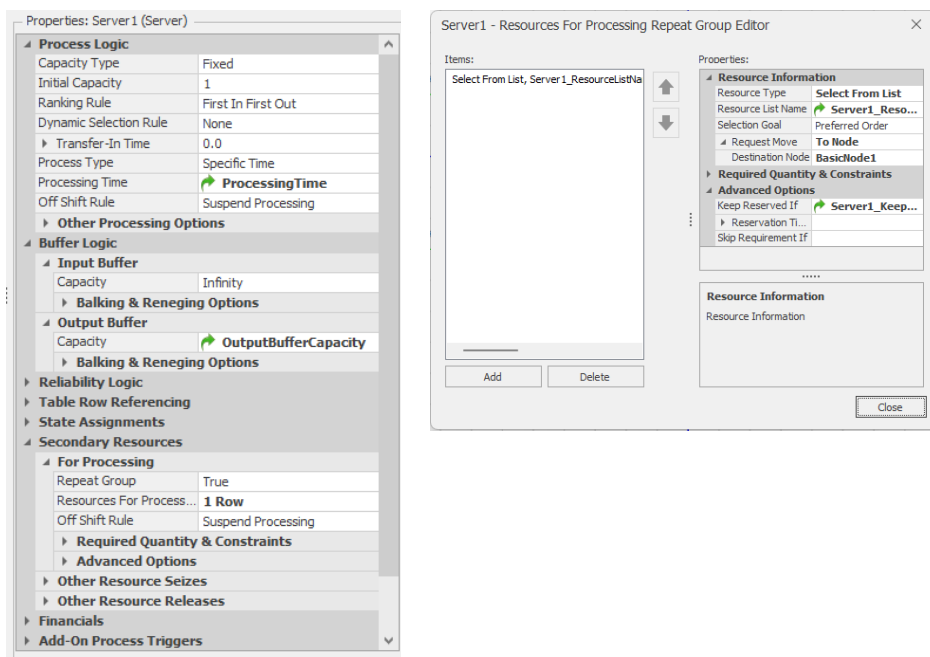


Figura 12 – Propriedades do Server1 e definição do recurso alocado

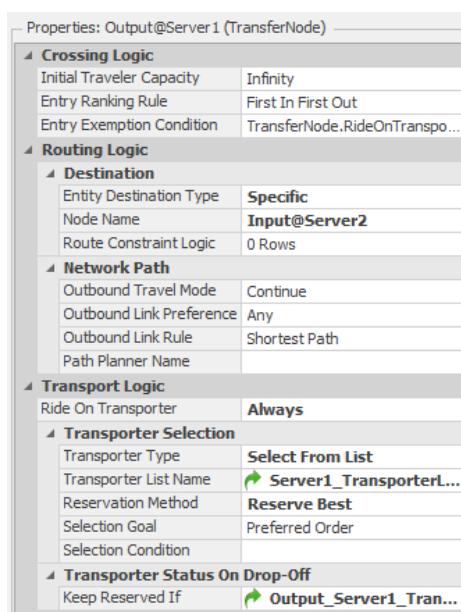


Figura 13 – Propriedades do buffer de saída do Server1

Trabalhadores (Workers): Quatro trabalhadores foram modelados com rotas específicas e responsabilidades definidas conforme a estratégia de alocação adotada, configurados através das propriedades do *Worker*, ilustrado na figura 14.

Properties: Worker1 (Worker)	
Resource Logic	
Capacity Type	Fixed
Ranking Rule	First In First Out
Dynamic Selection Rule	None
Park While Busy	False
Travel Logic	
Initial Desired Speed	1
Initial Travel Mode	Network Only
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)	Worker1_InitialNode
Idle Action	Park At Node
Off Shift Action	Park At Node
Transport Logic	
Financials	
Add-On Process Triggers	
Population	
Advanced Options	
General	
Animation	

Figura 14 – Propriedades do Worker1

3.3.2. Construção e Configuração das Estratégias de Alocação

As quatro **estratégias** foram implementadas no modelo com base em regras específicas de movimentação e processamento, tal como está definido na tabela 2. Na figura 15 encontramos o painel do software onde se alteram os recursos por estratégia.

Zonas Dedicadas:

Os trabalhadores foram atribuídos a conjuntos de dois postos de trabalho, e movem-se apenas dentro dessa área. Este modelo foi projetado para ser mais previsível, mas com menor flexibilidade.

Zonas Relaxadas:

Cada par de trabalhadores cobrem quatro postos de trabalho, permitindo uma maior flexibilidade no transporte e processamento das entidades.

Zonas Flutuantes:

Cada trabalhador é responsável por três postos de trabalho, um exclusivo e dois partilhados com outro trabalhador. Os trabalhadores ajustam-se conforme a disponibilidade, garantindo maior flexibilidade e ajudando-se nos postos partilhados para equilibrar a carga.

Zonas Sobrepostas (*Rabbit Chase*):

Um trabalhador segue com uma entidade (produto) ao longo de toda a linha de produção, processando-a em cada *server* sequencialmente, o que minimiza a troca de tarefas entre trabalhadores.

Tabela 2 – Funções dos trabalhadores nas diferentes estratégias

Estratégia	Função dos Trabalhadores
Zonas Dedicadas	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalhador 1: Retira a entidade do <i>Source</i>, transporta e processa nos Postos 1 e 2. • Trabalhador 2: Transporta e processa nos Postos 3 e 4. • Trabalhador 3: Transporta e processa nos Postos 5 e 6. • Trabalhador 4: Transporta e processa nos Postos 7 e 8.
Zonas Relaxadas	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalhadores 1 e 2: Transportam e processam as entidades nos Postos 1, 2, 3 e 4. • Trabalhadores 3 e 4: Transportam e processam as entidades nos Postos 5, 6, 7 e 8. <p>Cada trabalhador opera de forma sequencial com a sua própria entidade.</p>
Zonas Flutuantes	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalhador 1: Transporta e processa as entidades do <i>Source</i> até ao Posto 3 • Trabalhador 2: Transporta e processa do Posto 3 até ao Posto 5 • Trabalhador 3: Transporta e processa do Posto 5 até ao Posto 7 • Trabalhador 4: Transporta e processa as entidades do <i>Source</i> até ao Posto 1, e, adicionalmente, transporta e processa do Posto 7 até ao Posto 8.
Zonas Sobrepostas	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalhador 1: Retira a entidade do <i>Source</i> e processa-a sequencialmente nos Postos 1 a 8. • Trabalhadores 2, 3 e 4: Iniciam o processamento no <i>Source</i> após o trabalhador anterior, mantendo a sequência da linha de produção.

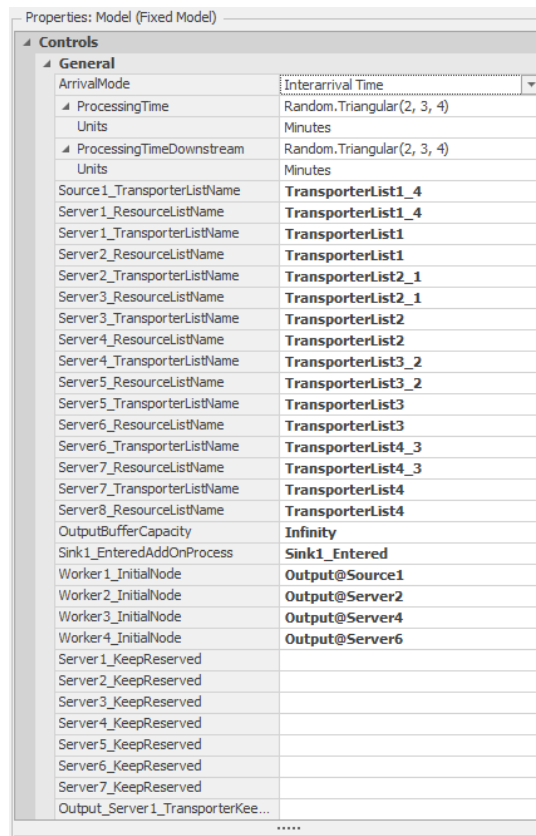


Figura 15 – Painel de controlos utilizado para definir os recursos dos vários cenários testados

Para que os trabalhadores mantivessem o controlo das entidades durante o processamento, a funcionalidade *Keep Reserved If*, foi ajustada, de forma seletiva, para cada estratégia. Para as Zonas Sobrepostas, foi aplicado em todo o sistema, nas Zonas Relaxadas e Dedicadas também foi utilizado, exceto na transição entre trabalhadores. Para as Zonas Flutuantes, essa funcionalidade não foi usada, para garantir que os trabalhadores se adaptassem de forma mais dinâmica às necessidades do sistema.

3.3.3. Propriedades e Definições do Sistema de Simulação

Para garantir uma análise detalhada do desempenho do sistema de simulação, foram implementadas várias medidas de desempenho, como o tempo no sistema (TIS).

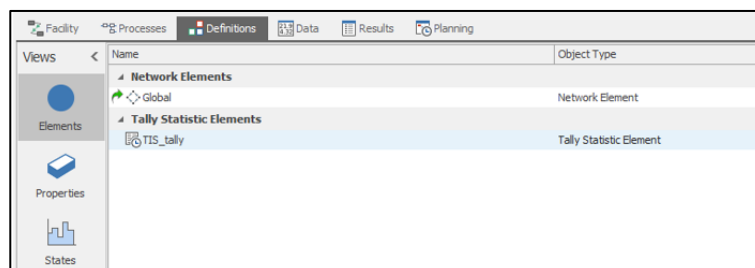


Figura 16 – Estatística *Tally*

Para a definição desta medida de desempenho foi criada uma estatística do tipo *tally*, denominada *TIS_tally*, ilustrada na figura 16, que tem como objetivo calcular o Tempo no Sistema de cada entidade. Este cálculo é efetuado no *sink* através da comparação entre o momento de saída de uma entidade do *Source* e a sua entrada no *sink*, demonstrado na figura 17, refletindo assim o tempo total que a entidade permaneceu no sistema.

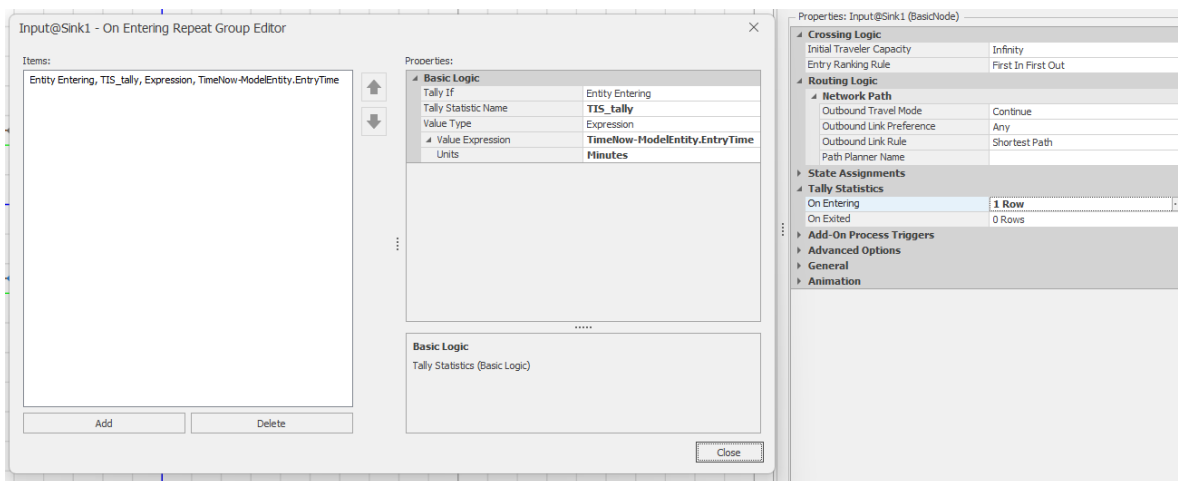


Figura 17 – Configuração da estatística *Tally* no *Sink1*

Para recolher os tempos de sistema fornecidos pela estatística, desde o momento em que o produto sai da primeira estação da linha, foi implementado o processo *Output_Source1_Exit*, ilustrado na figura 18, que contém um bloco *Decide* e um *Assign* para registar os valores de *TimeInSystem* de cada produto.

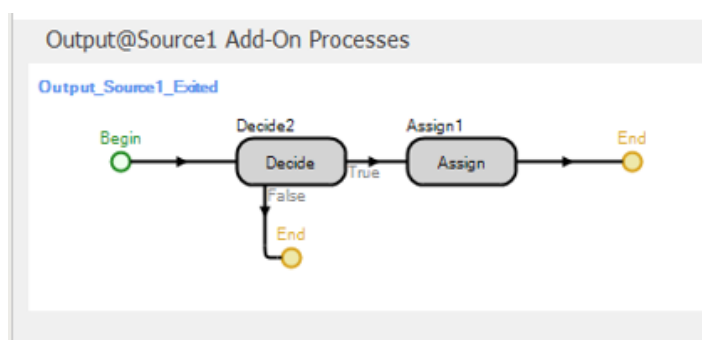


Figura 18 – Processo interno que permite gerar tempos de produção por produto

Outro aspeto importante do sistema de simulação é a chegada controlada de entidades, para o qual foi implementado um evento denominado *Event2*, diretamente ligado ao processo *Sink1_Entered*, que marca o momento em que o produto é finalizado. Este evento permite que, ao concluir a produção de uma entidade, o comando *Fire* crie uma nova, que é então inserida no sistema. O processo e o evento estão ilustrados na Figura 19.

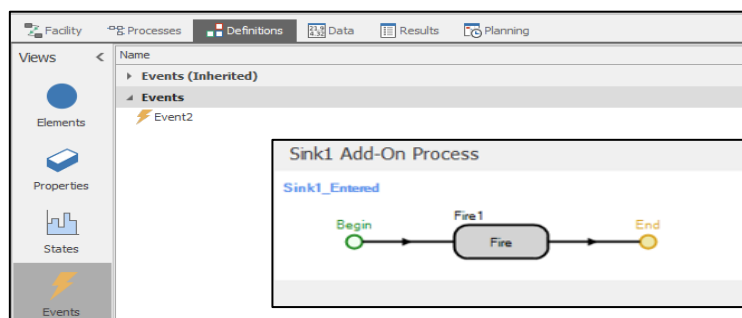


Figura 19 – Evento e processo responsável por controlar a chegada de uma nova entidade ao final de cada ciclo de produção.

Estas definições asseguram que o sistema seja capaz de registar e analisar o tempo de produção de cada entidade e o controlo de chegadas, permitindo uma avaliação rigorosa da eficiência das diferentes estratégias de alocação dos trabalhadores.

3.3.3. Tempos de Processamento e Variabilidade

Os tempos de processamento nas estações de trabalho foram modelados com base em valores determinísticos e distribuições estocásticas (triangulares) para representar diferentes níveis de variabilidade no sistema produtivo. Três situações de variabilidade foram consideradas:

1. Determinística, em que os tempos são fixos.
2. Triangular com variabilidade reduzida ($CV=0,136$), onde a variabilidade é controlada e os tempos de processamento têm uma dispersão mais reduzida.
3. Triangular com maior variabilidade ($CV=0,272$), que simula uma maior incerteza nos tempos de processamento em relação à anterior, aumentando a dispersão dos valores.

A análise destas configurações procura compreender como a variabilidade dos tempos de processamento influencia o desempenho do sistema produtivo, afetando a eficiência global em cenários com maior ou menor dispersão. Para ajustar a variabilidade nos tempos de processamento, foi utilizado o coeficiente de variação (CV), uma medida relativa de dispersão, calculada pela razão entre o desvio padrão e a média dos tempos de processamento.

Os valores das distribuições triangulares, calculados com base no CV, foram ajustados para simular diferentes níveis de variabilidade nos tempos de processamento, mantendo as médias fixas para permitir uma comparação direta entre os cenários. As médias de 2 e 4 minutos foram escolhidas para representar os cenários com menor e maior tempo de processamento.

Nos cenários com variabilidade reduzida, o CV foi ajustado para 0,136, uma dispersão controlada dos tempos de processamento. Para os cenários com maior variabilidade, foi ajustado para 0,272, refletindo um aumento significativo da incerteza. Embora a diferença entre os coeficientes possa parecer relativamente pequena, a variação de cerca de 13% indica praticamente o dobro da variabilidade entre os dois cenários, tal como se verifica, no gráfico da figura 20, o que pode impactar significativamente a eficiência do sistema.

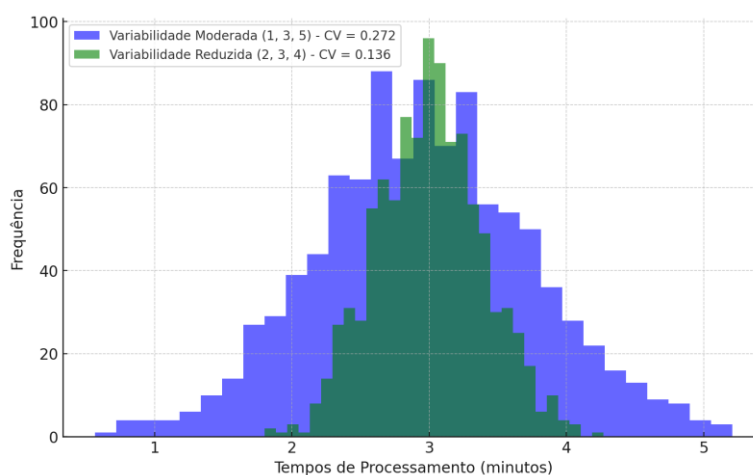


Figura 20 – Comparação da variabilidade entre os dois cenários de processamento

Na modelação do balanceamento de carga foram consideradas duas situações:

- Cargas iguais: Todos os postos têm os mesmos tempos de processamento.
- Cargas diferentes: Os tempos de processamento são diferenciados entre dois grupos de postos de trabalho.

Cargas iguais significa que todas as estações de trabalho apresentam os mesmos tempos médios de processamento, independentemente de ser determinístico ou estocástico, como nas distribuições triangulares, apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Tempos de processamento para cargas iguais em todos os postos de trabalho

<i>Variabilidade</i>	<i>Tempos de Processamento (mín, média, máx) em minutos</i>
<i>Determinístico</i>	3
<i>Triangular com variabilidade reduzida</i>	(2, 3, 4)
<i>Triangular com variabilidade moderada</i>	(1, 3, 5)

Cargas diferentes entre estações de trabalho, significa uma situação de desbalanceamento. Nesta situação os postos 1, 3, 6 e 8 têm um tempo médio de processamento mais elevado que os postos 2, 4, 5 e 7, como se verifica na tabela 4.

Tabela 4 – Tempos de processamento para cargas diferentes

<i>Postos</i>	<i>Variabilidade</i>	<i>Tempos de Processamento em minutos (mín, média, máx)</i>
1, 3, 6 e 8	Determinístico	4
	Triangular com variabilidade reduzida, CV=0.136	(2.67, 4, 5.33)
	Triangular com variabilidade moderada, CV=0.272	(1.33, 4, 6.67)
2, 4, 5 e 7	Determinístico	2
	Triangular com variabilidade reduzida	(1.33, 2, 2.67)
	Triangular com variabilidade moderada	(0.67, 2, 3.33)

O objetivo desta abordagem é avaliar o impacto da variabilidade em cenários de baixa dispersão e em cenários com maior dispersão dos tempos de processamento. Esta análise permite compreender como diferentes níveis de variabilidade afetam a eficiência do sistema e a sua capacidade de lidar com mudanças nos tempos de produção.

3.3.4. Configuração dos *Buffers* de Saída

Além dos tempos de processamento, outro fator fundamental na modelação da linha de produção foi a configuração dos ***OutputBuffers***. O *OutputBuffer* refere-se à capacidade de armazenamento temporário de entidades após o seu processamento numa estação de trabalho (servidor) antes de serem movidas para a próxima fase.

Para avaliar o impacto da capacidade do *OutputBuffer* no desempenho da produção, foram modelados dois cenários distintos:

- ***OutputBuffer* = 0**, o *buffer* foi configurado com capacidade zero, ou seja, as entidades processadas não podem ser armazenadas após o processamento. Isto significa que o posto só pode iniciar o processamento de uma nova entidade quando a anterior for removida pelo trabalhador, o que pode gerar constrangimentos no fluxo de produção, conforme se observa na Figura 21, onde o posto fica bloqueado até que a entidade processada seja retirada pelo trabalhador.

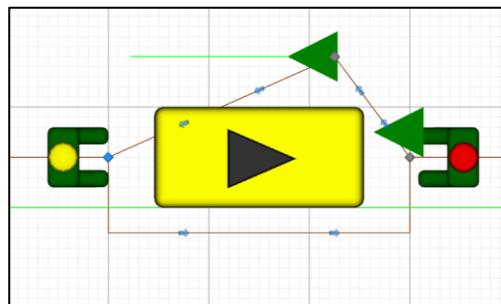


Figura 21 – Servidor com *OutputBuffer* = 0, ilustrando a espera no servidor

- ***OutputBuffer* = ∞**, o *buffer* foi configurado como infinito, permitindo o armazenamento temporário das entidades processadas. Neste caso, o posto pode continuar a processar novas entidades sem ter de esperar pela disponibilidade de um trabalhador para as mover, resultando num fluxo mais fluido, como ilustrado na Figura 22, onde o *server* permite o processamento de novas entidades enquanto outras aguardam no *OutputBuffer*.

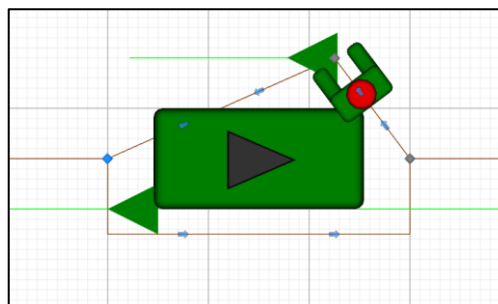


Figura 22 – Servidor com *OutputBuffer* = ∞, demonstrando a continuidade do processamento

Esta comparação entre a capacidade limitada e ilimitada do *buffer* permite avaliar a influência da gestão de filas no desempenho da linha de produção.

3.3.5. Chegada das Entidades/ Lançamento em Produção

Na modelação do sistema produtivo, foram utilizadas duas abordagens distintas para a chegada de entidades ao sistema e lançamento em produção: controlada e não controlada. Estas duas abordagens foram ajustadas para garantir um fluxo contínuo de entidades, de modo a minimizar períodos de inatividade dos trabalhadores e maximizar a eficiência do sistema. A chegada de uma entidade é a chegada de um novo produto à linha ou a disponibilização de materiais na linha para se iniciar a produção de um novo produto.

Controlada - Foi ajustado para introduzir quatro entidades iniciais no início da simulação, aplicável a todas as estratégias. Novas entidades são lançadas em produção apenas quando uma entidade é finalizada, ou seja, quando o produto é concluído. Esta abordagem garante que os trabalhadores têm entidades disponíveis para processar, enquanto o trabalho em curso de produção é controlado, sendo conhecida como CONWIP (*Constant Work In Progress*).

Não controlada - Corresponde ao intervalo entre a chegada de duas entidades consecutivas à linha. Foi modelado através de uma distribuição exponencial, definida como *Random.Exponential(7.55)*. Este valor foi obtido com base numa média calculada a partir do desempenho do método CONWIP nos cenários mais críticos, ajustando a taxa de entrada de entidades (chegada) à taxa média de saída observada.

Esta abordagem permite simular um fluxo contínuo e aleatório de chegadas, onde o tempo entre chegadas varia, mas mantém uma média de 7 minutos e 33 segundos. A distribuição exponencial é amplamente utilizada para modelar eventos de chegada que ocorrem de forma aleatória, o que reflete as variações naturais na entrada de entidades num sistema produtivo. O objetivo desta configuração é equilibrar a chegada de entidades com a capacidade de processamento, garantindo uma operação estável e sem sobrecarga.

3.3.6. Condições Gerais de Simulação

A simulação foi projetada para cobrir todas as combinações possíveis dos fatores experimentais. Foram analisados 96 cenários distintos, e, para assegurar resultados precisos, cada cenário foi replicado 100 vezes. As replicações tiveram uma duração total de 12.000 minutos (equivalente a 200 horas), com os primeiros 2.000 minutos reservados para o warm-up. Este período inicial foi essencial para estabilizar o sistema antes da recolha de dados, evitando que os resultados fossem influenciados por condições transitórias. As variáveis testadas nestes cenários incluíram:

- Quatro estratégias de alocação dos trabalhadores: desde a mais rígida, como as Zonas Dedicadas, até à mais flexível, como Zonas Sobrepostas (*Rabbit Chase*).
- Três níveis de variabilidade dos tempos de processamento (CV=0; CV=0.136 e CV=0.272)
- Dois níveis de capacidades dos *OutputBuffers*: com capacidade zero e infinita.
- Duas abordagens ao lançamento de novos trabalhos na linha: não controlada (i.e., aleatória, baseada numa distribuição exponencial) e controlada (i.e., *Constant Work In Process*) de 4 produtos.

Tabela 3 – Configurações dos Cenários de Simulação

Cenário	Chegadas	Variabilidade	Carga	<i>OutputBuffer</i> Capacity
1	Não Controlada	Triangular (CV=0.136)	Balanceada	0
2	Não Controlada	Triangular (CV=0.136)	Não Balanceada	0
3	Não Controlada	Triangular (CV=0.272)	Balanceada	0
4	Não Controlada	Triangular (CV=0.272)	Não Balanceada	0
5	Não Controlada	Determinística	Balanceada	0
6	Não Controlada	Determinística	Não Balanceada	0
7	Controlada	Triangular (CV=0.136)	Balanceada	0
8	Controlada	Triangular (CV=0.136)	Não Balanceada	0
9	Controlada	Triangular (CV=0.272)	Balanceada	0
10	Controlada	Triangular (CV=0.272)	Não Balanceada	0
11	Controlada	Determinística	Balanceada	0
12	Controlada	Determinística	Não Balanceada	0
13	Não Controlada	Triangular (CV=0.136)	Balanceada	Infinito
14	Não Controlada	Triangular (CV=0.136)	Não Balanceada	Infinito
15	Não Controlada	Triangular (CV=0.272)	Balanceada	Infinito
16	Não Controlada	Triangular (CV=0.272)	Não Balanceada	Infinito
17	Não Controlada	Determinística	Balanceada	Infinito
18	Não Controlada	Determinística	Não Balanceada	Infinito
19	Controlada	Triangular (CV=0.136)	Balanceada	Infinito
20	Controlada	Triangular (CV=0.136)	Não Balanceada	Infinito
21	Controlada	Triangular (CV=0.272)	Balanceada	Infinito
22	Controlada	Triangular (CV=0.272)	Não Balanceada	Infinito
23	Controlada	Determinística	Balanceada	Infinito
24	Controlada	Determinística	Não Balanceada	Infinito

A simulação foi monitorizada em tempo real através da interface gráfica do SIMIO, permitindo o acompanhamento contínuo do desempenho do sistema. Isso facilitou a identificação de bloqueios, ajustes imediatos e a análise visual dos diferentes cenários, proporcionando uma visão clara dos padrões de comportamento e do impacto de cada variável. Esta abordagem permitiu validar o modelo, garantindo que cada configuração simulada refletisse de forma precisa as condições definidas.

Esse acompanhamento dinâmico contribuiu de maneira significativa para a exatidão dos resultados e proporcionou uma visão abrangente sobre o desempenho das estratégias de alocação dos trabalhadores e das diferentes configurações de produção.

3.3.7. Medidas de Desempenho

As medidas de desempenho utilizadas para avaliar o sistema de simulação são fundamentais para a análise da eficiência e comportamento do sistema produtivo.

O *throughput* corresponde ao número total de entidades produzidas em 10.000 minutos de simulação, mas para facilitar a interpretação dos resultados, foi determinada a taxa de produção, ou seja, o número de entidades produzidas por hora. Esta foi calculada dividindo o *throughput* pelo total de horas, permitindo uma interpretação mais generalizada dos resultados, independentemente da duração específica da simulação.

$$\text{Taxa de Produção} = \frac{\text{Throughput}}{10.000} \times 60$$

Equação 3 - Fórmula utilizada para calcular a taxa de produção

O *TimeInSystem* (TIS) mede o tempo total que uma entidade permanece no sistema produtivo, desde o momento em que sai do *Source* (primeira estação da linha) até sair da última estação de trabalho. Esta permite avaliar a eficiência global do fluxo de trabalho, sendo que indica quanto tempo, em média, uma entidade demora a ser processada por completo. O TIS é uma medida fundamental para avaliar como cada uma das estratégias reage aos diferentes cenários simulados, permitindo compreender de que forma os fatores influenciam o desempenho global do sistema.

A utilização dos trabalhadores e estações mede a percentagem de tempo em que os recursos estão ocupados em relação ao total disponível, avaliando a eficiência na alocação. Utilizações altas podem indicar sobrecarga, enquanto baixas podem indicar subutilização. A análise mostra como as estratégias equilibram a carga de trabalho, promovendo uma utilização mais eficiente.

4. Resultados

No decorrer deste capítulo, os resultados completos das simulações, como a taxa de produção, o tempo no sistema (TIS), a percentagem de utilização dos trabalhadores (*Workers*), e a percentagem de utilização dos postos (*servers*) estão organizados em Anexos nos subcapítulos **2 a 5**: Resultados das Zonas Dedicadas, Zonas Relaxadas, Zonas Flutuantes e Zonas Sobrepostas, respetivamente.

Cada anexo apresenta tabelas detalhadas com os valores obtidos para cada cenário simulado, com valores máximos, mínimos, médios e desvios padrão para medir a dispersão dos valores obtidos pela simulação, conforme descrito nas Tabelas 7 a 22.

4.1. Medidas de Desempenho e Plano Experimental

4.1.1. Medidas de Desempenho

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados da simulação realizada, onde as diferentes estratégias de alocação dos trabalhadores foram testadas, considerando múltiplas variáveis que influenciam o desempenho do sistema. As principais medidas de desempenho analisadas são, a taxa de produção, o tempo no sistema (TIS), a utilização dos trabalhadores (*Workers*) e a utilização das estações de trabalho (*servers*).

4.1.2. Plano Experimental

A análise é feita de forma detalhada, como se pode ver na tabela 3, com foco em vários fatores:

- A chegada de trabalhos ao sistema (controlada vs. não controlada);
- A capacidade dos *OutputBuffers* ;
- A variabilidade dos tempos de processamento;
- O balanceamento de carga entre postos de trabalho (iguais vs. diferentes);

Cada um destes fatores é investigado quanto ao seu impacto nas estratégias de alocação dos trabalhadores, proporcionando uma visão abrangente sobre a eficiência de cada abordagem em diferentes cenários. O objetivo é identificar as condições que maximizam o desempenho do sistema e destacar as estratégias mais eficazes para lidar com a incerteza e variabilidades presentes nos processos produtivos.

4.2 Análise e Discussão dos Resultados

Esta secção apresenta e discute os resultados das simulações realizadas. A análise é organizada em três partes principais: uma análise de variância (ANOVA) para avaliar a influência dos fatores testados no desempenho do sistema, a avaliação dos fatores individuais e dos seus melhores cenários, onde são detalhados os impactos específicos de cada fator e uma análise geral das estratégias utilizadas, destacando a eficácia e as limitações observadas em cada uma das abordagens testadas.

4.2.1. Análise Geral das ANOVA

A ANOVA (Análise de Variância) é uma técnica estatística utilizada para verificar se as diferenças observadas nas medidas de desempenho são relevantes do ponto de vista estatístico. As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados da ANOVA para a Taxa de Produção e o TIS, incluindo:

Tipo III Soma dos Quadrados: Mede a variabilidade explicada por cada fator ou interação.

df (graus de liberdade): Refere-se aos níveis possíveis do fator, ajustados pelo número de observações.

Quadrado Médio: Calculado dividindo a Soma dos Quadrados pelo df, usado no cálculo de F.

F: Compara a variabilidade explicada pelo fator com a não explicada. Valores de F mais altos indicam que o fator tem um efeito relevante na medida de desempenho.

Sig. (Significância): Indica a probabilidade do efeito observado ser aleatório. Valores inferiores a 0,05 são, geralmente, considerados significativos.

R² ajustado: Proporção da variabilidade explicada. Com valores de 0,946 para a Taxa de Produção e 0,869 para o TIS, o R² ajustado demonstra que uma parte substancial da variabilidade é explicada pelos fatores incluídos na análise.

Os resultados indicam que a Taxa de Chegadas e a Estratégia são os fatores mais influentes, seguidos pela Carga e Variabilidade dos Tempos. A interação entre Estratégia e Chegadas mostra-se especialmente significativa, realçando que a frequência de chegadas e a forma de alocação impactam diretamente o desempenho. As interações entre Estratégia, Carga e Chegadas reforçam a importância de considerar tanto os fatores individuais como as suas interações para uma análise sólida do sistema.

Tabela 4 – Resultados da ANOVA para a taxa de produção.

Testes de efeitos entre sujeitos

Variável dependente: Taxa de Produção

Origem	Tipo III Somados Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
Modelo corrigido	4228,946 ^a	95	44,515	1758,159	<,001
Intercepto	680980,249	1	680980,249	26895783,847	<,001
Estratégia	538,791	3	179,597	7093,302	<,001
Carga	52,957	1	52,957	2091,557	<,001
Variabilidade	185,773	2	92,886	3668,613	<,001
Chegadas	2289,750	1	2289,750	90435,257	<,001
OutputBufferCap	,273	1	,273	10,779	,001
Estratégia * Carga	108,715	3	36,238	1431,252	<,001
Estratégia * Variabilidade	35,065	6	5,844	230,819	<,001
Estratégia * Chegadas	552,426	3	184,142	7272,810	<,001
Estratégia * OutputBufferCap	,432	3	,144	5,687	<,001
Carga * Variabilidade	,840	2	,420	16,581	<,001
Carga * Chegadas	49,997	1	49,997	1974,680	<,001
Carga * OutputBufferCap	,218	1	,218	8,620	,003
Variabilidade * Chegadas	232,696	2	116,348	4595,250	<,001
Variabilidade * OutputBufferCap	,093	2	,046	1,829	,161
Chegadas * OutputBufferCap	,066	1	,066	2,626	,105
Estratégia * Carga * Variabilidade	10,726	6	1,788	70,607	<,001
Estratégia * Carga * Chegadas	117,078	3	39,026	1541,356	<,001
Estratégia * Carga * OutputBufferCap	,751	3	,250	9,889	<,001
Estratégia * Variabilidade * Chegadas	34,438	6	5,740	226,691	<,001
Estratégia * Variabilidade * OutputBufferCap	,555	6	,092	3,652	,001
Estratégia * Chegadas * OutputBufferCap	,506	3	,169	6,656	<,001
Carga * Variabilidade * Chegadas	1,265	2	,633	24,991	<,001
Carga * Variabilidade * OutputBufferCap	,543	2	,271	10,719	<,001
Carga * Chegadas * OutputBufferCap	,294	1	,294	11,619	<,001
Variabilidade * Chegadas * OutputBufferCap	,267	2	,133	5,268	,005
Estratégia * Carga * Variabilidade * Chegadas	9,601	6	1,600	63,197	<,001
Estratégia * Carga * Variabilidade * OutputBufferCap	1,542	6	,257	10,153	<,001
Estratégia * Carga * Chegadas * OutputBufferCap	,681	3	,227	8,965	<,001
Estratégia * Variabilidade * Chegadas * OutputBufferCap	,448	6	,075	2,946	,007
Carga * Variabilidade * Chegadas * OutputBufferCap	,502	2	,251	9,909	<,001
Estratégia * Carga * Variabilidade * Chegadas * OutputBufferCap	1,659	6	,277	10,923	<,001
Padrão	240,634	9504	,025		
Total	685449,829	9600			
Total corrigido	4469,580	9599			

a. R Quadrado = ,946 (R Quadrado Ajustado = ,946)

Tabela 5 – Resultados da ANOVA para tempo no sistema (TIS)

Testes de efeitos entre sujeitos

Variável dependente: TIS (minutos)

Origem	Tipo III Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
Modelo corrigido	964575,678 ^a	96	10047,663	666,770	<,001
Intercepto	57733,196	1	57733,196	3831,217	<,001
Estratégia	377783,736	3	125927,912	8356,669	<,001
Carga	19347,704	1	19347,704	1283,928	<,001
Variabilidade	43095,766	2	21547,883	1429,933	<,001
Chegadas	207020,509	1	207020,509	13738,033	<,001
OutputBufferCap	340,170	1	340,170	22,574	<,001
Estratégia * Carga	27078,665	3	9026,222	598,987	<,001
Estratégia * Variabilidade	3746,162	6	624,360	41,433	<,001
Estratégia * Chegadas	220555,362	3	73518,454	4878,739	<,001
Estratégia * OutputBufferCap	3410,627	3	1136,876	75,444	<,001
Carga * Variabilidade	864,485	2	432,242	28,684	<,001
Carga * Chegadas	8644,575	1	8644,575	573,660	<,001
Carga * OutputBufferCap	1582,056	1	1582,056	104,986	<,001
Variabilidade * Chegadas	19373,154	2	9686,577	642,808	<,001
Variabilidade * OutputBufferCap	139,484	2	69,742	4,628	,010
Chegadas * OutputBufferCap	385,783	1	385,783	25,601	<,001
Estratégia * Carga * Variabilidade	817,062	6	136,177	9,037	<,001
Estratégia * Carga * Chegadas	9051,604	3	3017,201	200,224	<,001
Estratégia * Carga * OutputBufferCap	5499,690	3	1833,230	121,654	<,001
Estratégia * Variabilidade * Chegadas	1774,585	6	295,764	19,627	<,001
Estratégia * Variabilidade * OutputBufferCap	1120,038	6	186,673	12,388	<,001
Estratégia * Chegadas * OutputBufferCap	3639,741	3	1213,247	80,512	<,001
Carga * Variabilidade * Chegadas	1223,023	2	611,512	40,580	<,001
Carga * Variabilidade * OutputBufferCap	20,900	2	10,450	,693	,500
Carga * Chegadas * OutputBufferCap	1411,373	1	1411,373	93,660	<,001
Variabilidade * Chegadas * OutputBufferCap	130,056	2	65,028	4,315	,013
Estratégia * Carga * Variabilidade * Chegadas	418,510	6	69,752	4,629	<,001
Estratégia * Carga * Variabilidade * OutputBufferCap	22,394	6	3,732	,248	,960
Estratégia * Carga * Chegadas * OutputBufferCap	4931,814	3	1643,938	109,093	<,001
Estratégia * Variabilidade * Chegadas * OutputBufferCap	1121,124	6	186,854	12,400	<,001
Carga * Variabilidade * Chegadas * OutputBufferCap	10,970	2	5,485	,364	,695
Estratégia * Carga * Variabilidade * Chegadas * OutputBufferCap	14,554	6	2,426	,161	,987
Padrão	143217,222	9504	15,069		
Total	10493856,102	9601			
Total corrigido	1107792,900	9600			

a. R Quadrado = ,871 (R Quadrado Ajustado = ,869)

4.2.2. Impacto da Capacidade dos *OutputBuffers*

A capacidade dos *buffers* de saída mostrou-se um fator influente, afetando principalmente o Tempo no Sistema (TIS). Em contrapartida, a taxa de produção manteve-se mais estável entre cenários de *buffers* limitados e ilimitados, ainda que com algumas diferenças.

Observa-se, na Figura 23, que as estratégias Dedicadas e Relaxadas registaram um aumento na produção, cerca de 3% a 5%, com *buffers* ilimitados em relação aos cenários com *buffers* limitados, destacando uma ligeira melhoria. A estratégia Sobreposta demonstrou uma resiliência maior, apresentando uma taxa de produção consistente em ambos os cenários, sendo a menos afetada pelas restrições de *buffer*. Em contraste, a estratégia Flutuante apresentou uma resposta menos consistente: alcançou um desempenho superior em condições de *buffer* ilimitado e carga balanceada, mas sofreu uma redução média de 10% quando a carga não estava balanceada. Curiosamente, com *buffer* limitado, esta estratégia obteve bons resultados, a sua flexibilidade permitiu uma gestão mais eficiente dos recursos disponíveis e adaptou-se, indica que, para a estratégia Flutuante, uma limitação na capacidade de armazenamento pode facilitar o controlo do fluxo, melhorando a resposta em condições de carga não balanceada.

A capacidade dos *buffers* afeta a produção de forma moderada, com maior impacto em cenários de carga não balanceada. *Buffers* ilimitados oferecem um ligeiro aumento na produção. Estratégias mais flexíveis adaptam-se melhor à limitação dos *buffers*.

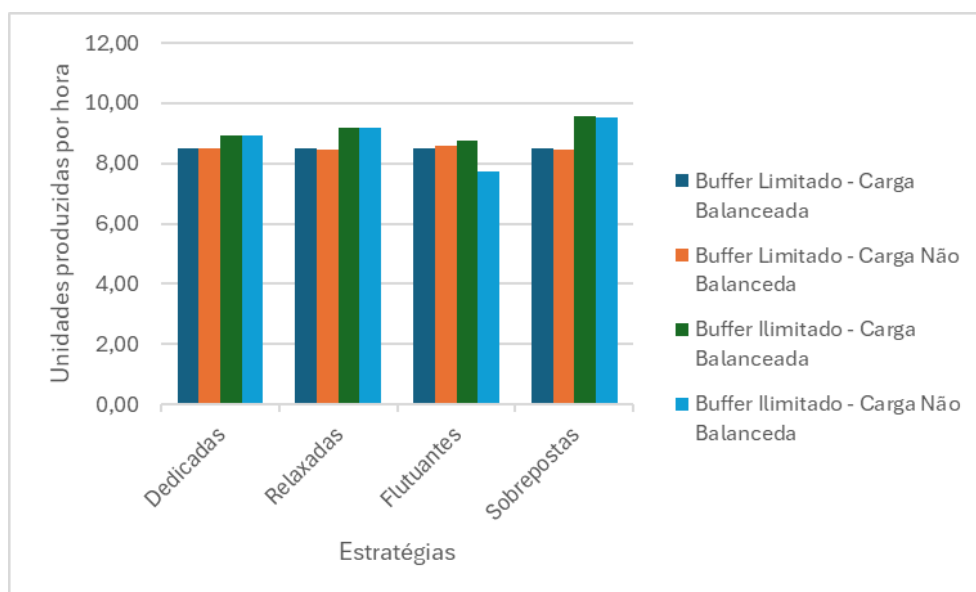


Figura 23 — Comparação da Taxa de Produção com *buffers* limitados e ilimitados em cenários de carga balanceada e não balanceada.

O Tempo no Sistema (TIS) foi significativamente influenciado pela capacidade dos *buffers*, com variações notáveis entre as estratégias. Nos cenários de *buffers* limitados e carga não balanceada, o TIS aumentou substancialmente, especialmente na estratégia Flutuante, onde ultrapassou os 40 minutos, mesmo no melhor cenário. No entanto, apesar desse aumento no TIS, a estratégia Flutuante manteve uma boa produção, o que indica que, embora o tempo de permanência dos produtos no sistema seja maior, a flexibilidade desta estratégia permite compensar a sua vulnerabilidade com uma produção consistente.

As estratégias Dedicadas e Relaxadas mostraram-se menos sensíveis à limitação dos *buffers*, com aumentos no TIS de aproximadamente 5% a 8%, situando-se entre 26 e 28 minutos para ambos os tipos de carga. Esta estabilidade indica que, apesar de menos flexíveis, estas estratégias conseguem manter o tempo de espera dentro de um intervalo relativamente constante, mesmo em condições de armazenamento limitado.

A estratégia Sobreposta demonstrou estabilidade e resistência à variabilidade das condições, mantendo o TIS com diferenças muito pequenas (aproximadamente 5% entre os cenários), mesmo com a carga não balanceada e *buffers* limitados. Este comportamento indica que, mesmo em contextos de *buffers* limitados, é capaz de manter a eficiência e evitar aumentos significativos no tempo de espera.

Assim sendo, podemos analisar que a limitação dos *buffers* influencia significativamente o TIS, com maior impacto em cenários de carga não balanceada. *Buffers* ilimitados contribuem para a redução do TIS ao permitir uma maior fluidez no fluxo de trabalho. Estratégias mais rígidas demonstram maior estabilidade no TIS, enquanto estratégias flexíveis apresentam maior variabilidade.

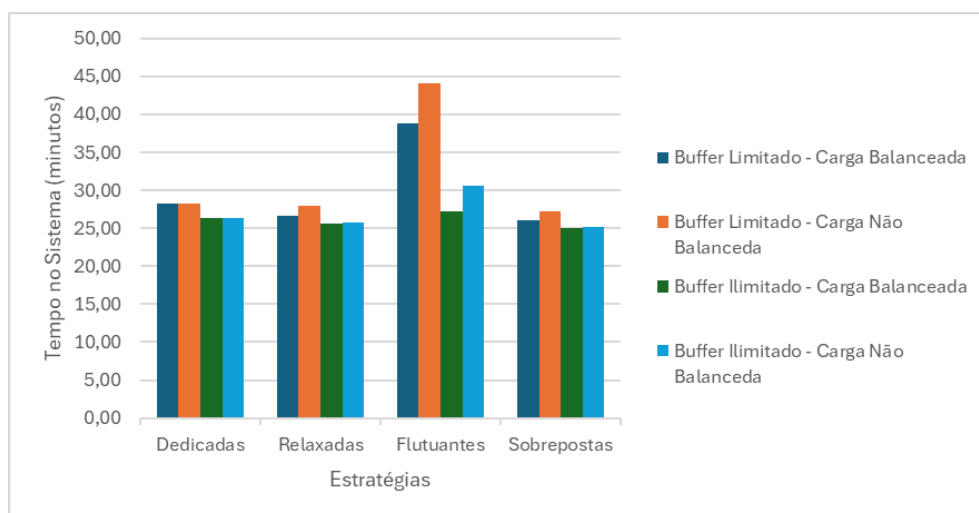


Figura 24 – Comparação do TIS com *buffers* limitados e ilimitados em cenários de carga balanceada e não balanceada.

4.2.3 Avaliação da Variabilidade dos Tempos de Processamento

Com a introdução da variabilidade, observam-se mudanças no desempenho das estratégias. Em comparação com o cenário determinístico, que serve de referência para a produção ideal, com variabilidade baixa ($CV=0,136$), as estratégias Sobreposta e Relaxada mantêm-se próximas, com uma redução de cerca de 1% e 2%, respetivamente. As Dedicadas registam uma ligeira queda, próxima dos 3%. A Flutuante apresenta também uma diferença reduzida, face ao cenário determinístico, com uma diminuição de aproximadamente 1%, e destaca-se pela estabilidade apesar da variabilidade, no entanto com menor produção.

Com variabilidade moderada ($CV=0,272$), a produção é mais afetada, com Dedicadas e Relaxadas a registarem diminuições médias de 6%, evidenciando sensibilidade ao aumento de incerteza. A Sobreposta continua a mostrar resiliência, com uma queda de apenas 2%. A Flutuante, embora apresente uma produção absoluta menor, mantém-se estável com uma redução limitada a cerca de 3%, demonstrando adaptabilidade ao aumento de variabilidade.

Em suma, a variabilidade nos tempos de processamento impacta a produção de forma diferenciada consoante a estratégia. Sobrepostas mostram-se mais consistente, com mínimas perdas de produção em cenários de maior variabilidade. As Dedicadas e Relaxadas revelam-se mais sensíveis a variações moderadas e a Flutuante, embora com produção mais baixa, mantém-se estável face ao aumento de variabilidade, com uma capacidade de adaptação que reduz o impacto da incerteza.

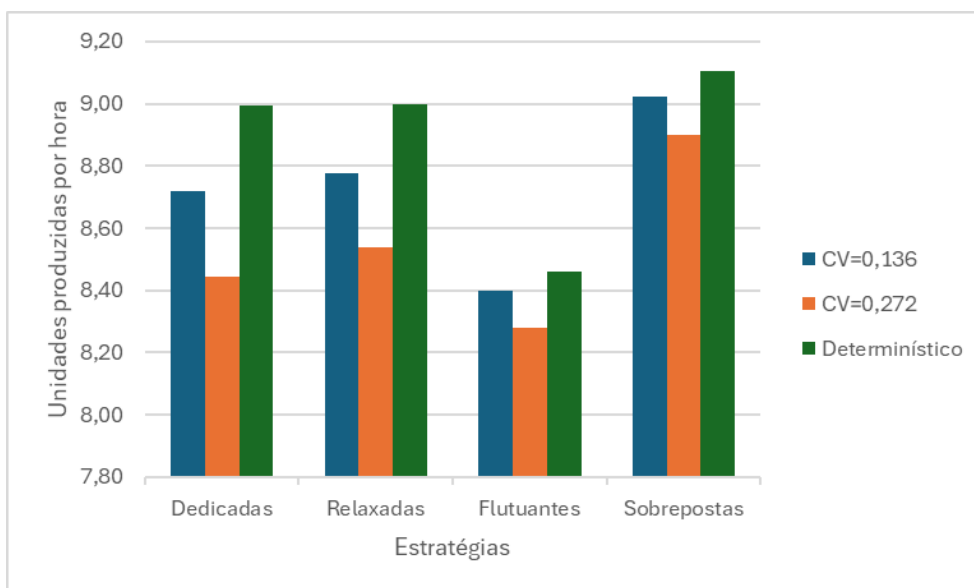


Figura 25 – Comparação da Taxa de Produção para os 3 níveis de variabilidade.

Com a introdução de variabilidade nos tempos de processamento, verifica-se um impacto diferenciado no Tempo no Sistema (TIS) entre as diferentes estratégias. Comparando com o cenário determinístico, que serve de referência para o TIS mais reduzido, observa-se que, com variabilidade baixa ($CV=0,136$), as estratégias Sobrepostas e Relaxadas mantêm-se próximas dos valores determinísticos, com um aumento de cerca de 3% a 4%, respetivamente. As Dedicadas e Flutuantes registam um aumento ligeiro, próximo dos 7%, com maior sensibilidade ao efeito da variabilidade, mesmo em cenários de menor incerteza.

Com variabilidade moderada ($CV=0,272$), o TIS aumenta ainda mais para todas as estratégias. As Dedicadas e Relaxadas registam aumentos médios de 10%, indicando uma sensibilidade acrescida face ao aumento de incerteza. A Sobreposta, por sua vez, continua a mostrar resiliência, com uma subida moderada de aproximadamente 5%. A Flutuante, ainda que menos eficiente em termos absolutos, evidencia a maior dificuldade em cenários de variabilidade, registando um TIS próximo dos 36 minutos, no entanto, um aumento de cerca de 8% em comparação com o cenário determinístico.

Em suma, a variabilidade nos tempos de processamento afeta o TIS de forma diferente. Estratégias como a Sobreposta mostram-se mais consistentes, com aumentos moderados em cenários de maior variabilidade. As Dedicadas e Relaxadas revelam-se mais sensíveis a variações moderadas, e a Flutuante, embora apresente o TIS mais elevado, demonstra estabilidade relativa, mas sofre um impacto significativo em cenários de variabilidade elevada.

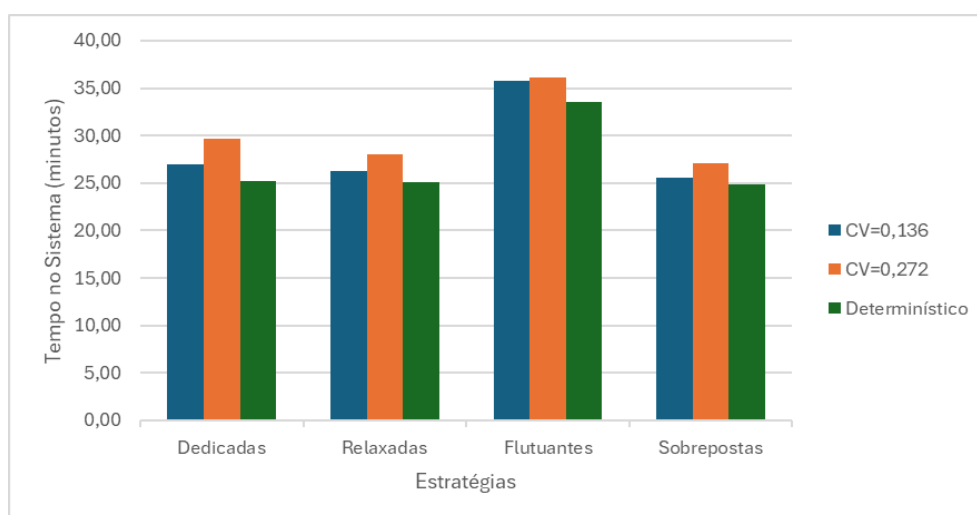


Figura 26 - Comparação do TIS para os 3 níveis de variabilidade.

4.2.4 Avaliação de Cargas Balanceadas e Não Balanceadas

No cenário com carga balanceada, as estratégias Relaxadas e Sobrepostas destacaram-se, apresentando uma produção média de 8,83 e 9,03 unidades/hora, respectivamente, beneficiando-se da uniformidade no fluxo de trabalho. Essa uniformidade reduz a necessidade de adaptações, permitindo que as entidades avancem consistentemente, o que maximiza a produção.

A estratégia Dedicada manteve uma produção estável de 8,72 unidades/hora tanto para cargas balanceadas quanto para cargas não balanceadas, demonstrando uma resiliência singular. A ausência de flutuações na sua produção destaca a estabilidade desta estratégia, que opera eficientemente mesmo com variações na carga.

Em contraste, a estratégia Flutuante teve um maior impacto pela carga não balanceada, reduzindo a sua produção para 8,15 unidades/hora, uma queda de cerca de 5% em relação ao cenário balanceado. Esta redução indica que, embora a flexibilidade seja uma característica fundamental desta estratégia, ela é mais sensível às irregularidades de fluxo causadas pela carga variável.

A estratégia Sobreposta, manteve uma produção elevada de 8,99 unidades/hora em carga não balanceada, com uma ligeira queda de apenas 0,4%. Essa resiliência indica que a flexibilidade controlada da Sobreposta é eficaz para minimizar perdas de eficiência mesmo em cenários de carga variável.

Em resumo, enquanto cargas balanceadas promovem um desempenho mais uniforme em todas as estratégias, a Sobreposta e a Dedicada mantêm uma produção estável em ambos os cenários, evidenciando resiliência e eficiência nas diferentes condições de carga.

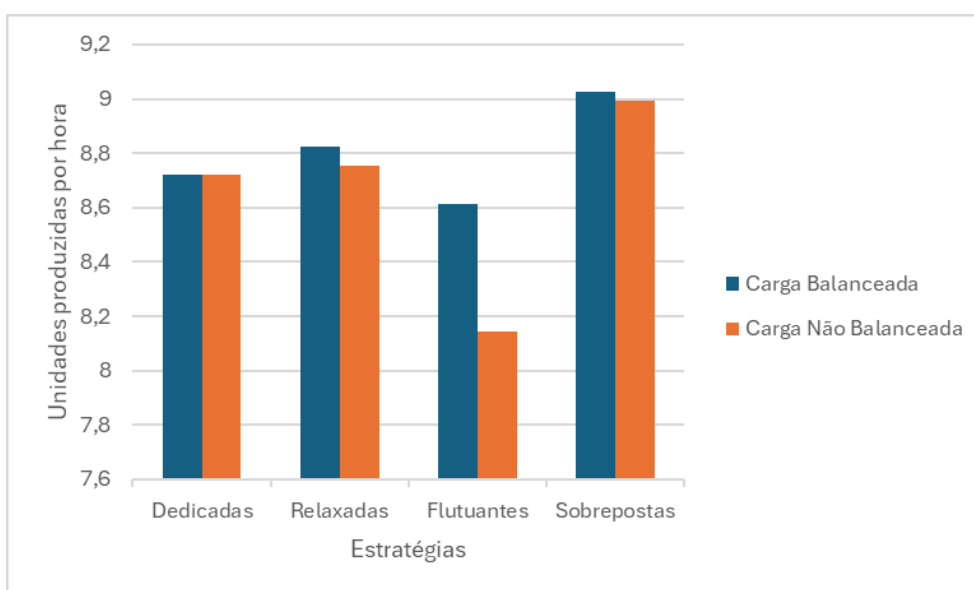


Figura 27 – Comparação da taxa de produção para os 2 níveis de carga.

Nos cenários com carga balanceada, o TIS manteve-se em níveis reduzidos, permitindo um fluxo mais eficiente. Estratégias como Dedicadas e Relaxadas beneficiaram particularmente deste equilíbrio, apresentando tempos de 27 e 26 minutos, respetivamente, sem variação significativa entre cargas balanceadas e não balanceadas. A estratégia Sobreposta também demonstrou um bom desempenho com carga balanceada, registando o menor TIS (25,5 minutos), evidenciando a eficiência em condições de uniformidade.

Em contrapartida, a carga não balanceada provocou um aumento no TIS, especialmente na estratégia Flutuante, que subiu para 37,3 minutos, uma diferença de cerca de 13% em relação ao cenário balanceado. Este aumento reflete a dificuldade em lidar com variações de carga, resultando em congestionamentos que afetam o tempo de espera no sistema. A estratégia Sobreposta, contudo, manteve um TIS consistente, com um aumento mínimo (26,2 minutos), indicando resiliência.

Esses resultados mostram que, embora as estratégias flexíveis consigam ajustar-se a condições variáveis, a carga não balanceada tende a elevar o TIS, especialmente em estratégias como Flutuantes. As Relaxadas e Sobrepostas, por outro lado, mostraram-se mais estáveis, com as Relaxadas mantendo o TIS independente da variação de carga.

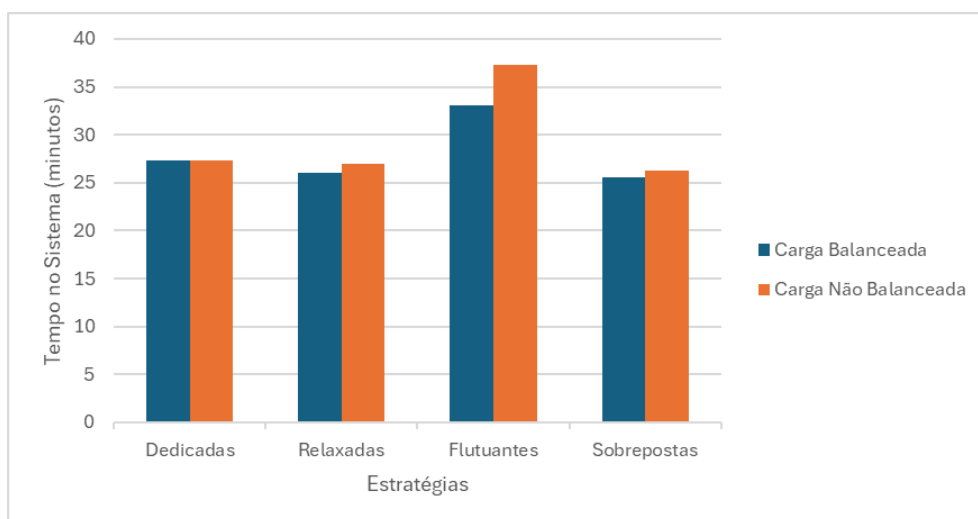


Figura 28 – Comparação do TIS para os 2 níveis de carga.

4.2.5 Avaliação de Chegadas Controladas e Não Controladas

Nos cenários analisados, o tipo de chegada (controlada ou não controlada) demonstrou influenciar a produção de maneira distinta. As chegadas não controladas, particularmente em condições de carga balanceada, proporcionaram uma leve vantagem em termos de taxa de produção para a maioria das estratégias. A estratégia Sobreposta destacou-se, mantendo uma produção elevada com uma média de 9,03 unidades/hora, o que reflete a sua adaptabilidade e eficiência em fluxos com variabilidade nas chegadas.

Quando se consideram cargas não balanceadas, as chegadas controladas parecem limitar mais a produção, especialmente nas estratégias Flutuantes, que sofrem uma redução de cerca de 5%, ou seja, mesmo com fluxos de entrada controlados, a variabilidade nas cargas revela menor produção. Estratégias mais rígidas, como Dedicadas e Relaxadas, mostraram quedas menores de produção, entre 0,5% e 1,5%, indicando uma sensibilidade moderada às chegadas controladas, mantendo uma resposta relativamente estável.

Em suma, as chegadas não controladas, em cenários com carga balanceada, favorecem uma ligeira melhoria na produção, realçando a adaptabilidade das estratégias flexíveis em lidar com fluxos de entrada variáveis. Em contraste, a combinação de chegadas controladas com carga não balanceada introduz pequenas reduções na produção, especialmente nas estratégias mais flexíveis, revelando a sua vulnerabilidade a variações inesperadas no fluxo de entrada.

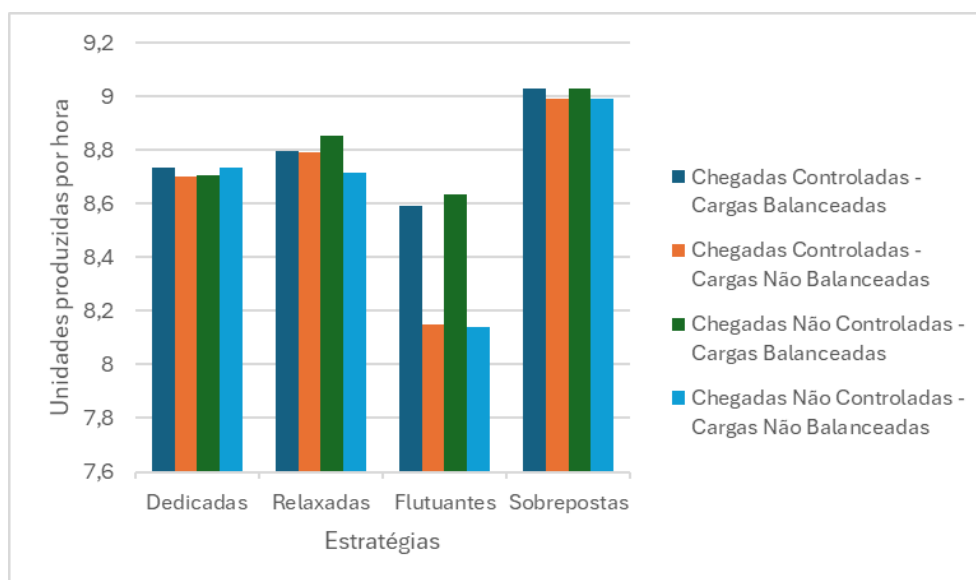


Figura 29– Comparação da Taxa de Produção para Chegadas Controladas e Não Controladas com impacto das cargas.

Nos resultados de Tempo no Sistema (TIS), podemos ver que a previsibilidade nas chegadas e a uniformidade da carga influenciam fortemente o desempenho das estratégias.

Nos cenários com chegadas controladas e carga balanceada, o TIS é geralmente mais baixo, com a Sobreposta a destacar-se por ter o menor valor (25,5 minutos), seguido de perto pelas Dedicadas e Relaxadas, que apresentam tempos de cerca de 27 e 26 minutos, respetivamente. A Flutuante, embora consistente, apresenta um TIS superior (33,5 minutos) devido à menor adaptabilidade em relação às demais.

Com chegadas controladas e carga não balanceada, o TIS aumenta ligeiramente, especialmente para a Flutuante, que alcança 37 minutos, refletindo dificuldades de adaptação à carga variável. Sobreposta e Relaxadas mantêm-se mais resilientes, com aumentos moderados.

Nos cenários de chegadas não controladas e carga balanceada, Sobrepostas e Relaxadas continuam a demonstrar eficiência, mantendo o TIS em torno de 25,50 e 26,20 minutos. A Flutuante regista uma ligeira melhoria para 32,5 minutos, mas continua com o TIS mais alto.

Por fim, com chegadas não controladas e carga não balanceada, o pior cenário para maioria das estratégias, com a Flutuante a atingir o maior valor (37,4 minutos), demonstrando uma elevada sensibilidade a variações. Em contraste, Sobrepostas e Dedicadas apresentam resiliência, mantendo o TIS relativamente estável.

Em suma, a previsibilidade nas chegadas e a carga balanceada são essenciais para reduzir o TIS, com a Sobreposta a mostrar maior estabilidade, enquanto a Flutuante revela vulnerabilidade a condições irregulares.

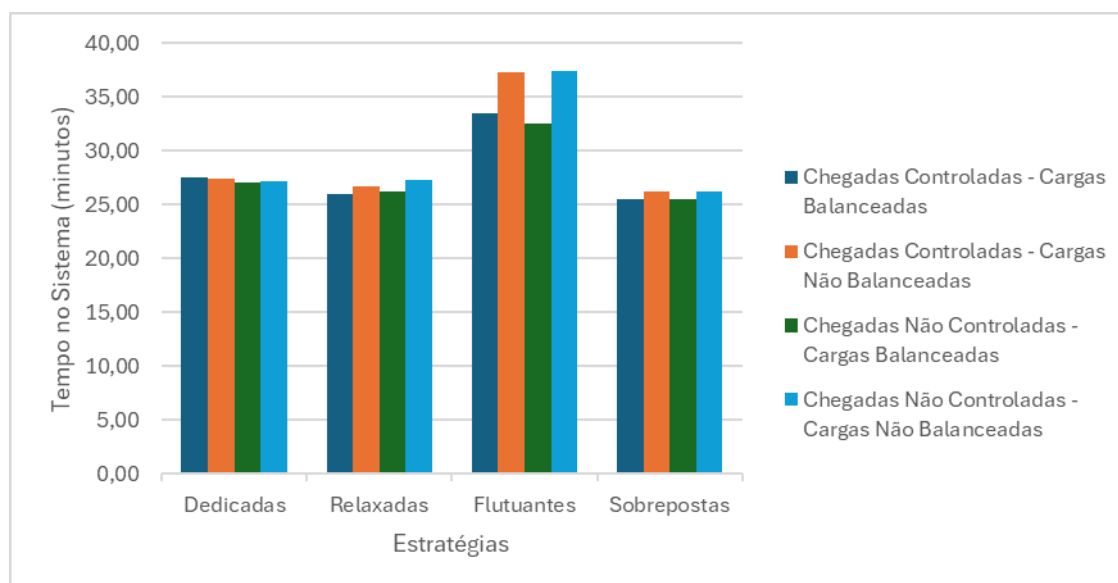


Figura 30 – Comparação do TIS para Chegadas Controladas e Não Controladas com impacto das cargas.

4.2.6. Desempenho das Estratégias de Alocação dos trabalhadores

Zonas Dedicadas

A estratégia de Zonas Dedicadas é caracterizada pela sua rigidez e estrutura fixa, o que a torna ideal para cenários com variabilidade reduzida e condições de carga e chegada balanceadas. A análise baseia-se nos dados das Tabelas 7, 8 e 9.

Taxa de Produção e TIS: Em cenários ideais, como nos cenários 11 e 12, a taxa de produção alcança um pico de 9,47 unidades por hora, e o TIS é de apenas 25,17 minutos (Tabela 7). Estes resultados refletem alta eficiência e estabilidade sob condições controladas. No entanto, em cenários com maior variabilidade, como no cenário 4, o TIS aumenta drasticamente para 66,12 minutos. Esse aumento substancial no TIS indica que a estratégia de Zonas Dedicadas é menos adaptável a mudanças, apresentando uma tendência à ineficiência quando há variabilidade moderada no processo.

Utilização dos Trabalhadores: A utilização média dos trabalhadores varia entre 83,49% e 100% nos cenários ideais, com o valor mais alto de utilização (100%) observado em cenários balanceados (Tabela 8). Isso indica que, quando as condições são favoráveis, essa estratégia utiliza de forma eficiente os recursos humanos. Em cenários de variabilidade moderada, observa-se uma dispersão maior na utilização dos trabalhadores, sugerindo períodos de inatividade que poderiam ser mitigados com estratégias mais flexíveis.

Utilização dos Servidores: A utilização dos postos flutua entre 30% e 63%, com o máximo em condições controladas (63,16% no cenário 12). Em cenários adversos, como no cenário 4, ocorre uma variação significativa na utilização dos servidores, com alguns próximos do limite e outros com tempos de espera superiores, destacando a falta de adaptabilidade a variações na chegada de produtos à linha (Tabela 9).

Zonas Relaxadas

As Zonas Relaxadas oferecem uma flexibilidade moderada em comparação com as Zonas Dedicadas, mas ainda apresentam desafios em cenários com variabilidade moderada. Esta análise é suportada pelos dados das Tabelas 11 e 12.

Taxa de Produção e TIS: Em cenários controlados, como no cenário 23, a taxa de produção atinge 9,48 unidades por hora, com um TIS de 25 minutos (Tabela 11). Esse desempenho é similar ao das Zonas Dedicadas sob condições balanceadas. Contudo, em cenários complexos, como o cenário 4, o TIS aumenta para 63,76 minutos, refletindo a dificuldade dessa estratégia em lidar com flutuações significativas.

Utilização dos Trabalhadores: Em cenários ideais, a utilização dos trabalhadores também é elevada, atingindo até 100% em casos específicos. No entanto, quando a variabilidade é alta, como nos cenários mais desafiadores, a utilização média dos trabalhadores cai para 80% a 90%, com variações consideráveis entre diferentes tarefas (Tabela 12). Estes dados sugerem que, em situações de maior complexidade, a estratégia de Zonas Relaxadas tende a ter dificuldades em distribuir a carga de forma eficiente.

Utilização dos Servidores: A utilização dos postos é relativamente estável em cenários controlados, com um pico de 63,77%. Em contextos de maior variabilidade, como evidenciado no cenário 4, a dispersão aumenta e há postos com subutilização significativa, indicando um nível de ineficiência maior em cenários não controlados (Tabela 13).

Zonas Flutuantes

A estratégia de Zonas Flutuantes é mais versátil, caracterizando-se pela elevada flexibilidade, mas também mostra limitações em cenários de alta complexidade. A análise é fundamentada nas Tabelas 15 e 16.

Taxa de Produção e TIS: Em condições ideais (por exemplo, cenário 23), a taxa de produção atinge 9,23 unidades por hora com um TIS de 25,92 minutos (Tabela 15), demonstrando uma eficiência comparável às estratégias rígidas em cenários controlados. Em condições adversas (cenário 4), o TIS aumenta drasticamente para 171,82 minutos no pior cenário, o que reflete uma sobrecarga do sistema. Esse aumento no TIS evidencia a vulnerabilidade das Zonas Flutuantes a cenários extremos, onde a elevada variabilidade torna o sistema menos eficiente.

Utilização dos Trabalhadores: Em cenários com carga balanceada, a utilização dos trabalhadores é bastante elevada, próxima de 100%. Entretanto, em cenários mais complexos, a utilização varia entre 82% e 100%, indicando alternância entre subutilização e sobrecarga. Isso sugere que a flexibilidade das Zonas Flutuantes pode não ser suficiente para equilibrar a carga de trabalho em situações com variabilidade moderada (Tabela 16).

Utilização dos Servidores: Em condições favoráveis, a utilização média dos postos situa-se entre 44% e 45%. Nos cenários mais desafiadores, como o cenário 4, observa-se uma grande variação na utilização dos postos de trabalho, com alguns sobrecarregados enquanto outros permanecem inativos. Este comportamento revela a vulnerabilidade da estratégia às flutuações intensas de chegada de produtos à linha (Tabela 17).

Zonas Sobrepostas

As Zonas Sobrepostas demonstram o melhor desempenho geral, evidenciando a eficácia da sobreposição de trabalhadores na manutenção de uma operação equilibrada e adaptável. Esta análise é confirmada pelas Tabelas 19 e 20.

Taxa de Produção e TIS: Em cenários ideais, como os cenários 23 e 24, a taxa de produção é de 9,70 unidades por hora, e o TIS é de 24,67 minutos (Tabela 19). Este é o melhor desempenho entre todas as estratégias e indica que a sobreposição permite uma maior eficiência. Mesmo em cenários complexos, como o cenário 4, o TIS é mantido abaixo de 55 minutos no pior cenário, demonstrando uma resiliência significativamente maior em comparação com as outras estratégias.

Utilização dos Trabalhadores: A utilização média dos trabalhadores é alta, variando entre 85% e 100%, mesmo em cenários mais desafiadores. Nos cenários ideais, a utilização dos trabalhadores atinge 98,86%. A possibilidade de sobreposição permite que os trabalhadores se ajustem às flutuações na carga, reduzindo o tempo de espera e aumentando a produção (Tabela 20).

Utilização dos Servidores: Em cenários favoráveis, a utilização dos postos atinge um máximo de 64,65%, o que representa uma distribuição quase ideal da carga de trabalho. Em cenários de variabilidade moderada, a utilização dos postos é mais equilibrada, com menor variação e dispersão do que nas outras estratégias, demonstrando que a estratégia de sobreposição é menos suscetível a congestionamentos (Tabela 21).

5. Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

Com base nos resultados das simulações e análise de cada estratégia, concluiu-se que não existe uma solução universal aplicável a todos os cenários. Cada estratégia tem vantagens específicas e limitações que variam com as condições operacionais, como variabilidade, carga e capacidade dos *buffers*, sugerindo que abordagens flexíveis são preferíveis em ambientes produtivos dinâmicos.

As Zonas Sobrepostas foram especialmente eficientes em cenários com alta variabilidade e chegadas não controladas, destacando-se pela adaptabilidade a diferentes cargas e pela redução no tempo no sistema. A sua flexibilidade torna-a a estratégia mais indicada para ambientes produtivos com incertezas e flutuações de fluxo. Embora as taxas de produção das Zonas Sobrepostas, medidas em unidades por hora, pareçam similares a outras estratégias no curto prazo, ao longo de semanas ou meses representam ganhos significativos.

As Zonas Flutuantes tiveram um desempenho competitivo em cenários com variabilidade moderada. Apesar de mais sensíveis a variações extremas, mantêm boa eficiência em condições controladas, equilibrando flexibilidade e estabilidade. Em cenários de chegadas controladas e carga balanceada, as Zonas Flutuantes são eficientes, maximizando a produção e mantendo um tempo no sistema aceitável.

As Zonas Dedicadas e Relaxadas, apesar de menos eficazes com variabilidade e chegadas imprevisíveis, foram adequadas para contextos estáveis e previsíveis, apresentando taxa de produção estável e tempo no sistema reduzido. São, assim, ideais para sistemas de produção onde a previsibilidade é fundamental.

O estudo demonstrou que a capacidade dos *buffers* de saída influencia o tempo no sistema em situações de carga não balanceada. Em cenários com *buffers* limitados, o tempo no sistema aumentou, especialmente em estratégias rígidas como as Zonas Dedicadas. Estratégias flexíveis como as Zonas Sobrepostas mantêm desempenho mais equilibrado e eficiente, permitindo um fluxo contínuo e tempo no sistema mais baixo.

Em suma, o tipo de chegada foi o fator mais determinante: chegadas controladas favorecem estratégias rígidas, chegadas não controladas indicam estratégias flexíveis como mais adequadas. Estes resultados mostram que a escolha da estratégia ideal depende da natureza do ambiente produtivo, variabilidade, previsibilidade e capacidade dos *buffers*, com cada estratégia oferecendo vantagens distintas no curto e longo prazo.

5.2 Limitações e Propostas de Trabalho Futuro

Apesar dos insights fornecidos, o presente estudo apresenta algumas limitações, abrindo possibilidades para futuras investigações:

Simplificação dos Cenários de Simulação: A utilização de tempos de processamento e padrões de chegada predefinidos limitou a complexidade do modelo, não abrangendo toda a variabilidade presente em sistemas reais. Fatores como tempos de setup, falhas de equipamentos e paragens para manutenção, que podem alterar o desempenho de cada estratégia, não foram considerados.

Fatores Humanos e Operacionais: Variáveis como tempo de descanso, mudanças de turno e variações nas habilidades dos trabalhadores, que influenciam diretamente a produtividade, não foram consideradas. Estes fatores podem influenciar a eficiência das estratégias em ambientes reais.

Chegada e *Buffers*: A análise concentrou-se em chegadas controladas e não controladas e em *buffers* de capacidade zero e infinita. A inclusão de diferentes padrões de chegada e *buffers* com capacidade variável ou temporariamente limitada poderiam fornecer uma visão mais precisa sobre o impacto dessas variáveis.

Propostas de Trabalho Futuro

Para aprofundar o conhecimento na área, futuras investigações poderiam explorar:

Incorporação de Fatores Humanos: Fatores como fadiga, mudança de turnos e diferentes níveis de habilidades dos trabalhadores poderiam ser integrados ao modelo.

Exploração de Padrões de Chegada Mais Complexos: A simulação de padrões sazonais e flutuações diárias no fluxo de trabalho traria o modelo mais próximo da realidade, permitindo a análise de como cada estratégia responde a variações complexas de chegada de produtos à linha.

***Buffers* Variáveis:** A introdução de *buffers* de capacidade variável e intermediária ajudaria a identificar o ponto ótimo de capacidade em diferentes cenários, fornecendo insights mais aplicáveis à realidade operacional de muitas empresas.

Consideração de Avarias e Manutenção: Integrar falhas de equipamentos e períodos de manutenção, ajudaria a avaliar a adaptabilidade de cada estratégia a interrupções e desafios comuns na produção real.

Exploração de Cenários Multi-Produto: Ampliar a análise para incluir cenários de produção de múltiplos produtos com diferentes requisitos de processamento poderia revelar interações e complexidades adicionais.

Ao abordar estas limitações e explorar novos caminhos, futuras investigações poderão contribuir com uma compreensão mais abrangente e detalhada.

6. Referências Bibliográficas

Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2005). *Discrete-Event System Simulation* (4th ed.). Prentice-Hall.

Bartholdi, J. J., & Eisenstein, D. D. (1996). A Production Line that Balances Itself. *Operations Research*, 44(1), 21-34. <https://doi.org/10.1287/opre.44.1.21>

Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-693. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.010

Calzavara, M., Faccio, M., Persona, A., & Zennaro, I. (2021). Walking Worker vs fixed Worker assembly considering the impact of components exposure on assembly time and energy expenditure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 2971–2988. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06438-9>

Cragg, T., McNamara, T., & Shaaban, S. (2024). Buffers and merging assembly lines: Balanced or unbalanced? *International Journal of Production Research*.

Crama, Y., & Gultekin, H. (2010). Throughput optimization in two-machine flowshops with flexible operations. *Journal of Scheduling*, 13, 227-243. <https://doi.org/10.1007/s10951-008-0096-2>

Ebrahimi, M., Mahmoodjanloo, M., Einabadi, B., Baboli, A., & Rother, E. (2023). A mixed-model assembly line sequencing problem with parallel stations and walking Workers: A case study in the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 61(3), 993-1012. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2022801>

Suzaki, K. (1987). *The New Manufacturing Challenge: Techniques for Continuous Improvement*. Macmillan.

Guo, X., Zhou, L., Zhang, Z., Qi, L., Wang, J., Qin, S., & Cao, J. (2024). Multi-objective optimization of multi-product parallel disassembly line balancing problem considering multi-skilled Workers using a discrete chemical reaction optimization algorithm. *Computers, Materials & Continua*, 80(3), 4475-4496. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.048123>

HOPP, Wallace J.; SPEARMAN, Mark L. *Factory Physics*. 2. ed. Boston: McGraw-Hill, 2004.

Mönch, T., Huchzermeier, A., & Bebersdorf, P. (2021). Variable takt times in mixed-model assembly line balancing with random customization. *International Journal of Production Research*, 59(15), 4670-4689. DOI: 10.1080/00207543.2020.1769874

Mirzaei, N., Nejad, M. G., & Fernandes, N. O. (2021). Combining line balancing methods and discrete event simulation: A case study from a metalworking company. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(1), 14-24. DOI:10.24867/IJIEM-2021-1-273

Miqueo, A., Yagüe-Fabra, J. A., Torralba, M., Oliveros, M.-J., & Tosello, G. (2023). Parallel walking-*Worker* flexible assembly lines for high-mix low-volume demand. *Processes*, 11(1), 172. <https://doi.org/10.3390/pr11010172>

Thurer, M., Fernandes, N. O., & Henriques, M. F. N. (2024). Rabbit Chase O: A new approach to realizing one-piece flow in production lines through flexible takt or planned processing times. *International Journal of Production Economics*.

Scholl, A. (1999). Balancing and sequencing of assembly lines. Springer Science & Business Media.

Sriram, G., et al. (2015). A novel work-sharing protocol for U-shaped assembly lines. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2015, 3778-3789. DOI: 10.1109/WSC.2014.7020056

Suzaki, K. (1987). *The New Manufacturing Challenge: Techniques for Continuous Improvement*. Macmillan.

Thurer, M., Stevenson, M., & Protzman, C. (2016). Workload control in job shops with reentrant flow. *International Journal of Production Research*, 54(17), 5136-5150. DOI: 10.1080/00207543.2016.1156182

Tiacci, L. (2024). Combining balancing, sequencing and *buffer* allocation decisions to improve the efficiency of mixed-model asynchronous assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*, 194, 110357. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110357>

Wang, Q., Lassalle, S., Mileham, A. R., & Owen, G. W. (2009). Analysis of a linear walking *Worker* line using a combination of computer simulation and mathematical modeling approaches. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(2/3), 64-70.

Wu, K., Zhou, Y., & Zhao, N. (2016). Variability and the fundamental properties of production lines. *Computers & Industrial Engineering*, 97, 214-228. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.014>

Yilmaz, H. (2021). Modeling and solving assembly line *Worker* assignment and balancing problem with sequence-dependent setup times. *Soft Computing*, 25, 12899-12914. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06107-3>

Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. Free Press.

Flowdit. (2024). Os oito desperdícios no Lean Manufacturing. Disponível em: <https://flowdit.com/8-wastes-of-lean/>.

Anexos

Nestes anexos, serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas ao longo do projeto, organizados de forma clara e estruturada. Estes dados serviram de base para a análise das diferentes estratégias de alocação dos trabalhadores, proporcionando insights valiosos sobre o desempenho das várias abordagens em diversos cenários. Embora não tenham sido incluídas todas as 100 replicações para cada cenário, os resultados apresentados refletem as principais medidas de desempenho, como o valor médio, mínimo, máximo e o desvio padrão, o que facilita uma melhor interpretação dos dados.

No Subcapítulo 1, é apresentada a tabela de codificação dos fatores experimentais utilizados na simulação, que incluem a carga, a variabilidade dos tempos de processamento, o tipo de chegada e a capacidade dos *buffers*.

Nos Subcapítulos 2 a 5, são apresentados os resultados detalhados para cada uma das quatro estratégias: Zonas Dedicadas, Zonas Relaxadas, Zonas Flutuantes e Zonas Sobrepostas, respetivamente. Para cada estratégia, são incluídos, a taxa de produção, o tempo no sistema em minutos (TIS), a percentagem de utilização dos trabalhadores (processo e transporte) e a percentagem de utilização dos servidores.

Esta organização permite uma análise detalhada e estruturada de cada estratégia, com foco nas estatísticas descritivas essenciais, proporcionando uma visão clara e concisa das diferentes abordagens testadas.

1. Estrutura dos Cenários

Tabela 6 – Estrutura dos Cenários utilizados na Simulação

Cenário	Chegada	OutputBuffer	Variabilidade	Carga
1	Controlada	Limitado a 0	Triangular (CV=0,136)	Balanceada
2	Controlada	Limitado a 0	Triangular (CV=0,136)	Não Balanceada
3	Controlada	Limitado a 0	Triangular (CV=0,272)	Balanceada
4	Controlada	Limitado a 0	Triangular (CV=0,272)	Não Balanceada
5	Controlada	Limitado a 0	Determinístico (CV=0)	Balanceada
6	Controlada	Limitado a 0	Determinístico (CV=0)	Não Balanceada
7	Controlada	Ilimitado	Triangular (CV=0,136)	Balanceada
8	Controlada	Ilimitado	Triangular (CV=0,136)	Não Balanceada
9	Controlada	Ilimitado	Triangular (CV=0,272)	Balanceada
10	Controlada	Ilimitado	Triangular (CV=0,272)	Não Balanceada
11	Controlada	Ilimitado	Determinístico (CV=0)	Balanceada
12	Controlada	Ilimitado	Determinístico (CV=0)	Não Balanceada
13	Não Controlada	Limitado a 0	Triangular (CV=0,136)	Balanceada
14	Não Controlada	Limitado a 0	Triangular (CV=0,136)	Não Balanceada
15	Não Controlada	Limitado a 0	Triangular (CV=0,272)	Balanceada
16	Não Controlada	Limitado a 0	Triangular (CV=0,272)	Não Balanceada
17	Não Controlada	Limitado a 0	Determinístico (CV=0)	Balanceada
18	Não Controlada	Limitado a 0	Determinístico (CV=0)	Não Balanceada
19	Não Controlada	Ilimitado	Triangular (CV=0,136)	Balanceada
20	Não Controlada	Ilimitado	Triangular (CV=0,136)	Não Balanceada
21	Não Controlada	Ilimitado	Triangular (CV=0,272)	Balanceada
22	Não Controlada	Ilimitado	Triangular (CV=0,272)	Não Balanceada
23	Não Controlada	Ilimitado	Determinístico (CV=0)	Balanceada
24	Não Controlada	Ilimitado	Determinístico (CV=0)	Não Balanceada

2. Resultados das Zonas Dedicadas

Tabela 7 – Taxa de Produção e TIS (Zonas Dedicadas)

Cenário	Média Taxa de Produção	Mín Taxa de Produção	Máx Taxa de Produção	Desvio Padrão	Média TIS	Mín TIS	Máx TIS	Desvio Padrão
1	7,93	7,46	8,61	0,29	30,59	27,80	37,63	2,46
2	7,92	7,46	8,47	0,25	30,41	27,89	40,48	3,15
3	7,95	7,38	8,48	0,28	39,94	33,24	60,33	6,77
4	7,95	7,33	8,48	0,29	41,06	32,42	66,12	8,43
5	7,91	7,37	8,52	0,29	25,17	25,17	25,17	0,00
6	7,91	7,37	8,52	0,29	25,17	25,17	25,17	0,00
7	8,88	8,84	8,90	0,02	26,43	26,36	26,53	0,04
8	8,85	8,82	8,90	0,02	26,51	26,35	26,61	0,06
9	8,36	8,30	8,42	0,03	27,71	27,52	27,98	0,12
10	8,30	8,26	8,38	0,03	27,85	27,60	28,04	0,11
11	9,47	9,47	9,47	0,00	25,17	25,17	25,17	0,00
12	9,47	9,47	9,47	0,00	25,17	25,17	25,17	0,00
13	7,94	7,40	8,44	0,26	29,38	27,58	33,71	1,53
14	7,94	7,39	8,62	0,31	29,53	27,46	34,74	1,82
15	7,94	7,42	8,48	0,27	34,22	30,21	40,65	2,61
16	7,96	7,36	8,53	0,29	34,92	31,46	42,73	2,82
17	7,91	7,37	8,52	0,29	25,17	25,17	25,17	0,00
18	7,91	7,37	8,52	0,29	25,17	25,17	25,17	0,00
19	8,88	8,84	8,90	0,02	26,43	26,36	26,53	0,04
20	8,85	8,82	8,90	0,02	26,51	26,35	26,61	0,06
21	8,36	8,30	8,42	0,03	27,71	27,53	27,97	0,11
22	8,30	8,25	8,37	0,02	27,85	27,63	28,06	0,11
23	9,47	9,47	9,47	0,00	25,17	25,17	25,17	0,00
24	9,47	9,47	9,47	0,00	25,17	25,17	25,17	0,00

Tabela 8 – Percentagem Utilização dos Workers (Zonas Dedicadas)

Cenário	Média Worker1	Min Worker1	Máx Worker1	Desvio Padrão	Média Worker2	Min Worker2	Máx Worker2	Desvio Padrão	Média Worker3	Min Worker3	Máx Worker3	Desvio Padrão	Média Worker4	Min Worker4	Máx Worker4	Desvio Padrão
1	83,73	78,94	90,52	1,60	83,70	78,87	90,90	2,47	83,66	79,16	90,51	2,33	83,67	78,50	90,98	2,56
2	83,68	79,01	89,61	2,17	83,68	79,09	89,63	2,16	83,65	78,60	89,19	2,16	83,60	78,54	89,26	2,19
3	84,12	78,13	89,56	2,33	83,91	78,44	89,98	2,36	83,89	78,17	89,14	2,24	83,94	77,56	89,88	2,52
4	84,09	77,10	89,75	2,59	84,07	77,21	89,32	2,48	84,00	76,95	90,39	2,74	83,91	77,25	88,97	2,40
5	83,49	77,76	89,92	2,48	83,49	77,76	89,93	2,49	83,49	77,76	89,93	2,49	83,49	77,76	89,89	2,48
6	83,49	77,76	89,92	2,48	83,49	77,76	89,93	2,49	83,49	77,76	89,93	2,49	83,49	77,76	89,89	2,48
7	93,76	93,37	94,29	0,19	93,73	93,09	94,26	0,24	93,74	93,20	94,50	0,26	93,71	93,24	94,21	0,20
8	93,36	92,82	93,96	0,23	93,40	92,64	94,17	0,31	93,41	92,74	93,99	0,25	93,43	92,87	94,03	0,24
9	88,18	87,19	89,14	0,40	88,23	87,20	89,27	0,42	88,22	87,06	89,20	0,44	88,16	86,98	89,14	0,44
10	87,63	86,44	88,60	0,44	87,67	86,32	88,96	0,54	87,68	86,57	88,56	0,41	87,62	86,63	88,51	0,38
11	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
12	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
13	83,74	77,82	88,84	2,25	83,78	78,46	89,04	2,16	83,78	78,16	88,88	2,19	83,73	78,34	89,29	2,24
14	83,86	78,00	90,88	2,63	83,84	78,06	91,19	2,69	83,84	78,21	91,00	2,62	83,82	77,95	91,02	2,67
15	83,79	78,24	89,62	2,32	83,78	77,54	89,61	2,46	83,86	77,92	89,35	2,33	83,77	77,91	89,08	2,28
16	84,01	78,27	89,65	2,32	84,02	77,66	90,38	2,60	84,05	77,73	89,68	2,44	84,01	77,97	89,28	2,31
17	83,49	77,76	89,92	2,48	83,49	77,76	89,93	2,49	83,49	77,76	89,93	2,49	83,49	77,76	89,89	2,48
18	83,49	77,76	89,92	2,48	83,49	77,76	89,93	2,49	83,49	77,76	89,93	2,49	83,49	83,49	89,89	1,51
19	93,76	93,37	94,29	0,19	93,73	93,09	94,26	0,24	93,74	93,20	94,47	0,26	93,72	93,24	94,21	0,20
20	93,36	92,79	93,96	0,24	93,41	92,64	94,18	0,32	93,40	92,78	93,96	0,24	93,43	92,86	94,02	0,24
21	88,21	87,09	89,19	0,43	88,19	87,15	88,98	0,38	88,21	86,93	89,13	0,45	88,19	87,20	89,44	0,46
22	87,58	86,30	88,74	0,50	87,64	85,90	88,61	0,56	87,63	86,73	88,96	0,46	87,66	86,30	88,41	0,44
23	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
24	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00

Tabela 9 – Percentagem Utilização dos Servers 1-4 (Zonas Dedicadas)

Cenário	Média Server1	Min Server1	Máx Server1	Desvio Padrão	Média Server2	Mín Server2	Máx Server2	Desvio Padrão	Média Server3	Mín Server3	Máx Server3	Desvio Padrão	Média Server4	Mín Server4	Máx Server4	Desvio Padrão
1	41,28	38,27	45,54	1,49	44,01	39,26	50,84	2,38	39,98	37,51	43,81	1,30	40,42	37,51	45,22	1,59
2	53,58	50,39	57,48	1,45	30,90	26,85	38,53	2,42	53,23	50,28	57,08	1,39	28,79	25,26	35,29	2,08
3	43,53	39,39	47,58	1,67	47,60	41,64	55,42	2,82	41,28	37,98	44,91	1,42	42,85	39,16	48,06	1,83
4	55,07	50,01	59,61	1,96	36,25	28,97	43,46	2,96	54,50	49,69	58,79	1,86	33,57	27,60	42,77	3,12
5	39,55	36,84	42,59	1,17	39,55	36,83	42,60	1,18	39,55	36,84	42,60	1,18	39,55	36,83	42,60	1,18
6	52,73	49,12	56,79	1,57	26,37	24,55	28,40	0,79	52,73	49,12	56,80	1,57	26,37	24,55	28,40	0,79
7	44,39	44,00	44,86	0,18	44,43	44,14	44,85	0,15	44,39	44,06	44,84	0,16	44,41	44,07	44,86	0,16
8	58,95	58,53	59,49	0,20	29,50	29,19	29,80	0,12	59,00	58,43	59,48	0,21	29,49	29,23	29,74	0,10
9	41,75	41,12	42,68	0,32	41,79	41,13	42,59	0,30	41,82	41,06	42,71	0,34	41,78	40,92	42,39	0,30
10	55,32	54,56	56,17	0,33	27,70	27,20	28,18	0,20	55,37	54,12	56,47	0,48	27,69	27,16	28,07	0,19
11	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00
12	63,16	63,16	63,16	0,00	31,58	31,58	31,58	0,00	63,16	63,16	63,16	0,00	31,58	31,58	31,58	0,00
13	39,67	36,88	42,07	1,06	39,66	36,83	42,09	1,07	39,70	37,15	42,22	1,03	39,67	37,20	42,13	1,01
14	52,97	49,33	57,56	1,68	26,48	24,55	28,53	0,81	52,95	49,31	57,76	1,73	26,48	24,65	28,64	0,82
15	39,70	37,18	42,46	1,08	39,68	36,95	42,61	1,16	39,68	36,84	42,75	1,20	39,68	36,57	42,40	1,19
16	53,05	49,55	56,62	1,44	26,53	24,45	28,30	0,79	53,07	48,78	57,33	1,74	26,53	24,79	28,32	0,72
17	39,55	36,84	42,59	1,17	39,55	36,83	42,60	1,18	39,55	36,84	42,60	1,18	39,55	36,83	42,60	1,18
18	52,73	49,12	56,79	1,57	26,37	24,55	28,40	0,79	52,73	49,12	56,80	1,57	26,37	24,55	28,40	0,79
19	44,39	44,00	44,86	0,18	44,43	44,13	44,85	0,15	44,39	44,06	44,84	0,16	44,41	44,07	44,86	0,16
20	58,95	58,48	59,49	0,20	29,50	29,18	29,80	0,13	59,00	58,45	59,50	0,21	29,49	29,23	29,74	0,10
21	41,75	41,07	42,45	0,28	41,81	41,14	42,39	0,26	41,78	41,05	42,49	0,29	41,78	40,97	42,34	0,28
22	55,29	54,40	56,21	0,37	27,68	27,14	28,17	0,21	55,37	53,72	56,29	0,53	27,66	27,09	28,09	0,20
23	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00
24	63,16	63,16	63,16	0,00	31,58	31,58	31,58	0,00	63,16	63,16	63,16	0,00	31,58	31,58	31,58	0,00

Tabela 10 – Percentagem Utilização dos Servers 5-8 (Zonas Dedicadas)

Cenário	Média Server5	Mín Server5	Máx Server5	Desvio Padrão	Média Server6	Mín Server6	Máx Server6	Desvio Padrão	Média Server7	Mín Server7	Máx Server7	Desvio Padrão	Média Server8	Mín Server8	Máx Server8	Desvio Padrão
1	39,80	37,50	43,42	1,22	39,99	37,61	43,88	1,29	39,62	37,06	43,04	1,23	39,65	37,30	43,15	1,20
2	26,81	25,01	29,52	0,93	53,19	49,89	56,58	1,36	26,41	24,83	28,12	0,67	52,79	49,56	56,43	1,40
3	40,65	37,40	43,56	1,26	41,56	37,97	46,72	1,80	39,77	36,76	42,66	1,21	39,75	36,70	42,50	1,18
4	28,75	25,07	32,47	1,51	54,72	49,26	59,92	2,18	26,51	24,54	28,33	0,77	52,99	48,64	56,37	1,58
5	39,54	36,84	42,60	1,18	39,55	36,83	42,60	1,18	39,55	36,84	42,57	1,17	39,55	36,83	42,59	1,18
6	26,36	24,56	28,40	0,78	52,73	49,11	56,80	1,57	26,36	24,56	28,38	0,78	52,73	49,11	56,78	1,57
7	44,40	44,10	44,83	0,15	44,41	44,04	44,82	0,16	44,40	43,93	44,78	0,17	44,38	43,90	44,77	0,18
8	29,49	29,20	29,79	0,12	59,00	58,43	59,51	0,22	41,81	41,02	42,41	0,28	59,01	58,51	59,48	0,20
9	41,78	41,09	42,35	0,26	41,81	41,02	42,41	0,28	41,75	40,89	42,55	0,34	41,77	41,19	42,43	0,25
10	27,68	27,15	28,30	0,23	55,41	54,26	56,50	0,46	27,67	27,23	28,22	0,20	55,33	54,45	55,99	0,31
11	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00
12	31,58	31,58	31,58	0,00	63,16	63,16	63,16	0,00	31,58	31,58	31,58	0,00	63,16	63,16	63,16	0,00
13	39,71	37,12	42,09	1,02	39,67	36,94	42,23	1,08	39,65	37,02	42,34	1,09	39,67	37,21	42,26	1,03
14	26,47	24,70	28,78	0,83	52,96	49,40	57,44	1,64	26,46	24,55	28,62	0,83	52,95	49,29	57,61	1,70
15	39,74	36,40	42,49	1,24	39,71	37,09	42,25	1,05	39,70	36,48	42,26	1,18	39,66	36,77	42,52	1,17
16	26,53	24,42	28,64	0,86	53,10	49,22	56,30	1,45	26,55	24,62	28,11	0,71	53,03	49,25	56,43	1,47
17	39,54	36,84	42,60	1,18	39,55	36,83	42,60	1,18	39,55	36,84	42,57	1,17	39,55	36,83	42,59	1,18
18	26,36	24,56	28,40	0,78	52,73	49,11	56,80	1,57	26,36	24,56	28,38	0,78	52,73	49,11	56,78	1,57
19	44,40	44,10	44,82	0,15	44,41	44,04	44,82	0,16	44,41	43,93	44,78	0,17	44,38	43,90	44,77	0,18
20	29,49	29,20	29,79	0,12	58,99	58,40	59,49	0,22	29,50	29,25	29,78	0,11	59,01	58,51	59,48	0,20
21	41,79	41,13	42,53	0,29	41,78	40,79	42,52	0,35	41,76	41,07	42,63	0,32	41,78	41,10	42,46	0,28
22	27,65	27,12	28,26	0,23	55,37	54,66	56,32	0,34	27,68	27,27	28,25	0,20	55,37	54,41	56,10	0,35
23	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00	47,37	47,37	47,37	0,00
24	31,58	31,58	31,58	0,00	63,16	63,16	63,16	0,00	31,58	31,58	31,58	0,00	63,16	63,16	63,16	0,00

3. Resultados das Zonas Relaxadas

Tabela 11 – Taxa de Produção e TIS (Zonas Relaxadas)

Cenário	Média Taxa de Produção	Mín Taxa de Produção	Máx Taxa de Produção	Desvio Padrão	Média TIS	Mín TIS	Máx TIS	Desvio Padrão
1	7,94	7,46	8,41	0,24	26,71	26,25	27,34	0,27
2	7,92	7,24	8,53	0,32	28,94	27,31	31,03	0,93
3	7,94	7,52	8,50	0,24	30,02	27,86	33,49	1,41
4	7,94	7,25	8,45	0,30	35,80	30,80	63,76	8,24
5	7,91	7,37	8,52	0,29	25,19	25,11	25,32	0,05
6	7,91	7,37	8,52	0,29	25,45	25,26	25,68	0,05
7	9,10	9,05	9,13	0,02	25,58	25,48	25,68	0,05
8	9,06	9,02	9,10	0,02	25,68	25,57	25,78	0,05
9	8,68	8,61	8,75	0,04	26,37	26,18	26,60	0,11
10	8,60	8,53	8,66	0,04	26,60	26,36	26,83	0,12
11	9,48	9,48	9,48	0,00	25,00	25,00	25,00	0,00
12	9,48	9,48	9,48	0,00	25,00	25,00	25,00	0,00
13	7,93	7,18	8,59	0,35	27,97	26,58	29,80	0,81
14	7,98	7,58	8,54	0,24	29,98	27,86	37,80	2,49
15	7,98	7,45	8,55	0,28	33,48	28,79	55,66	6,72
16	7,92	7,49	8,33	0,21	37,84	31,49	71,19	9,93
17	7,91	7,37	8,52	0,29	25,19	25,10	25,33	0,06
18	7,91	7,37	8,52	0,29	25,33	25,19	25,60	0,10
19	9,10	9,07	9,13	0,02	25,59	25,51	25,68	0,13
20	9,06	9,02	9,1	0,02	25,68	25,57	25,79	0,05
21	8,69	8,62	8,75	0,03	26,40	26,20	26,61	0,10
22	8,60	8,51	8,66	0,04	26,62	26,37	26,88	0,13
23	9,48	9,48	9,48	0,00	25,00	25,00	25,00	0,00
24	9,48	9,48	9,48	0,00	25,00	25,00	25,00	0,00

Tabela 12 – Percentagem Utilização dos Workers (Zonas Relaxadas)

Cenário	Média Worker1	Min Worker1	Máx Worker1	Desvio Padrão	Média Worker2	Min Worker2	Máx Worker2	Desvio Padrão	Média Worker3	Min Worker3	Máx Worker3	Desvio Padrão	Média Worker4	Min Worker4	Máx Worker4	Desvio Padrão
1	87,28	82,54	91,49	1,83	80,44	74,96	85,73	2,20	86,98	82,45	91,20	1,79	80,71	74,96	86,28	2,31
2	87,12	81,24	92,25	2,25	80,00	70,87	88,04	3,51	86,74	81,30	92,24	2,23	80,41	71,52	88,60	3,49
3	86,68	83,47	90,81	1,50	80,88	75,28	88,89	2,79	86,43	82,35	91,71	1,92	81,18	75,35	88,07	2,60
4	86,62	80,96	90,24	1,91	80,98	71,19	88,52	3,55	86,24	80,20	91,29	2,27	81,28	73,31	88,40	3,08
5	87,12	82,36	92,06	1,98	79,87	73,08	87,79	3,01	87,04	82,26	92,03	1,99	79,94	73,06	87,80	3,01
6	87,09	82,33	92,04	1,98	79,90	73,19	87,81	2,99	87,01	82,26	92,03	1,99	79,96	73,24	87,80	2,97
7	96,00	95,25	96,52	0,26	96,00	95,44	96,64	0,25	96,04	95,57	96,50	0,19	96,02	95,20	96,53	0,27
8	95,64	94,97	96,07	0,23	95,63	95,11	96,25	0,23	95,62	95,06	96,10	0,21	95,61	95,14	96,20	0,22
9	91,62	90,41	92,47	0,42	91,69	90,62	92,86	0,46	91,91	90,83	92,80	0,40	91,31	90,30	92,39	0,43
10	90,79	89,64	91,90	0,46	90,87	89,73	91,80	0,42	91,02	90,20	91,81	0,33	90,59	88,87	91,75	0,59
11	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
12	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
13	87,33	81,15	93,02	2,42	80,20	70,94	89,45	3,78	86,93	80,76	92,43	2,38	80,60	70,73	89,15	3,76
14	87,58	83,94	91,93	1,63	80,96	75,15	88,43	2,72	87,22	83,65	91,61	1,63	81,37	75,75	88,45	2,60
15	87,44	83,35	92,51	1,87	81,11	73,60	88,38	3,02	86,90	82,29	91,46	1,87	81,58	73,89	88,90	3,06
16	86,76	82,89	90,39	1,53	80,33	74,29	86,64	2,52	86,19	82,69	89,32	1,35	80,90	74,95	86,58	2,37
17	87,12	82,36	92,06	1,98	79,86	73,09	87,80	3,01	87,05	82,26	92,03	1,99	79,93	73,06	87,80	3,01
18	87,09	82,35	92,05	1,98	79,89	73,16	87,80	2,99	87,02	82,26	92,03	1,99	79,96	73,24	87,80	2,97
19	95,99	95,48	96,53	0,21	96,06	95,51	96,56	0,21	96,03	95,42	96,55	0,23	96,05	95,61	96,65	0,21
20	95,64	94,90	96,07	0,24	95,63	95,08	96,27	0,24	95,63	95,03	96,07	0,21	95,61	95,13	96,24	0,23
21	92,13	91,04	92,94	0,39	91,23	90,10	92,39	0,47	91,93	90,90	92,93	0,41	91,45	90,67	92,53	0,38
22	91,16	90,36	92,35	0,41	90,39	89,12	91,55	0,50	91,01	89,63	92,02	0,49	90,52	88,57	91,67	0,64
23	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
24	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00

Tabela 13 – Percentagem Utilização dos Servers 1-4 (Zonas Relaxadas)

Cenário	Média Server1	Mín Server1	Máx Server1	Desvio Padrão	Média Server2	Mín Server2	Máx Server2	Desvio Padrão	Média Server3	Min Server3	Máx Server3	Desvio Padrão	Média Server4	Min Server4	Máx Server4	Desvio Padrão
1	42,20	39,15	45,94	1,39	39,72	37,45	42,06	0,94	39,72	37,15	41,83	0,96	39,70	37,26	41,90	42,20
2	58,55	52,72	63,77	2,26	26,38	24,09	28,54	0,91	52,76	48,03	57,02	1,84	26,39	23,92	28,40	58,55
3	47,36	42,34	54,13	2,42	39,66	37,49	42,66	1,06	39,67	37,29	42,51	1,07	39,72	37,46	42,56	47,36
4	64,80	56,15	73,91	3,63	26,46	24,08	28,20	0,84	52,94	48,34	56,63	1,70	26,43	23,87	28,15	64,80
5	40,30	37,57	43,45	1,20	39,55	36,82	42,60	1,18	39,55	36,84	42,60	1,18	39,55	36,83	42,60	40,30
6	54,43	50,98	58,37	1,51	26,37	24,54	28,40	0,79	52,73	49,12	56,80	1,57	26,36	24,55	28,40	54,43
7	45,46	45,02	45,81	0,16	45,45	45,11	45,78	0,14	45,47	44,99	45,80	0,17	45,48	44,95	45,93	45,46
8	60,42	59,88	60,85	0,20	30,18	29,96	30,41	0,09	60,37	59,80	60,92	0,23	30,21	30,00	30,49	60,42
9	43,41	42,60	44,03	0,29	43,39	42,36	44,28	0,39	43,43	42,81	44,42	0,33	43,40	42,81	43,93	43,41
10	57,35	56,34	58,59	0,46	28,64	28,14	29,22	0,22	57,35	56,47	58,25	0,36	28,73	28,10	29,09	57,35
11	47,38	47,38	47,38	0,00	47,36	47,36	47,36	0,00	47,35	47,35	47,35	0,00	47,38	47,38	47,38	47,38
12	63,17	63,17	63,17	0,00	31,57	31,57	31,57	0,00	63,15	63,15	63,15	0,00	31,59	31,59	31,59	63,17
13	44,19	39,93	48,41	1,73	39,68	36,11	43,16	1,44	39,65	35,89	43,27	1,50	39,66	36,06	43,11	44,19
14	59,46	55,20	65,81	2,18	26,60	25,26	28,41	0,65	53,24	50,14	56,74	1,35	26,61	25,14	28,44	59,46
15	49,50	42,63	59,27	3,41	39,96	36,95	43,19	1,27	39,92	37,22	42,84	1,15	39,88	37,25	43,08	49,50
16	64,37	57,85	73,22	3,15	26,38	24,95	27,86	0,59	52,77	49,70	56,25	1,34	26,36	24,78	27,76	64,37
17	40,38	37,63	43,63	1,23	39,55	36,82	42,60	1,18	39,55	36,84	42,60	1,18	39,55	36,83	42,60	40,38
18	53,75	49,99	57,83	1,60	26,37	24,54	28,40	0,79	52,73	49,12	56,80	1,57	26,36	24,55	28,40	53,75
19	45,47	45,14	45,92	0,16	45,48	45,08	45,84	0,16	45,48	45,13	45,83	0,14	45,47	45,05	45,83	45,47
20	60,41	59,86	60,78	0,19	30,18	29,96	30,42	0,09	60,37	59,78	60,89	0,23	30,22	30,03	30,48	60,41
21	43,43	42,61	44,23	0,33	43,44	42,69	44,18	0,30	43,45	42,59	44,33	0,35	43,37	42,61	44,30	43,43
22	57,36	56,37	58,31	0,40	28,66	28,21	29,33	0,23	57,29	55,93	58,12	0,45	28,67	28,19	29,27	57,36
23	47,39	47,39	47,39	0,00	47,36	47,36	47,36	0,00	47,35	47,35	47,35	0,00	47,38	47,38	47,38	47,39
24	63,17	63,17	63,17	0,00	31,57	31,57	31,57	0,00	63,15	63,15	63,15	0,00	31,59	31,59	31,59	63,17

Tabela 14 – Percentagem Utilização dos Servers 5-8 (Zonas Relaxadas)

Cenário	Média Server5	Mín Server5	Máx Server5	Desvio Padrão	Média Server6	Mín Server6	Máx Server6	Desvio Padrão	Média Server7	Mín Server7	Máx Server7	Desvio Padrão	Média Server8	Mín Server8	Máx Server8	Desvio Padrão
1	39,72	37,31	41,92	0,94	39,71	37,07	42,01	1,01	39,73	37,41	42,07	0,95	39,69	37,30	42,10	0,98
2	26,40	24,08	28,63	0,93	52,75	48,26	57,21	1,83	26,38	24,18	28,37	0,86	52,80	47,99	57,14	1,87
3	39,68	37,66	42,93	1,08	39,70	37,37	42,17	0,98	39,72	37,36	42,30	1,01	39,67	37,54	42,92	1,11
4	26,44	24,15	28,37	0,86	52,90	48,17	56,44	1,70	26,45	24,00	28,65	0,95	52,88	49,11	57,15	1,64
5	39,55	36,84	42,60	1,18	39,54	36,82	42,60	1,18	39,55	36,82	42,57	1,17	39,55	36,83	42,59	1,18
6	26,36	24,56	28,40	0,78	52,73	49,10	56,80	1,57	26,36	24,55	28,38	0,78	52,73	49,11	56,78	1,57
7	45,49	45,07	45,87	0,16	45,46	45,09	45,83	0,15	45,46	45,11	45,94	0,17	45,50	45,11	45,82	0,15
8	30,18	29,84	30,40	0,11	60,39	59,87	61,14	0,26	30,19	29,92	30,42	0,10	60,37	59,82	60,88	0,22
9	43,36	42,39	44,10	0,35	43,38	42,71	44,30	0,33	43,37	42,78	44,23	0,30	43,36	42,39	44,10	0,35
10	28,66	28,25	29,30	0,22	57,33	55,86	58,26	0,49	28,67	28,17	29,18	0,21	57,36	56,50	58,33	0,37
11	47,38	47,38	47,38	0,00	47,36	47,36	47,36	0,00	47,35	47,35	47,35	0,00	47,38	47,38	47,38	0,00
12	31,59	31,59	31,59	0,00	63,15	63,15	63,15	0,00	31,57	31,57	31,57	0,00	63,17	63,17	63,17	0,00
13	39,69	35,93	42,90	1,43	39,66	35,81	42,93	1,46	39,67	35,97	43,02	1,44	39,66	35,77	43,06	1,49
14	26,61	24,94	28,44	0,72	53,22	50,44	56,80	1,30	26,61	25,34	28,42	0,63	53,25	50,62	56,87	1,28
15	39,93	36,96	42,92	1,22	39,87	37,09	42,77	1,16	39,88	36,98	42,58	1,14	39,91	37,01	43,13	1,25
16	26,37	24,92	27,87	0,60	52,77	49,33	55,59	1,28	26,36	24,72	27,87	0,64	52,77	49,98	55,81	1,19
17	39,55	36,84	42,60	1,18	39,54	36,82	42,60	1,18	39,55	36,82	42,57	1,17	39,55	36,83	42,59	1,18
18	26,36	24,56	28,40	0,78	52,73	49,10	56,80	1,57	26,36	24,55	28,38	0,78	52,73	49,11	56,78	1,57
19	45,47	45,04	45,90	0,18	45,49	45,14	45,90	0,16	45,48	44,99	45,87	0,18	45,49	45,09	45,91	0,17
20	30,19	29,85	30,41	0,12	60,38	59,91	61,06	0,24	30,19	29,91	30,41	0,10	60,39	59,85	60,96	0,23
21	43,42	42,38	44,32	0,40	43,43	42,70	44,38	0,34	43,41	42,90	44,14	0,25	43,44	42,56	44,21	0,34
22	28,67	28,14	29,27	0,23	57,27	55,66	58,26	0,54	28,64	28,08	29,15	0,22	57,38	56,47	58,19	0,35
23	47,39	47,39	47,39	0,00	47,36	47,36	47,36	0,00	47,35	47,35	47,35	0,00	47,38	47,38	47,38	0,00
24	31,59	31,59	31,59	0,00	63,15	63,15	63,15	0,00	31,57	31,57	31,57	0,00	63,17	63,17	63,17	0,00

4. Resultados das Zonas Flutuantes

Tabela 15 – Taxa de Produção e TIS (Zonas Flutuantes)

Cenário	Média Taxa de Produção	Mín Taxa de Produção	Máx Taxa de Produção	Desvio Padrão	Média TIS	Mín TIS	Máx TIS	Desvio Padrão
1	7,94	7,54	8,56	0,23	48,71	39,48	65,05	6,39
2	7,96	7,34	8,55	0,30	57,44	44,49	106,23	15,44
3	7,94	7,43	8,47	0,26	52,30	41,52	83,23	10,43
4	7,96	7,57	8,65	0,27	60,11	46,90	171,82	31,23
5	7,91	7,37	8,51	0,29	46,84	37,57	59,36	5,45
6	7,91	7,37	8,52	0,29	51,62	40,40	71,29	7,72
7	8,79	8,74	8,83	0,02	27,19	27,09	27,35	0,07
8	7,60	7,53	7,70	0,04	31,08	30,69	31,38	0,17
9	8,26	8,17	8,34	0,04	28,84	28,55	29,15	0,15
10	7,58	7,50	7,67	0,04	31,12	30,74	31,46	0,18
11	8,84	8,84	8,84	0,00	26,67	26,67	26,67	0,00
12	7,82	7,82	7,82	0,00	30,22	30,22	30,22	0,00
13	7,95	7,34	8,46	0,28	46,40	38,21	63,10	6,22
14	7,97	7,34	8,59	0,31	68,74	48,60	168,22	29,91
15	7,95	7,45	8,41	0,24	49,48	39,97	73,55	8,40
16	7,95	7,08	8,62	0,39	70,15	42,69	170,68	32,00
17	7,91	7,37	8,51	0,29	44,94	35,71	58,92	5,80
18	7,91	7,37	8,52	0,29	63,34	41,29	118,59	19,33
19	8,8	8,74	8,83	0,02	27,19	27,08	27,34	0,07
20	7,6	7,52	7,67	0,04	31,10	30,83	31,40	0,14
21	8,3	8,21	8,38	0,04	28,72	28,47	28,95	0,12
22	7,63	7,51	7,71	0,05	30,92	30,54	31,37	0,21
23	9,23	9,23	9,23	0,00	25,92	25,92	25,92	0,00
24	7,73	7,73	7,73	0,00	30,63	30,63	30,63	0,00

Tabela 16 – Percentagem Utilização dos Workers (Zonas Flutuantes)

Cenário	Média Worker1	Min Worker1	Máx Worker1	Desvio Padrão	Média Worker2	Min Worker2	Máx Worker2	Desvio Padrão	Média Worker3	Min Worker3	Máx Worker3	Desvio Padrão	Média Worker4	Min Worker4	Máx Worker4	Desvio Padrão
1	84,84	80,49	90,85	2,12	83,94	79,59	90,44	2,23	83,73	78,90	90,54	2,39	84,40	79,68	90,74	2,27
2	84,11	76,97	90,28	2,72	78,73	71,95	85,69	2,80	85,38	78,17	91,31	2,69	89,43	82,66	94,57	2,44
3	84,89	79,65	90,81	2,28	83,89	79,14	89,40	2,10	83,93	78,54	90,05	2,35	84,21	78,65	90,69	2,46
4	84,40	79,55	91,04	2,35	78,75	73,91	87,17	2,74	85,20	80,99	92,45	2,37	89,39	85,25	96,57	2,34
5	83,85	77,73	90,28	2,56	83,61	78,11	90,14	2,46	83,26	77,43	90,08	2,58	84,77	78,74	91,19	2,54
6	83,20	77,48	89,71	2,50	78,43	71,79	85,28	2,75	84,71	78,94	91,51	2,57	89,04	84,21	94,90	2,19
7	92,97	92,26	93,66	0,29	92,76	91,55	93,46	0,39	92,92	92,27	93,64	0,28	95,05	94,42	95,69	0,26
8	82,42	81,30	83,63	0,48	71,35	70,22	72,18	0,40	82,23	81,09	83,61	0,52	86,51	85,10	88,00	0,59
9	88,20	86,93	89,16	0,46	87,37	86,18	88,99	0,57	87,50	86,05	88,38	0,48	87,61	86,34	88,73	0,49
10	81,70	80,65	83,05	0,49	70,16	68,88	71,34	0,50	82,17	80,96	83,70	0,56	87,44	86,01	88,67	0,54
11	93,25	93,25	93,25	0,00	93,24	93,24	93,24	0,00	93,87	93,87	93,87	0,00	94,48	94,48	94,48	0,00
12	82,89	82,89	82,89	0,00	71,42	71,42	71,42	0,00	85,32	85,32	85,32	0,00	92,24	92,24	92,24	0,00
13	85,93	79,20	90,54	2,33	83,84	77,16	89,18	2,46	82,64	76,21	88,13	2,44	84,27	77,51	89,49	2,45
14	86,98	79,98	94,71	3,01	72,22	65,68	77,67	2,45	86,73	79,08	93,83	3,01	91,55	84,85	97,81	2,65
15	86,08	81,05	91,11	2,05	83,68	79,00	88,05	1,85	82,67	77,86	87,97	2,07	84,22	79,85	89,49	1,97
16	86,73	75,59	94,92	3,96	71,83	64,84	76,45	2,39	86,47	76,31	93,51	3,53	91,35	81,92	97,68	3,24
17	84,35	78,40	90,80	2,53	83,99	78,43	90,38	2,44	82,74	76,73	89,60	2,63	84,02	78,05	90,39	2,52
18	85,47	78,53	93,96	3,15	72,73	68,33	76,87	1,74	85,82	79,41	92,89	2,75	90,81	85,65	97,13	2,35
19	92,97	92,32	93,53	0,25	92,77	91,59	93,47	0,39	92,94	92,30	93,61	0,27	95,06	94,23	95,64	0,29
20	82,01	80,99	83,22	0,46	71,13	69,75	72,33	0,53	82,68	81,47	83,87	0,49	86,32	84,76	87,82	0,62
21	88,68	87,75	90,04	0,47	87,66	86,12	88,54	0,50	87,79	86,36	88,98	0,54	88,04	86,74	89,32	0,53
22	82,08	80,63	83,31	0,55	70,39	69,20	71,71	0,51	83,10	81,15	84,37	0,66	87,88	86,13	89,21	0,63
23	97,44	97,44	97,44	0,00	97,44	97,44	97,44	0,00	97,44	97,44	97,44	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
24	76,96	76,96	76,96	0,00	76,10	76,10	76,10	0,00	85,00	85,00	85,00	0,00	89,86	89,86	89,86	0,00

Tabela 17 – Percentagem Utilização dos Servers 1-4 (Zonas Flutuantes)

Cenário	Média Server1	Mín Server1	Máx Server1	Desvio Padrão	Média Server2	Mín Server2	Máx Server2	Desvio Padrão	Média Server3	Min Server3	Máx Server3	Desvio Padrão	Média Server4	Min Server4	Máx Server4	Desvio Padrão
1	46,86	41,79	55,75	2,88	55,08	48,82	65,07	3,35	49,95	44,30	58,55	2,93	54,82	47,50	65,71	3,74
2	60,96	54,12	69,75	3,20	51,06	42,98	62,62	4,03	62,44	54,90	71,42	3,38	49,95	41,44	61,96	4,21
3	47,04	40,76	54,25	2,76	56,00	47,98	65,67	3,62	50,18	43,65	58,39	3,02	55,71	47,93	65,95	3,69
4	61,09	55,15	70,96	3,26	51,65	44,32	65,16	4,31	62,14	56,53	72,59	3,33	49,38	42,70	63,74	4,39
5	46,75	40,16	55,37	3,11	54,08	46,43	63,56	3,50	49,23	41,99	57,78	3,23	54,28	45,87	64,01	3,71
6	59,78	52,73	69,02	3,34	48,39	39,44	60,36	4,29	61,65	53,90	70,35	3,36	49,76	39,30	62,28	4,70
7	43,98	43,53	44,42	0,18	44,14	43,75	44,50	0,15	44,00	43,48	44,49	0,21	44,03	43,65	44,49	0,17
8	51,36	50,82	51,92	0,23	31,88	31,11	32,87	0,36	52,10	51,56	52,61	0,21	31,45	30,65	32,40	0,36
9	41,38	40,62	42,25	0,33	42,29	41,48	43,10	0,33	41,45	40,67	42,30	0,33	42,07	41,30	42,93	0,33
10	51,21	50,11	52,29	0,45	31,03	29,89	31,82	0,40	51,25	50,26	52,16	0,39	29,70	28,66	30,67	0,41
11	44,18	44,18	44,18	0,00	44,16	44,16	44,16	0,00	44,18	44,18	44,18	0,00	44,17	44,17	44,17	0,00
12	52,51	52,51	52,51	0,00	33,18	33,18	33,18	0,00	52,40	52,40	52,40	0,00	27,98	27,98	27,98	0,00
13	40,01	36,76	42,29	1,14	40,91	37,71	43,26	1,14	40,16	36,78	42,69	1,21	40,75	37,57	43,75	1,26
14	54,47	49,44	58,62	1,88	31,26	28,17	33,30	1,05	55,01	50,07	59,23	1,87	32,73	28,86	35,74	1,41
15	40,03	37,80	42,59	0,98	41,00	38,41	43,78	1,10	40,33	37,66	43,23	1,14	40,90	38,46	42,92	0,91
16	54,18	47,37	58,44	2,28	31,09	27,88	33,53	1,16	54,81	48,29	59,19	2,24	32,73	28,47	35,82	1,51
17	39,98	37,35	43,18	1,19	41,65	38,73	44,95	1,27	40,49	37,70	43,62	1,21	42,51	39,45	46,06	1,35
18	54,08	50,36	58,35	1,63	31,34	28,80	33,47	0,95	54,44	50,39	59,01	1,76	33,39	30,09	36,26	1,26
19	43,98	43,67	44,38	0,15	44,11	43,74	44,56	0,17	43,99	43,57	44,45	0,18	44,04	43,66	44,46	0,16
20	51,10	50,37	51,73	0,28	31,71	31,13	32,47	0,28	52,00	51,29	52,53	0,25	31,43	30,88	32,23	0,28
21	41,57	40,80	42,22	0,29	42,27	41,39	43,16	0,36	41,51	40,87	42,58	0,35	42,08	41,33	42,94	0,33
22	51,35	50,63	52,25	0,33	30,74	29,94	31,79	0,38	51,54	50,48	52,34	0,38	29,49	28,61	30,38	0,36
23	46,17	46,17	46,17	0,00	46,14	46,14	46,14	0,00	46,17	46,17	46,17	0,00	46,14	46,14	46,14	0,00
24	51,68	51,68	51,68	0,00	31,51	31,51	31,51	0,00	51,98	51,98	51,98	0,00	34,51	34,51	34,51	0,00

Tabela 18 – Percentagem Utilização dos Servers 5-8 (Zonas Flutuantes)

Cenário	Média Server5	Mín Server5	Máx Server5	Desvio Padrão	Média Server6	Mín Server6	Máx Server6	Desvio Padrão	Média Server7	Mín Server7	Máx Server7	Desvio Padrão	Média Server8	Mín Server8	Máx Server8	Desvio Padrão
1	50,22	44,05	59,70	3,22	54,08	47,57	65,30	3,66	50,26	44,13	59,40	3,14	54,95	47,23	66,14	3,88
2	38,30	32,04	47,48	3,17	64,14	56,49	73,57	3,49	39,24	33,72	48,01	2,94	65,35	57,29	76,37	3,91
3	50,29	43,81	59,02	3,12	55,06	47,11	66,56	3,99	50,11	43,38	58,18	3,03	55,50	46,80	66,42	4,01
4	37,34	32,69	47,94	3,19	63,90	58,13	75,05	3,51	38,25	33,53	47,94	3,00	65,36	58,72	77,91	3,98
5	48,92	41,11	57,78	3,41	54,15	45,15	65,54	4,17	49,66	41,55	59,89	3,75	55,37	45,86	67,61	4,45
6	38,01	30,33	49,00	3,83	64,28	56,42	74,38	3,67	40,10	31,95	50,85	3,87	64,55	55,58	74,69	3,90
7	43,97	43,44	44,33	0,18	44,03	43,73	44,43	0,14	43,98	43,58	44,48	0,18	44,03	43,69	44,39	0,14
8	25,65	25,29	25,98	0,14	51,59	51,07	52,32	0,26	26,19	25,88	26,57	0,14	51,44	50,84	52,16	0,27
9	41,49	40,85	42,22	0,28	41,98	41,23	42,71	0,30	41,48	40,58	42,59	0,41	41,82	41,24	42,38	0,23
10	25,56	25,09	26,16	0,22	51,29	50,39	52,19	0,37	25,89	25,26	26,38	0,23	51,51	50,15	52,51	0,48
11	44,18	44,18	44,18	0,00	44,16	44,16	44,16	0,00	44,47	44,47	44,47	0,00	44,17	44,17	44,17	0,00
12	26,34	26,34	26,34	0,00	53,18	53,18	53,18	0,00	27,43	27,43	27,43	0,00	52,14	52,14	52,14	0,00
13	40,04	36,80	42,53	1,17	40,47	37,42	43,40	1,22	40,14	36,97	42,78	1,19	40,46	37,39	42,98	1,14
14	28,22	25,22	30,65	1,11	54,51	49,56	59,00	1,93	28,10	25,48	30,37	1,00	53,96	49,20	58,33	1,86
15	40,13	37,78	42,38	0,94	40,64	38,11	43,10	1,02	40,22	37,90	42,62	0,96	40,61	38,17	43,38	1,06
16	28,13	24,53	31,05	1,33	54,19	47,81	58,67	2,23	27,87	24,48	30,44	1,22	53,73	47,71	58,21	2,15
17	40,17	37,21	43,45	1,27	41,50	38,57	44,94	1,30	40,54	37,50	43,75	1,28	41,84	38,79	44,81	1,23
18	28,38	26,10	30,92	0,99	54,46	50,81	58,82	1,64	28,37	26,25	31,12	1,00	53,76	49,99	57,93	1,62
19	43,97	43,51	44,34	0,17	44,04	43,70	44,34	0,13	43,98	43,59	44,42	0,17	44,03	43,67	44,39	0,15
20	25,68	25,40	26,11	0,15	51,54	50,93	52,26	0,27	25,41	25,03	25,75	0,15	51,14	50,25	51,90	0,34
21	41,57	40,91	42,23	0,27	41,97	41,36	42,62	0,26	41,54	40,77	42,41	0,34	41,91	41,08	42,82	0,36
22	25,65	25,04	26,14	0,23	51,42	50,51	52,40	0,39	25,47	24,67	25,91	0,26	51,38	50,32	52,81	0,51
23	46,17	46,17	46,17	0,00	46,14	46,14	46,14	0,00	46,17	46,17	46,17	0,00	46,14	46,14	46,14	0,00
24	26,14	26,14	26,14	0,00	51,53	51,53	51,53	0,00	26,05	26,05	26,05	0,00	51,49	51,49	51,49	0,00

5. Resultados das Zonas Sobrepostas

Tabela 19 – Taxa de Produção e TIS (Zonas Sobrepostas)

Cenário	Média Taxa de Produção	Mín Taxa de Produção	Máx Taxa de Produção	Desvio Padrão	Média TIS	Mín TIS	Máx TIS	Desvio Padrão
1	7,95	7,36	8,44	0,27	26,68	25,81	29,39	0,90
2	7,91	7,30	8,45	0,29	28,41	26,82	32,50	1,42
3	7,97	7,37	8,52	0,29	29,76	27,27	34,45	1,80
4	7,94	7,47	8,45	0,25	34,68	29,62	55,48	6,47
5	7,91	7,36	8,51	0,29	25,42	25,09	25,88	0,20
6	7,91	7,36	8,51	0,29	26,12	25,55	26,95	0,35
7	9,59	9,55	9,63	0,02	24,95	24,85	25,05	0,05
8	9,54	9,48	9,58	0,03	25,07	24,98	25,22	0,06
9	9,32	9,24	9,37	0,03	25,67	25,53	25,87	0,09
10	9,19	9,11	9,26	0,04	26,04	25,83	26,24	0,10
11	9,70	9,70	9,70	0,00	24,67	24,67	24,67	0,00
12	9,70	9,70	9,70	0,00	24,67	24,67	24,67	0,00
13	7,95	7,36	8,44	0,27	26,68	25,81	29,39	0,90
14	7,91	7,30	8,45	0,29	28,41	26,82	32,50	1,42
15	7,97	7,37	8,52	0,29	29,76	27,27	34,45	1,80
16	7,94	7,47	8,45	0,25	34,68	29,62	55,48	6,47
17	7,91	7,36	8,51	0,29	25,02	24,89	25,25	0,09
18	7,91	7,36	8,51	0,29	25,39	25,12	25,80	0,17
19	9,59	9,55	9,63	0,02	24,95	24,85	25,05	0,05
20	9,54	9,48	9,58	0,03	25,07	24,98	25,22	0,06
21	9,31	9,24	9,37	0,03	25,67	25,53	25,87	0,09
22	9,19	9,11	9,26	0,04	26,04	25,83	26,24	0,10
23	9,7	9,7	9,7	0,00	24,67	24,67	24,67	0,00
24	9,7	9,7	9,7	0,00	24,67	24,67	24,67	0,00

Tabela 20 – Percentagem Utilização dos Workers (Zonas Sobrepostas)

Cenário	Média Worker1	Min Worker1	Máx Worker1	Desvio Padrão	Média Worker2	Min Worker2	Máx Worker2	Desvio Padrão	Média Worker3	Min Worker3	Máx Worker3	Desvio Padrão	Média Worker4	Min Worker4	Máx Worker4	Desvio Padrão
1	89,49	85,58	92,50	1,42	85,75	80,42	89,52	1,87	80,52	73,49	86,76	2,71	72,41	63,99	80,73	3,42
2	89,14	84,90	92,54	1,56	85,48	80,45	90,26	2,00	80,00	72,17	86,12	2,85	71,98	63,13	80,48	3,54
3	88,75	85,38	91,46	1,25	85,47	79,83	90,06	2,09	80,84	73,38	87,40	2,86	73,95	64,19	82,59	3,76
4	88,28	85,49	91,18	1,16	85,14	81,53	89,71	1,67	80,65	75,10	86,45	2,32	73,97	66,06	82,19	3,29
5	89,53	85,74	92,80	1,44	85,56	81,17	90,85	1,98	79,94	72,81	87,19	2,94	71,37	61,48	81,72	4,13
6	89,62	85,57	92,81	1,48	85,67	81,32	91,10	2,00	79,96	73,24	87,19	2,85	71,21	61,29	81,49	4,12
7	98,86	98,28	99,47	0,24	98,85	98,33	99,43	0,22	98,85	98,25	99,47	0,25	98,89	98,43	99,63	0,25
8	98,34	97,88	98,83	0,19	98,32	97,72	98,99	0,26	98,40	97,85	99,14	0,26	98,39	97,76	98,89	0,23
9	96,08	95,07	97,12	0,42	96,08	94,73	96,95	0,45	96,08	95,03	96,98	0,40	96,03	94,77	97,16	0,49
10	94,69	93,53	95,82	0,47	94,75	93,29	95,70	0,50	94,78	93,66	95,77	0,43	94,72	93,90	95,81	0,39
11	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
12	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
13	89,49	85,58	92,50	1,42	85,75	80,42	89,52	1,87	80,52	73,49	86,76	2,71	72,41	63,99	80,73	3,42
14	89,14	84,90	92,54	1,56	85,48	80,45	90,26	2,00	80,00	72,17	86,12	2,85	71,98	63,13	80,48	3,54
15	88,75	85,38	91,46	1,25	85,47	79,83	90,06	2,09	80,84	73,38	87,40	2,86	73,95	64,19	82,59	3,76
16	88,28	85,49	91,18	1,16	85,14	81,53	89,71	1,67	80,65	75,10	86,45	2,32	73,97	66,06	82,19	3,29
17	89,53	85,74	92,80	1,44	85,54	81,15	90,84	1,98	79,92	72,80	87,17	2,93	71,35	61,46	81,69	4,13
18	89,60	85,55	92,80	1,48	85,65	81,31	91,09	2,00	79,94	73,21	87,16	2,85	71,17	61,26	81,46	4,12
19	98,86	98,28	99,47	0,24	98,85	98,33	99,43	0,22	98,85	98,25	99,47	0,25	98,89	98,43	99,63	0,25
20	98,34	97,88	98,83	0,19	98,32	97,72	98,99	0,26	98,40	97,85	99,14	0,26	98,39	97,76	98,89	0,23
21	96,08	95,07	97,12	0,42	96,08	94,73	96,95	0,45	96,08	95,03	96,98	0,40	96,03	94,77	97,16	0,49
22	94,69	93,53	95,82	0,47	94,75	93,29	95,70	0,50	94,78	93,66	95,77	0,43	94,72	93,90	95,81	0,39
23	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00
24	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00

Tabela 21 – Percentagem Utilização dos Servers 1-4 (Zonas Sobrepostas)

Cenário	Média Server1	Mín Server1	Máx Server1	Desvio Padrão	Média Server2	Mín Server2	Máx Server2	Desvio Padrão	Média Server3	Min Server3	Máx Server3	Desvio Padrão	Média Server4	Min Server4	Máx Server4	Desvio Padrão
1	45,25	40,48	51,35	2,22	39,75	36,76	42,22	1,12	39,74	36,56	42,20	1,15	39,76	36,80	42,17	1,10
2	59,49	53,91	66,12	2,50	26,36	24,25	28,03	0,77	52,71	48,64	56,34	1,57	26,37	24,41	28,16	0,76
3	50,04	42,06	59,46	3,56	39,85	36,85	42,79	1,21	39,80	36,42	42,35	1,21	39,84	36,86	42,41	1,13
4	65,07	58,66	75,88	3,55	26,45	24,99	28,11	0,64	52,91	49,93	56,12	1,26	26,47	24,88	28,36	0,71
5	42,88	38,93	46,66	1,58	39,55	36,83	42,60	1,18	39,55	36,84	42,60	1,18	39,55	36,83	42,60	1,18
6	56,83	52,07	61,57	1,94	26,37	24,55	28,40	0,79	52,73	49,12	56,80	1,57	26,37	24,55	28,40	0,79
7	47,95	47,68	48,42	0,15	47,94	47,59	48,34	0,15	47,96	47,63	48,34	0,15	47,92	47,43	48,29	0,18
8	63,56	63,08	63,98	0,18	31,80	31,49	32,04	0,11	63,59	63,12	64,16	0,21	31,79	31,56	31,99	0,09
9	46,61	45,79	47,54	0,36	46,57	45,79	47,44	0,34	46,60	45,84	47,37	0,31	46,52	45,74	47,21	0,30
10	61,20	60,41	62,18	0,36	30,63	29,97	31,33	0,28	61,26	60,20	62,27	0,42	30,62	30,09	31,14	0,21
11	48,48	48,48	48,48	0,00	48,48	48,48	48,48	0,00	48,48	48,48	48,48	0,00	48,49	48,49	48,49	0,00
12	64,64	64,64	64,64	0,00	32,32	32,32	32,32	0,00	64,65	64,65	64,65	0,00	32,32	32,32	32,32	0,00
13	45,25	40,48	51,35	2,22	39,75	36,76	42,22	1,12	39,74	36,56	42,20	1,15	39,76	36,80	42,17	1,10
14	59,49	53,91	66,12	2,50	26,36	24,25	28,03	0,77	52,71	48,64	56,34	1,57	26,37	24,41	28,16	0,76
15	50,04	42,06	59,46	3,56	39,85	36,85	42,79	1,21	39,80	36,42	42,35	1,21	39,84	36,86	42,41	1,13
16	65,07	58,66	75,88	3,55	26,45	24,99	28,11	0,64	52,91	49,93	56,12	1,26	26,47	24,88	28,36	0,71
17	40,71	37,78	44,01	1,27	39,55	36,83	42,60	1,18	39,55	36,84	42,60	1,18	39,55	36,83	42,60	1,18
18	54,39	50,50	58,68	1,67	26,37	24,55	28,40	0,79	52,73	49,12	56,80	1,57	26,37	24,55	28,40	0,79
19	47,95	47,68	48,42	0,15	47,94	47,59	48,34	0,15	47,96	47,63	48,34	0,15	47,92	47,43	48,29	0,18
20	63,56	63,08	63,98	0,18	31,80	31,49	32,04	0,11	63,59	63,12	64,16	0,21	31,79	31,56	31,99	0,09
21	46,61	45,79	47,54	0,36	46,57	45,79	47,44	0,34	46,60	45,84	47,37	0,31	46,52	45,74	47,21	0,30
22	61,20	60,41	62,18	0,36	30,63	29,97	31,33	0,28	61,26	60,20	62,27	0,42	30,62	30,09	31,14	0,21
23	48,48	48,48	48,48	0,00	48,48	48,48	48,48	0,00	48,48	48,48	48,48	0,00	48,49	48,49	48,49	0,00
24	64,64	64,64	64,64	0,00	32,32	32,32	32,32	0,00	64,65	64,65	64,65	0,00	32,32	32,32	32,32	0,00

Tabela 22 – Percentagem Utilização dos Servers 5-8 (Zonas Sobrepostas)

Cenário	Média Server5	Mín Server5	Máx Server5	Desvio Padrão	Média Server6	Mín Server6	Máx Server6	Desvio Padrão	Média Server7	Mín Server7	Máx Server7	Desvio Padrão	Média Server8	Mín Server8	Máx Server8	Desvio Padrão
1	39,77	36,64	42,06	1,11	39,75	36,85	42,21	1,09	39,78	36,92	42,17	1,07	39,74	37,06	42,23	1,05
2	26,36	24,12	28,08	0,81	52,72	48,59	56,46	1,61	26,37	24,34	28,18	0,78	52,69	48,45	56,09	1,56
3	39,86	36,59	42,59	1,23	39,84	36,63	42,50	1,20	39,81	36,43	42,80	1,30	39,81	36,71	42,60	1,20
4	26,48	25,02	27,92	0,59	52,91	49,68	56,26	1,34	26,44	24,91	28,35	0,70	52,86	49,18	56,41	1,48
5	39,55	36,81	42,60	1,18	39,55	36,81	42,60	1,18	39,55	36,81	42,59	1,18	39,55	36,83	42,57	1,17
6	26,37	24,54	28,40	0,79	52,73	49,09	56,80	1,57	26,36	24,55	28,40	0,79	52,73	49,11	56,76	1,56
7	47,88	47,49	48,29	0,03	47,94	47,60	48,30	0,14	47,92	47,57	48,34	0,16	47,95	47,53	48,20	0,14
8	31,78	31,54	32,01	0,10	63,59	63,16	64,13	0,05	31,81	31,56	32,06	0,10	63,60	63,09	64,07	0,20
9	46,57	45,60	47,20	0,33	46,63	45,86	47,24	0,28	46,53	45,71	47,25	0,31	46,60	45,85	47,32	0,30
10	30,64	29,96	31,02	0,22	61,23	60,30	62,16	0,38	30,61	29,99	31,27	0,26	61,26	60,51	62,54	0,42
11	48,49	48,49	48,49	0,00	48,49	48,49	48,49	0,00	48,49	48,49	48,49	0,00	48,48	48,48	48,48	0,00
12	32,33	32,33	32,33	0,00	64,65	64,65	64,65	0,00	32,33	32,33	32,33	0,00	64,64	64,64	64,64	0,00
13	39,77	36,64	42,06	1,11	39,75	36,85	42,21	1,09	39,78	36,92	42,17	1,07	39,74	37,06	42,23	1,05
14	26,36	24,12	28,08	0,81	52,72	48,59	56,46	1,61	26,37	24,34	28,18	0,78	52,69	48,45	56,09	1,56
15	39,86	36,59	42,59	1,23	39,84	36,63	42,50	1,20	39,81	36,43	42,80	1,30	39,81	36,71	42,60	1,20
16	26,48	25,02	27,92	0,59	52,91	49,68	56,26	1,34	26,44	24,91	28,35	0,70	52,86	49,18	56,41	1,48
17	39,55	36,81	42,60	1,18	39,55	36,81	42,60	1,18	39,55	36,81	42,59	1,18	39,55	36,83	42,57	1,17
18	26,37	24,54	28,40	0,79	52,73	49,09	56,80	1,57	26,36	24,55	28,40	0,79	52,73	49,11	56,76	1,56
19	47,88	47,49	48,29	0,16	47,94	47,60	48,30	0,14	47,92	47,57	48,34	0,16	47,95	47,53	48,20	0,14
20	31,78	31,54	32,01	0,10	63,59	63,16	64,13	0,20	31,81	31,56	32,06	0,10	63,60	63,09	64,07	0,20
21	46,57	45,60	47,20	0,33	46,63	45,86	47,24	0,28	46,53	45,71	47,25	0,31	46,60	45,85	47,32	0,30
22	30,64	29,96	31,02	0,22	61,23	60,30	62,16	0,38	30,61	29,99	31,27	0,26	61,26	60,51	62,54	0,42
23	48,49	48,49	48,49	0,00	48,49	48,49	48,49	0,00	48,49	48,49	48,49	0,00	48,48	48,48	48,48	0,00
24	32,33	32,33	32,33	0,00	64,65	64,65	64,65	0,00	32,33	32,33	32,33	0,00	64,64	64,64	64,64	0,00

